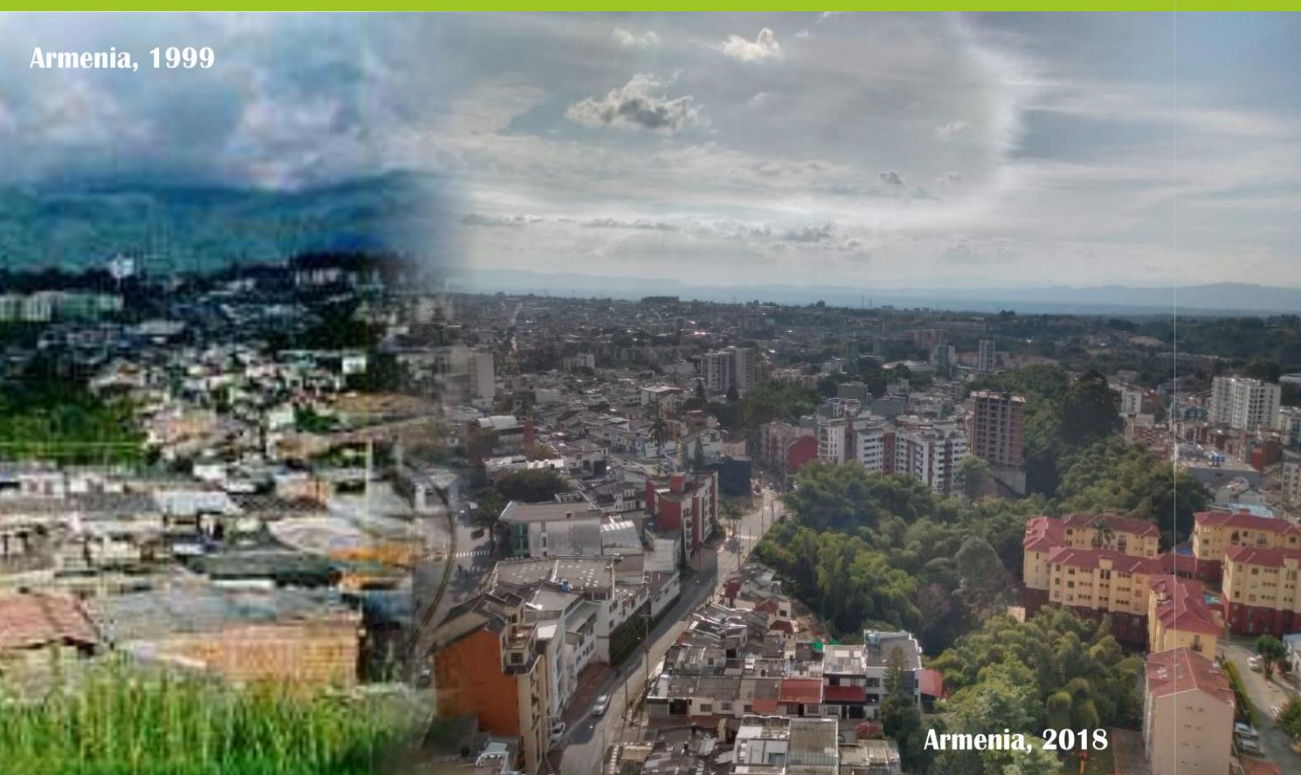


Serie de información básica para tomadores de decisiones de gestión de riesgos de desastres

Libro I. Comprendiendo la Sismología Básica

Armenia, 1999



Armenia, 2018

Sismo del Quindío

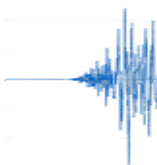
Componente Vertical

Carlos Arturo García O. – Leonardo Cano S. – Luis Carlos Martínez M.

Profesores Programa de Ingeniería Civil - Facultad de Ingeniería - Universidad del Quindío
Red Universitaria de Las Américas y El Caribe para la Reducción del Riesgo de Desastres REDULAC/RRD

«REDULAC / RRD»
RED UNIVERSITARIA DE LAS AMÉRICAS Y EL CARIBE PARA LA REDUCCIÓN DE RIESGO DE DESASTRES





**Serie de información básica para
tomadores de decisiones de
Gestión del Riesgo de Desastres**

Libro 1. Comprendiendo la Sismología Básica

Carlos Arturo García O.
Leonardo Cano S.
Luis Carlos Martínez M.

**Profesores Programa de Ingeniería Civil
- Facultad de Ingeniería –
Universidad del Quindío**

**Red Universitaria de Las Américas y El Caribe
para la Reducción del Riesgo de Desastres
REDULAC/RRD**

©

Carlos Arturo García O., Ing. Civil, MSc. Geotecnia

Leonardo Cano S., Ing. Civil, MSc. Ing. Sísmica, PhD. Estructuras

Luis Carlos Martínez M., Civil, MSc. Gestión del Riego y Desarrollo.

Serie de Información Básica para Tomadores de Decisiones de Gestión del Riesgo de Desastres

Libro 1. Comprendiendo la Sismología Básica

Este libro se distribuye bajo la licencia Creative Commons: Atribución - No Comercial - Sin Derivadas CC BY-NC-ND 4.0.

Usted puede utilizar este archivo de conformidad con la Licencia. Usted puede obtener una copia de la Licencia en



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>. En particular, esta licencia permite copiar y distribuir de forma gratuita, pero no permite venta ni modificaciones de este material.

ISBN: 978-958-5108-02-8

Los nombres y productos citados en este libro corresponden a productos de software libre y productos de marcas registradas. Han sido utilizadas en este libro con fines editoriales y como ilustración y referencia de las herramientas disponibles para los profesores.

Reproducido y editado por: ELIZCOM SAS

www.elizcom.com

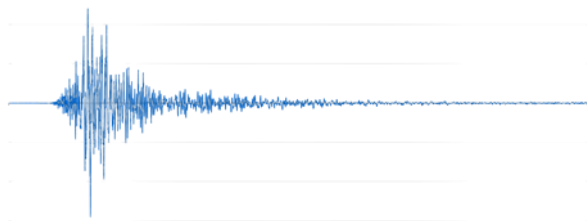
ventas@elizcom.com

Celular (57+) 311 334 9748

Fax: (56) (6) +7493244

Armenia, Quindío, Colombia-2019

Tiraje 200 ejemplares.



LOS AUTORES



CARLOS ARTURO GARCÍA OCAMPO

Ingeniero Civil de la Universidad del Quindío, Magister en Ingeniería Civil, Área de Geotecnia de la Universidad de Los Andes. Docente del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad del Quindío (Investigador Grupo Quimbaya). Consultor e investigador en Geotecnia, Geoamenazas y Gestión del Riesgo de Desastres por más de 20 años.

Presidente del Capítulo Colombia de la Red Universitaria de las Américas y El Caribe para la Reducción del Riesgo de Desastres – REDULAC/RRD, de la cual también hace parte del Consejo Directivo Regional y es Coordinador de la Subregión Andina (Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia).

Miembro de la Comisión Asesora de Investigaciones de la UNGRD en representación del Capítulo Colombia de REDULAC/RRD.

Ha realizado diversos cursos en temáticas asociadas a la Gestión del Riesgo de Desastres y Cambio Climático y de igual forma ha sido conferencista, ponente, panelista y capacitador de numerosos eventos de Gestión del Riesgo de Desastres a nivel nacional e internacional.

LEONARDO CANO SALDAÑA



Ingeniero Civil de la Universidad del Quindío, Magister en Ingeniería Civil, Área de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Los Andes, PhD. en Ingeniería Estructural de la Universidad de Puerto Rico. Es Profesor de la Maestría en Ingeniería Estructural y Sísmica del Instituto Tecnológico de Santo Domingo - República Dominicana, Profesor de la Maestría en Ingeniería Estructural de la Universidad Nacional de Ingeniería - Managua (N). Es Docente Investigador del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Libre Seccional Pereira y Docente del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad del Quindío. Consultor e

investigador en las Áreas de Ingeniería Sísmica, Diseño Estructural, Patología Estructura e Ingeniería Estructural Forense.

Es miembro activo de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS y pertenece a los Comités de Redacción de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente NSR-10.

LUIS CARLOS MARTÍNEZ MEDINA

Ingeniero Civil de la Universidad del Quindío, especialista en Gerencia de Empresas Constructoras de la Escuela de Administración de Negocios, en

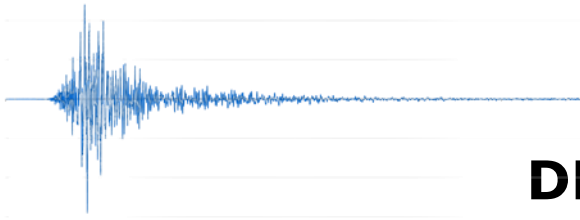


Evaluación de Riesgos y Prevención de Desastres de la Universidad de los Andes; con maestría en Desarrollo Sustentable de la Universidad del Valle y en Gestión del Riesgo y desarrollo de la Escuela de Ingenieros Militares y con varios cursos a nivel internacional en GRD. Investigador del Grupo Quimbaya de la Universidad del Quindío

Se ha desempeñado como profesor de pregrado y posgrado de varias Instituciones de Educación Superior del país y actualmente es asesor de la Dirección General de la UNGRD.

Fundador de la Red Universitaria de las Américas y El Caribe para la Reducción del Riesgo de Desastres – REDULAC/RRD, de la cual también funge como Director Ejecutivo Regional para las Américas y el Caribe.

Ha realizado diversos cursos en temáticas asociadas a la Gestión del Riesgo de Desastres y Cambio Climático y de igual forma ha sido conferencista, ponente, panelista y capacitador de numerosos eventos de Gestión del Riesgo de Desastres.



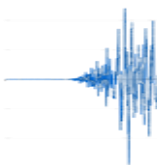
DEDICATORIA

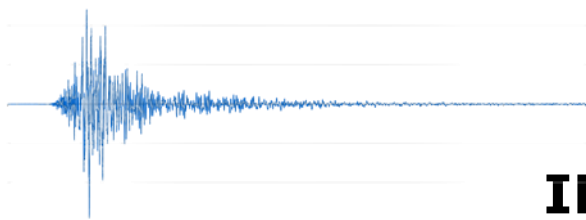
A nuestros estudiantes, por la motivación para organizar la información de este texto.

Al Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), en especial a los gestores municipales y regionales del riesgo de desastres, quienes siempre han valorado nuestros aportes en el tema.

A la Red Universitaria de Las Américas y El Caribe para la Reducción del Riesgo de Desastres REDULAC/RRD por su confianza y respaldo.

Carlos Arturo García O.
Leonardo Cano S.
Luis Carlos Martínez M.
Septiembre 2019





INTRODUCCIÓN

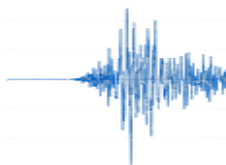
La *Serie de Información Básica para Tomadores de Decisiones de Gestión del Riesgo de Desastres*, busca llevar, en un lenguaje sencillo, pero apropiado, sin perder la rigurosidad técnica y científica del conocimiento asociado al riesgo, desde aquellos en los que el potencial de pérdidas se produce por la acción de la naturaleza, y los que son inducidos por una inadecuada relación entre el hombre y el entorno.

Colombia, de conformidad con la Ley 1523 de 2012 “*Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*”, promueve una mayor conciencia del riesgo, de una forma que concuerda con las políticas mundiales acordadas en el Marco de Sendai (MaSRRD, 2015 - 2030) y que de acuerdo con la *Prioridad 1: comprender el riesgo de desastres*:

“Las políticas y prácticas para la gestión del riesgo de desastres deben basarse en una comprensión del riesgo de desastres en todas sus dimensiones de vulnerabilidad, capacidad, grado de exposición de personas y bienes, características de las amenazas y entorno. Esos conocimientos se pueden aprovechar para la evaluación del riesgo previo a los desastres, para la prevención y mitigación y para la elaboración y aplicación de medidas adecuadas de preparación y respuesta eficaz para casos de desastre.” (UNISDR, 2015)

Conscientes que el riesgo sísmico en Colombia es de gran importancia y cuyo reconocimiento es vital para orientar acciones de la reducción del mismo; para alcanzar este objetivo, es fundamental conocer los factores que componen ese riesgo, como lo es la amenaza, los sujetos, objetos y sistemas expuestos y la vulnerabilidad en todos sus atributos o dimensiones.

La primera entrega de la Serie, en esta ocasión, enfocada a la *Comprensión de la Sismología Básica*, es un ejercicio académico tiene como objetivo recopilar y organizar la información existente sobre uno de los componentes del riesgo, para

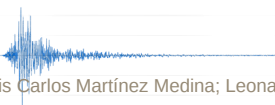


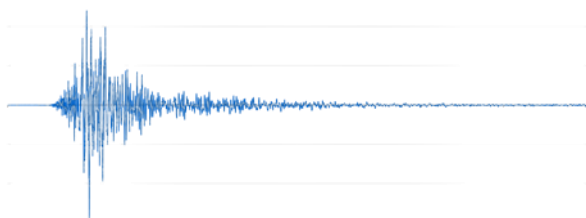
construir un documento de consulta de manera sencilla, que permita al lector (no necesariamente de la comunidad de los sismólogos, geólogos o de la ingeniería sísmica), que facilite el entendimiento y comprensión del profesional interesado de cualquier área del conocimiento; en el texto se encontrarán los diversos y diferentes términos y conceptos básicos de la temática; además le permitirá, estar al tanto de los avances en el estado del arte de la amenaza sísmica en Colombia.

En el texto se aborda desde una mirada como profesional y experto en gestión del riesgo y reducción de desastres; en ningún momento se pretende reemplazar el saber de los sismólogos, quienes son los encargados de generarlo. Los autores hemos realizado una recopilación de fundamentos conceptuales, definiciones, entre otros, con el propósito de entregarle al tomador de decisiones, gestor local y/o departamental del riesgo, elementos de juicio que les permitan interactuar con expertos y comprender el mensaje desde lo básico para dimensionar de manera apropiada, emprender acciones oportunas, pertinentes y acertadas en la reducción de sus consecuencias e impactos sobre la población, los sustentos de vida y lo físico construido, entre otros.

El libro contiene 4 capítulos en los cuales se hace una presentación de temas básicos asociados a la comprensión de la sismología. En los primeros dos se hace una conceptualización básica, partiendo de la aclaración de términos y definiciones, y posteriormente se lleva al lector a una sensibilización temática, recordando la historia con la relación de sismos significativos.

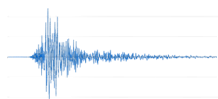
Los capítulos subsiguientes se adentran a la temática de la sismología con la definición de las diferentes fuentes sismogénicas, las ondas sísmicas y su representación, al igual los sistemas de medición de los sismos. También se les brinda a los tomadores de decisión asociada a la Gestión del Riesgo de Desastres, una información que les será de utilidad para la definición de estrategias encaminadas a la reducción del efecto de los sismos en sus respectivas jurisdicciones. Se tratan temas como Estimación de Amenaza Sísmica, Respuesta Sísmica de los Suelos y Microzonificación Sísmica de Ciudades, entre otros temas a tratar.



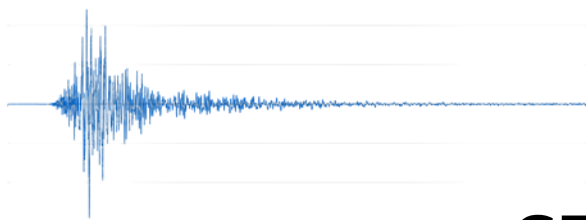


ÍNDICE

LOS AUTORES	i
DEDICATORIA	i
.....	1
INTRODUCCIÓN	1
ÍNDICE	3
.....	5
CAPÍTULO I	5
GENERALIDADES	5
1.1. PRESENTACIÓN	5
1.2. GLOSARIO	10
.....	23
CAPÍTULO II	23
CONCEPTOS BÁSICOS DE SISMOLOGÍA	23
2.1. ASPECTOS HISTÓRICOS DE LOS SISMOS Y LA SISMOLOGÍA	23
2.1.1. Historia a nivel global	23
2.1.1.1. Sismos más fuertes registrados	26
2.1.2. Historia a nivel de Colombia	28
2.1.2.1. Sismos más fuertes registrados en Colombia	30
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISMOS	31
2.3. ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA	32
2.4. DERIVA CONTINENTAL Y TECTÓNICA DE PLACAS	35
2.4.1. Teoría de la Deriva Continental	35
2.4.2. Tectónica de Placas	39
2.4.3. Movimiento de los límites de placas	41
2.4.3.1. Fallas	46
2.4.4. Teoría del Rebote Elástico	49



2.4.5.	Características y Naturaleza de los Sismos	50
2.5.	LOS SISMOS Y PROPAGACIÓN ONDULATORIA	51
2.5.1.	Ondas sísmicas	51
2.5.2.	Representación de las Ondas Sísmicas.....	52
2.6.	MEDIDAS DE LOS SISMOS	56
2.6.1.	Magnitud	57
2.6.1.1.	Escala de Richter	57
2.6.1.2.	Sismógrafos	58
2.6.2.	Intensidad.....	58
2.6.2.1.	Escala de Mercalli.....	59
2.6.3.	Diferencias y relaciones entre las escalas de magnitud e intensidad	60
2.6.4.	Efectos de los Sismos	61
CAPÍTULO III		67
3.1.	OROGENIA DE SURAMÉRICA	67
3.2.	OROGENIA DE COLOMBIA	69
3.2.1.	El sistema de cordilleras en Colombia.....	71
3.2.2.	Sistemas de fallas en Colombia y fuentes sismogenicas	72
3.2.2.1.	Subducción	73
3.2.2.2.	Fallas superficiales o corticales	76
CAPÍTULO IV		83
AMENAZA SÍSMICA		83
4.1.	CONCEPTO Y USO DE LA AMENAZA SISMICA	83
4.1.1.	Métodos de Evaluación de la Amenaza Sísmica	85
4.1.1.1.	Métodos Deterministas	85
4.1.1.2.	Métodos Probabilistas	88
4.2.	AMENAZA SISMICA PARA COLOMBIA.....	101



CAPÍTULO I. GENERALIDADES

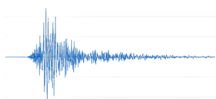
1.1. PRESENTACIÓN

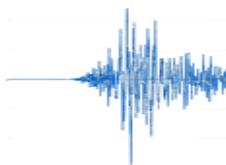
Desde los inicios de la historia de la humanidad, desastres asociados a origen naturales como sismos, erupciones volcánicas, movimientos de remoción en masa, inundaciones, avenidas torrenciales, sequías, entre otros, han influido en la existencia de la especie humana; de todos estos, los fenómenos menos comprendidos y que tienen gran capacidad destructora son los terremotos.

Entre los fenómenos naturales, uno de los más estudiados pero aún menos comprendidos y que tienen gran capacidad destructora son los terremotos, acorde al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), en los últimos 20 años se han producido en el mundo más de 3071 sismos con magnitudes superiores a 6.0 y con un total de 808.717 muertes, lo que equivale a un promedio anual superior 40.435 muertos por año, esta enorme cifra de víctimas deja en evidencia la gran capacidad destructora de los sismos (USGS, 2019).

Colombia no es ajena a la situación y realidad de estos eventos de origen natural, ya que, en las últimas décadas, el país ha sufrido situaciones adversas asociadas al riesgo sísmico, producto de la manifestación y materialización del mismo. Los terremotos de Tumaco en 1906 y 1979, Popayán del 31 de marzo de 1983, los sismos del Atrato Medio los días 17 y 18 de octubre de 1992, el terremoto de Páez en junio 6 de 1994 y el sismo del Eje Cafetero del 25 de enero de 1999 (Ramírez, 2004), dejaron como resultado importantes y significativas pérdidas y destrucción en lo tangible (vidas, viviendas e infraestructura) e intangibles (pérdida de confianza, la dignidad, la autoestima, la credibilidad, entre otras, las cuales que aún no se han valorado en toda su dimensión).

Para dar inicio a la comprensión de la Sismología Básica, cabe destacar que existen diversas formas o acercamientos a una definición de sismos o terremotos.



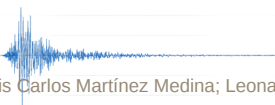


Un terremoto puede definirse como un movimiento ondulatorio generado por fuerzas en constante confusión bajo la capa superficial de la tierra (la litosfera), que viajan a través de la corteza terrestre. A partir del fenómeno físico, se puede abordar desde la vibración de la superficie de la tierra como resultado de una liberación de energía en la corteza terrestre, causada por repentinas rupturas de masas de la corteza, además de erupciones volcánicas o incluso explosiones creadas por los humanos. Como se ha manifestado previamente, durante un terremoto, se liberan enormes cantidades de energía; su tamaño y la severidad son estimados por dos parámetros importantes. La magnitud es una medida de la cantidad de energía liberada, mientras que la intensidad es el efecto aparente experimentado en un lugar específico.

Desde el punto de vista normativo, cabe aclarar, que los conceptos y apreciaciones emitidas por los autores están a la luz de la política nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, según se dispone por la Ley 1523 2012 (Diario Oficial - Ley 1523 GRD) y el Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente, NSR 10 (MINVIVIENDA. Comisión Asesora de la NSR, AIS, 2010).

Con el propósito de brindar un acompañamiento más asertivo a los gestores del riesgo y tomadores de decisión a nivel local y regional, en el desarrollo del texto se han elaborado una serie de cajas, a manera de notas de autor, donde se da respuesta a respuesta a algunas de las preguntas más frecuentes que han recibido los autores en sus capacitaciones a nivel de capacitaciones dirigidas a los Gestores del Riesgo sobre esta temática, estas cajas son denominadas “Preguntas y respuestas más comunes sobre terremotos”; de igual forma se presentan cajas de “Conceptos básicos” donde se dará claridad a algunos de los conceptos tratados en el desarrollo del mismo; y finalmente, se presenta una caja de “Videos recomendados” con el link de acceso que permitirá brindarle una mayor claridad audiovisual sobre los temas tratados en los diferentes capítulos.

A continuación, presentamos la primera caja de preguntas y respuestas



Comprendiendo la Sismología para Gestores del Riesgo



Preguntas y respuestas más comunes sobre terremotos

[1] ¿Qué son los terremotos?

Los sismos, temblores o **terremotos** son movimientos vibratorios, rápidos y violentos de la superficie terrestre, provocados por perturbaciones en el interior de la Tierra. Normalmente los gestores del riesgo asocian los terremotos eventos de mayores efectos destructivos.

[2] ¿Dónde ocurren los terremotos?

La mayoría de los terremotos ocurren **a lo largo del borde de las placas oceánicas y continentales**. La corteza terrestre (la capa externa del planeta) está formada por varias piezas, llamadas placas. Las placas debajo de los océanos se llaman placas oceánicas y el resto son placas continentales. Las placas se mueven por el movimiento de una parte más profunda de la tierra (el manto) que se encuentra debajo de la corteza; estas placas siempre chocan entre sí, se alejan unas de otras, o se cruzan; éstas generalmente se mueven a una lenta velocidad. Los terremotos usualmente ocurren cuando dos placas chocan o se deslizan entre sí.

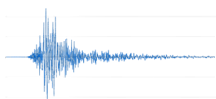
De igual forma, los terremotos también pueden ocurrir lejos de los bordes de las placas, **a lo largo de las fallas**. Las fallas son grietas en la tierra donde las secciones de una placa (o dos placas) se mueven en diferentes direcciones; éstas pueden ser por el choque o deslizamiento de las placas y son más comunes cerca de los bordes de las placas (Michigan Tech. UPSeis, 2017)..

[3] ¿Por qué ocurren los terremotos?

Los terremotos generalmente se producen cuando la roca subterránea se rompe repentinamente a lo largo de una falla. Esta liberación repentina de energía provoca las ondas sísmicas que hacen temblar el suelo. Cuando dos bloques de roca o dos placas se rozan, se pegan un poco. No solo se deslizan suavemente; las rocas se agarran unas a otras. Las rocas todavía se empujan unas contra otras, pero no se mueven. Después de un tiempo, las rocas se rompen debido a toda la presión que se acumula. Cuando las rocas se rompen, ocurre el terremoto. Durante el terremoto y después, las placas o bloques de roca comienzan a moverse y continúan moviéndose hasta que se atascan nuevamente (Michigan Tech. UPSeis, 2017).

[4] ¿Qué diferencias hay entre epicentro e hipocentro?

El lugar subterráneo donde se rompe la roca se llama foco o **"hipocentro"** del terremoto; por su parte, su proyección en superficie, justo encima del foco se conoce como **"epicentro"** del terremoto.



Comprendiendo la Sismología para Gestores del Riesgo

Preguntas y respuestas sobre terremotos

[5] ¿Se pueden predecir terremotos?

En la actualidad no existe metodología alguna, científicamente aceptada y que sea eficaz para predecir exitosamente la recurrencia o la fecha en que se puede producir un terremoto. Sin embargo, desde los avances en el conocimiento de las fuentes sismogénicas y sustentados en bases de datos del Servicio Geológico Colombiano y demás centros de investigación y observatorios sismológicos, se pueden evaluar los escenarios más probables, mapas de susceptibilidad y zonificación de amenaza sísmica, que permitan gestionar y reducir los riesgos de desastres asociados a este fenómeno natural (CCN - U. de Chile, s.f.).

[6] ¿Qué son las réplicas y por cuánto tiempo se pueden presentar?

Las **réplicas** son una serie de sismos menores que se produce en la misma región epicentral de un terremoto; estos temblores obedecen a una especie de “reacomodo” de la corteza terrestre, esto debido al desplazamiento que produjo el terremoto principal.

A pesar de que las réplicas son de menores magnitudes, en algunas ocasiones podrían presentarse sismos de magnitudes importantes, que pueden ocasionar el colapso de infraestructura dañada o deslizamientos de terreno en zonas debilitadas, tal como ocurrió con el Sismo del Quindío, el cual presentó una Magnitud del sismo principal $M_w = 6.1$ a las 13:19 horas, dejando seriamente resentidas algunas de las edificaciones de la zona epicentral, de las cuales un gran número de estas colapsaron con la réplica principal de las 17:40 la cual presentó una magnitud $M_w = 5.5$ (Servicio Geológico Colombiano, 1999).

[7] ¿Cómo se detectan los terremotos?

La propagación de las ondas generadas por los sismos ocasiona el movimiento del suelo por donde pasa; los registros de estos movimientos se realizan mediante el uso de equipos denominados **sismógrafos** o **acelerógrafos**, cuyo principio de operación se basa en la inercia de los cuerpos, y se da por una masa suspendida por un resorte que le permite permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al movimiento del suelo; al sujetar de la masa suspendida un lápiz que pueda pintar en un papel pegado sobre un cilindro que gira a velocidad constante, se obtiene así un registro del movimiento del suelo o sismograma. En la actualidad, equipos modernos utilizan este principio de operación, solo que para su implementación utilizan componentes mecánicos y electrónicos para obtener una señal eléctrica proporcional al movimiento del suelo, la cual puede almacenarse en forma local o ser transmitida por algún medio de comunicación (teléfono, radio, satélite) hasta un centro de adquisición (SSN México | Geofísica UNAM, 2016).

Preguntas y respuestas sobre terremotos

[8] ¿Qué diferencias hay entre magnitud e Intensidad?

La **intensidad** y **magnitud** corresponden a escalas que permiten medir tanto el tamaño como el impacto o efectos de los sismos.

La escala de **intensidad** se asigna en función a los daños o efectos causados a la infraestructura (las construcciones) y los pobladores. La escala de Intensidad o Mercalli es una evaluación cualitativa de la clase de daños causados por los sismos; por lo general sismos destructores van asociados a mayores intensidades, pero existen otros factores como la cantidad de energía liberada, la profundidad focal del sismo, la geología de la zona, la distancia a centros poblados, que pueden afectar esta percepción. Esta escala fue propuesta originalmente por Giuseppe Mercalli en 1.902 y posteriormente fue modificada en 1.923 por H. O Wood y F. Neumann, a partir de ese momento se conoce como "*Escala Modificada de Mercalli (MM)*" y consta de 12 grados de intensidad, denotados por números romanos de I a XII, donde I indica una sacudida poco perceptible y XII indica destrucción total; cabe anotar que a partir del grado IV hasta el VI aumenta la percepción de las personas, pero no se presentan daños, a partir del grado VII ya hay percepción por todas las personas y se advierten daños que son mayores en la medida que aumenta el grado (Gobierno de México, 2017).

La **magnitud**, por su parte, corresponde a una escala donde se obtiene de forma numérica a partir de registros obtenidos por sismógrafos y está relacionada con el *tamaño y la energía liberada durante la ocurrencia del terremoto*, la magnitud que originalmente se obtenía por la escala de Richter (la más conocida), actualmente se calculan otro tipo de magnitudes tales como la magnitud de onda coda (Mc), la magnitud de energía (Me), la de momento sísmico (Mw), entre otras. Cabe aclarar que la magnitud que se relaciona directamente con la energía liberada en forma de ondas sísmicas en su propagación por el suelo. Para el cálculo de la energía y la determinación de la magnitud de los sismos se realizan cálculos numéricos a partir de los registros de las estaciones sismológicas; en los sismogramas se mide la amplitud máxima de las ondas y la distancia a la que se encuentra la estación del epicentro, éstas variables permiten el cálculo de la magnitud (SSN México | Geofísica UNAM, 2016).

[9] ¿Por qué provocan daños los sismos?

Por lo general, los niveles de daños se asocian a sismos muy severos (de grandes intensidades), aunque en algunas ocasiones los daños pueden ser potencializados a una condición de vulnerabilidad de la estructura que está expuesta al sismo. Para ambas situaciones se presentan pérdidas económicas, físicas y hasta pérdidas de vidas humanas.

1.2. GLOSARIO

Con el propósito de dar claridad conceptual al lector, a continuación, se definen algunos términos que se usan en el desarrollo del libro. Dichos términos son extractados de Sitio Web del Servicio Geológico Colombiano, en el apartado correspondiente al “Glosario de Términos” (SGC, 2018) ⁽¹⁾ y de la “Serie Fascículos. Sismos” del Centro Nacional de Prevención de Desastres de México (CENAPRED, 2015) ⁽²⁾.

Acelerómetro: Instrumento que mide las aceleraciones producidas por un movimiento. En sismología se le utiliza principalmente para medir cuantitativamente la severidad del sacudimiento del suelo al paso de las ondas sísmicas por el punto de observación ⁽¹⁾.

Acelerógrafo: Instrumento que registra las aceleraciones producidas por un movimiento ⁽¹⁾.

Amplitud: Máxima amplitud de la cresta de una onda sísmica ⁽²⁾.

Amplificación sísmica: Crecimiento de las amplitudes de las ondas sísmicas frecuentemente observado en valles aluviales, asociado al efecto de sitio ⁽²⁾.

Ángulo Central: Ángulo cuyo vértice está en el centro de la tierra. Uno de sus rayos pasa a través del hipocentro (también del epicentro) y el otro pasa por la estación sísmica ⁽¹⁾.

Arreglos (Array): Sistema ordenado de sismómetros o geófonos, cuyos datos los recibe un receptor central ⁽¹⁾.

Atenuación: Disminución de la amplitud de las ondas sísmicas a medida que aumenta la distancia a partir de la fuente. Se debe esencialmente a la fricción interna de los materiales terrestres sujetos al paso de las ondas, a la distribución de la energía sísmica en un volumen cada vez mayor, a partir de la fuente, y a refracciones y reflexiones múltiples en diversas capas de la litósfera ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Glosario de Términos del Servicio Geológico Colombiano:

<https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx>

⁽²⁾ CENAPRED. (2015). Serie Fascículos. Sismos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, México D. F.

Cinturón o Franja sísmica: Zona prolongada donde hay actividad sísmica. Por ejemplo, el cinturón del Pacífico, el Mediterráneo, las Rocky Mountain en Estados Unidos. Alrededor del 60% de los terremotos ocurren en el cinturón sísmico del Pacífico ⁽¹⁾.

Centro de expansión: Extensa región donde dos placas están siendo apartadas una de la otra. Nueva corteza se forma conforme la roca fundida se levanta hacia arriba en la abertura dejada por las placas que se apartan. Ejemplos de esto incluyen la región Atlántica y al este de África ⁽¹⁾.

Constante sísmica: En los códigos de construcción se debe tomar en cuenta el comportamiento de amenaza sísmica. Estos valores de aceleración (en unidades de gravedad) que una construcción debe soportar se llama constante sísmica ⁽¹⁾.

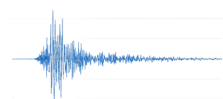
Corteza: La capa exterior delgada de la superficie de la Tierra, cuyo espesor promedio es de 10 kilómetros bajo los océanos y de 50 kilómetros bajo la corteza continental. Ésta es la única capa de la Tierra que los humanos realmente hayan visto ⁽¹⁾.

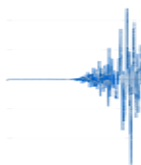
Deriva Continental: Teoría expuesta por Alfred Wegener en la que se decía que los continentes de la Tierra eran originalmente una masa de tierra que se fue separando y emigrando para formar los continentes ⁽¹⁾.

Deslizamiento: Movimiento abrupto de tierra y rocas en una pendiente en repuesta a la fuerza de gravedad. Los deslizamientos pueden ser ocasionados por un terremoto u otro fenómeno natural. Los deslizamientos bajo el mar pueden causar Tsunamis ⁽¹⁾.

Discontinuidad de Mohorovicic (el Moho): Superficie de frontera o la pronunciada discontinuidad de la velocidad sísmica, que separa la corteza terrestre del manto superior. Esta discontinuidad fue descubierta por el sismólogo Andrija Mohorovicic, de origen Croata ⁽¹⁾.

Distancia Epicentral: Distancia entre un observador y el epicentro de un sismo, medida sobre la superficie de la Tierra. Distancia medida o calculada sobre la superficie de la Tierra entre un punto de observación y el epicentro de un sismo ⁽¹⁾.





Distancia hipocentral: Distancia calculada entre el hipocentro sísmico y un punto sobre la superficie de la Tierra ⁽¹⁾.

Efecto de sitio: Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. En otras palabras, podría decirse que el efecto de sitio es aquella condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas sin que haya una correlación con la atenuación normal de la energía sísmica con la distancia ⁽²⁾.

Enjambre de terremotos (swarms): En algunas regiones. Se producen una serie de temblores que no están asociados con ningún terremoto mayor. A estas series se les llama "enjambres sísmicos". Estos son comunes en las regiones volcánicas, pero también suceden en otras regiones no asociadas a actividad volcánica ⁽¹⁾.

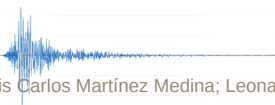
Epicentro: Punto exacto en la superficie que se localiza sobre el hipocentro de un sismo ⁽¹⁾.

Escala Modificada de Mercalli: La escala de Mercalli, fue modificada para adaptarse a las condiciones de Norte América. Es una escala compuesta por 12 niveles de intensidad que van desde los movimientos imperceptibles hasta los fuertes y destructores, y que son designados con números romanos. Esta escala no tiene una base matemática, sino que se clasifica mediante la observación de efectos ⁽¹⁾.

Escala de Richter: Sistema utilizado para medir la potencia (magnitud) de un terremoto. Fue propuesta por Charles Richter en 1935 como manera de clasificar los terremotos. Es una escala abierta por ambos lados, sin embargo, el terremoto más grande registrado hasta el momento alcanzó una magnitud de 9.5 correspondiendo a una ruptura del orden de 1000 km de longitud, 200 km de ancho con un desplazamiento promedio de 20 m. En el otro extremo de la escala, magnitudes negativas se logran en laboratorios con rupturas milimétricas ⁽¹⁾.

Estación sismográfica o sismológica: Sitio en donde uno o más sismógrafos son instalados con el fin de registrar ondas sísmicas ⁽¹⁾.

Falla: Superficie de contacto entre dos bloques que se desplazan en forma diferencial uno con respecto al otro. Se pueden extender espacialmente por varios



cientos de km y en forma temporal por varios millones de años. Una falla activa es aquella en la cual ha ocurrido desplazamiento en los últimos 2 millones de años o en la cual se observa actividad sísmica ⁽¹⁾.

Falla activa: Es una falla que presenta evidencias de desplazamiento o movimiento en el pasado geológico reciente, lo que significa que presenta actividad. La actividad de estas fallas causa sismos de muy variada magnitud ⁽¹⁾.

Falla de rumbo: Falla cuyo desplazamiento es predominantemente horizontal, lógicamente, a lo largo del plano de falla ⁽¹⁾.

Falla inversa: Falla de desplazamiento vertical con su plano en un ángulo igual o mayor de 45 grados, con respecto a la horizontal, en la cual el bloque colgante se encuentra movido hacia arriba con relación al bloque yacente. Es producto de esfuerzos de compresión ⁽¹⁾.

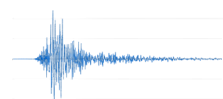
Falla normal: Falla de desplazamiento vertical con su plano en un ángulo igual o mayor de 45 grados, con respecto a la horizontal, en la cual el bloque colgante se encuentra movido hacia abajo con relación al bloque yacente. Es producto de esfuerzo de distensión ⁽¹⁾.

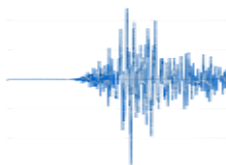
Frecuencia (de una onda): Número de ciclos por segundo. Se expresa en unidades llamadas Hertz. La frecuencia es el inverso del periodo ⁽²⁾.

Gal: Unidad de medida que representa la aceleración de un centímetro por segundo por segundo. En prospección geofísica se usa el miligal (0.001 Gal). El nombre de esta unidad de aceleración es en honor al astrónomo y físico Galileo ⁽¹⁾.

Geofísica: Parte de la geología que estudia la física terrestre. Ciencia que, basada en la física terrestre y en métodos matemáticos, estudia la cantidad y la calidad fenómenos magnéticos y sísmicos, y la estructura interior del planeta, la particular de un territorio con fines de prospección minera, cimentación de edificios, etc... ⁽¹⁾.

GAP: Región geográfica donde históricamente han ocurrido sismos destructores, donde no han vuelto a ocurrir sismos de magnitudes similares y muestran un nivel de actividad sísmica por debajo de lo normal en las últimas decenas o centenas de años ⁽²⁾.





Hipocentro o Foco: Punto en el interior de la Tierra, en el cual se da inicio a la ruptura que genera un sismo ⁽¹⁾.

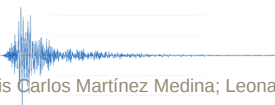
Hora de llegada: Momento en que una señal sísmica llega al detector ⁽¹⁾.

Hora o tiempo local: Tiempo que corresponde a una región en el globo terrestre de acuerdo a longitud geográfica con respecto al meridiano estándar de referencia: El Meridiano de Greenwich o París. Cada 15° de longitud corresponden a una hora de tiempo ⁽¹⁾. El Decreto 2707 de 1982 estableció el meridiano 74° como el referente para establecer la hora en toda Colombia, lo cual conduce a que la hora en Colombia es menos 5 horas con respecto al meridiano de Greenwich (Ministerio de Comunicaciones, 1982).

Hora o tiempo origen: Corresponde al momento en que se produce la relajación súbita de los esfuerzos, es decir, el momento en que se inicia la ruptura en el foco. Esta puede ser referida a la hora local u hora estandarizada universal (UTC) ⁽¹⁾.

Hora o tiempo Universal: Tiempo que corresponde al meridiano universal de referencia: Meridiano de Greenwich o París. Este tiempo, por convención internacional, se utiliza para la observación y descripción de todo fenómeno geofísico y astrofísico ⁽¹⁾.

Latitud, longitud del epicentro de un sismo: El epicentro de un sismo se describe como la intersección de 2 coordenadas geográficas. Las coordenadas geográficas son la latitud y la longitud, estas son tomadas desde la línea ecuatorial y el meridiano de Greenwich, la latitud va desde el ecuador hasta los polos geográficos de nuestro planeta, siendo positivo cuando nos dirigimos hacia el norte y negativo cuando nos dirigimos hacia el sur. La longitud por su parte va desde el meridiano de Greenwich, esta es una línea imaginaria trazada desde el polo sur al polo norte que pase por la ciudad de Greenwich en Inglaterra, esta se puede tomar como positiva si nos movemos hacia el ESTE o negativa si nos movemos hacia el OESTE. Tanto para la latitud como para la longitud se pueden medir los grados desde el ecuador o el meridiano de Greenwich de forma positiva y agregando al final cuál es su dirección, por ejemplo, podemos decir 15 grados Sur de Latitud y 20 Grados Oeste de longitud. Colombia se encuentra ubicada entre -82 y -66 grados de longitud y entre -4 y 13 grados de Latitud, también podemos decir que Colombia se encuentra entre 66 y 82 grados de longitud Oeste y entre 4 grados de latitud Sur y 13 grados de latitud Norte ⁽²⁾.



Profundidad de un sismo: La profundidad de un sismo es la medida desde la superficie de la tierra en el punto llamado epicentro hasta el punto exacto donde se produjo el sismo, llamado hipocentro. Esta medida es muy importante para los sismólogos, pues con ella se pueden determinar las características del sismo y su comportamiento en la superficie. Los sismos se pueden categorizar como cortical (sismos de profundidad superficial menores a 70 km), intermedios (sismos cuya profundidad está entre los 70 y 180 km) y profundos (profundidades mayores a 180 km) ⁽²⁾.

Intensidad: Medida de los efectos producidos por un sismo en personas, animales, estructuras y terreno en un lugar particular. Los valores de Intensidad se denotan con números romanos en la Escala de Intensidades de Mercalli Modificada (Wood y Neumann, 1931) que clasifica los efectos sísmicos con doce niveles ascendentes en severidad. La intensidad no sólo depende de la fuerza del sismo (magnitud) sino que también de la distancia epicentral, la geología local, la naturaleza del terreno y el tipo de construcciones del lugar ⁽¹⁾.

Intervalo de recurrencia: Tiempo aproximado entre los terremotos de un área específica y activamente sísmica ⁽¹⁾.

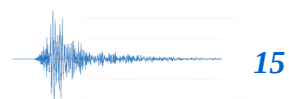
Isosistas o Línea de enlace sísmico: Línea que conecta puntos de la corteza terrestre en donde la intensidad de los terremotos es la misma. Generalmente es una curva cerrada alrededor del epicentro ⁽¹⁾.

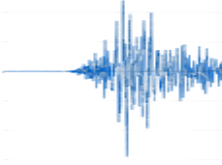
Licuefacción: Proceso por el cual un sólido (tierra) asume las características de un líquido como resultado de un aumento en la presión de los poros produciendo y una reducción en la tensión. En otras palabras, la tierra sólida se convierte en una especie de jalea ⁽¹⁾.

Límite de placa: Es el lugar donde dos o más placas se encuentran en la corteza terrestre ⁽¹⁾.

Llegada o arribo: La aparición de la energía sísmica en una estación sismológica ⁽¹⁾.

Magnitud: Es la medida de potencia de un terremoto o extracción de energía liberada por este, y determinada por la observación sismográfica. Este es un valor logarítmico determinado por la escala de Richter (1935). Un incremento de una unidad de magnitud (por ejemplo, desde 4.6 a 5.6) representa un incremento de 10 en la amplitud de onda en un sismograma, o aproximadamente un incremento de 30 en la energía acumulada. En otras





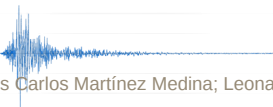
palabras, un terremoto de magnitud 6.7 alcanza 900 veces (30 veces 30) la energía de un terremoto de 4.7, o toma 900 terremotos de magnitud 4.7 para igualar la energía que alcanza uno de 6.7. Esta escala no tiene inicio ni límite. Sin embargo, la mecánica de rocas parece evitar temblores menores de un grado o tan grandes como de 9.5. Un sismo de magnitud -1 libera cerca de 900 veces menos energía que un sismo de magnitud 1. Con excepción de circunstancias especiales, los sismos con magnitud menor que 2.5 no son sentidos por los humanos ⁽¹⁾.

Magnitud Local (Ml): Este tipo de magnitud es conocida comúnmente como la “Magnitud o Escala de Richter” y se indica como Ml y es una de las magnitudes que reporta la Red Sismológica Nacional de Colombia. Esta magnitud fue desarrollada originalmente para California en 1935 por Charles Richter y se determina a partir del logaritmo de la amplitud de las ondas registradas en un sísmógrafo específico conocido como Wood-Anderson. Para su cálculo, se mide de la amplitud de las mayores ondas registradas, usualmente las ondas S, y se corrige por un factor que tiene en cuenta la atenuación debida a la distancia entre el observador y la fuente. Esta magnitud pierde precisión con sismos grandes por lo cual para este tipo de sismos se usa otro tipo de magnitudes como la magnitud de Momento (Mw) o de Energía (Me) ⁽²⁾.

Magnitud de Momento (Mw): Es una de las escalas más recientes desarrollada por Kanamori en 1977 y es una de las magnitudes que reporta la Red Sismológica Nacional de Colombia. Está basada en el cálculo del momento sísmico (Mo) del cual toma su nombre. El momento sísmico es una medida del tamaño de un sismo basada en el área de la ruptura de la falla, el promedio del desplazamiento de la misma y la fuerza necesaria para generar este movimiento. De esta forma el momento sísmico, y por lo tanto la magnitud de momento, representa de forma más directa y precisa la energía liberada en la fuente sísmica que otro tipo de magnitudes y es comúnmente usada para sismos grandes ya que no tiene los inconvenientes, para este tipo de sismos, que otras escalas de magnitud ⁽²⁾.

Manto: Capa de roca que se encuentra entre la corteza y el núcleo exterior de la tierra. Tiene aproximadamente 2900 kilómetros de espesor y es la capa más grande de la tierra ⁽¹⁾.

Microtremor: Movimiento continuo de la Tierra, que no está relacionado con un sismo y con un período de 1 a 9 segundos; es producido por una gran variedad de agentes naturales y artificiales ⁽¹⁾.



No sísmico (Asísmico): Que no tiene ninguna relación con movimientos sísmicos. También se le llama así al lugar o zona que no presenta récords de movimientos telúricos ⁽¹⁾.

Núcleo: La parte interna de la Tierra, se divide en núcleo interno y núcleo externo, el núcleo interno es sólido y tiene un radio de aproximadamente 1300 kilómetros. El núcleo externo es fluido y es de aproximadamente 2300 kilómetros de espesor, compuestos principalmente por Hierro (Fe) y Níquel (Ni) ⁽¹⁾.

Onda: Una alteración del equilibrio de un cuerpo o de un medio en el cual se propaga una perturbación de un punto a otro a través del medio con un movimiento recurrente continuo. Un movimiento oscilatorio manifestado por la subida y bajada de la superficie ⁽¹⁾.

Onda de Love: La mayoría de ondas superficiales que tienen un movimiento horizontal y que son transversales o de corte a la dirección de propagación. A.E.H. Love fue un matemático inglés que descubrió estas ondas ⁽¹⁾.

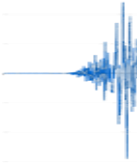
Onda expansiva o elástica: Onda que se propaga por una deformación importante y se hace elástica o sea, que se extiende. Esto se debe a un cambio en el contorno que desaparece cuando las fuerzas son removidas. Una onda sísmica es una especie de onda elástica ⁽¹⁾.

Ondas de cuerpo: Se le llama así a la onda que se propaga a través del interior de la tierra. Por ejemplo: las ondas P y S ⁽¹⁾.

Ondas P: Onda primaria, longitudinal, que no gira sobre sí misma, que empuja, presiona, se dilata, compresiona, es una onda que hala y empuja. La onda P son rápidas y llegan a las estaciones antes que las ondas S, u ondas secundarias. Estas ondas traen energía a través de la Tierra en forma longitudinal, moviendo partículas en una misma dirección, y sentidos por los humanos como un "bang" o un "thump" (zumbido) ⁽¹⁾.

Ondas Rayleigh: Tipo de onda superficial que se mueve en forma retrógrada y elíptica, similares a las causadas por una piedra que cae en una poza de agua. Son ondas con velocidad muy baja y se sienten como un movimiento ondulado o rodante. Son llamadas así en memoria de Lord Rayleigh, un físico inglés que predijo su existencia ⁽¹⁾.





Ondas S: Ondas secundarias, rotacionales, tangenciales, distorsionales o de corte. Viajan en forma transversal a la dirección de movimiento. Estas ondas llevan la energía a través de la tierra con un patrón complejo de ondas transversales; van viajando más despacio que las ondas P, normalmente en un terremoto tienen mayor amplitud que las ondas P. No viajan por fluidos, aire, agua o rocas fundidas, por lo tanto, no pueden viajar por el núcleo exterior, que es líquido ⁽¹⁾.

Periodo (de una onda): Intervalo de tiempo entre, por ejemplo, dos crestas o valles sucesivos. El período es el inverso de la frecuencia ⁽²⁾.

Placa (tectónica): Parte de la litósfera de la Tierra, grande y relativamente rígida, que se mueve en relación con otras partes de la litósfera sobre zonas más profundas del interior de la Tierra. Las placas chocan en zonas de convergencia y se separan en zonas de divergencia ⁽¹⁾.

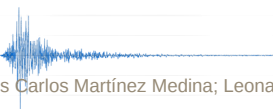
Plano de falla: Plano de falla. Superficie de contacto entre dos bloques rocosos con movimiento entre sí ⁽²⁾.

Predicción sísmica: Determinación del lugar, fecha y magnitud de un terremoto, junto con los respectivos rangos de error. Hasta ahora no se cuenta con un procedimiento que defina con seguridad estos tres parámetros ⁽²⁾.

Precursores o Premonitorios (Foreshock): En ciertos casos es posible observar algunos temblores pequeños con anterioridad al sismo principal. A éstos se les denomina precursores. Sin embargo, éstos no suceden con la suficiente regularidad como para ser utilizados a modo de predecir terremotos de mayor magnitud ⁽¹⁾.

Red instrumental: Grupo de instrumentos de registro sísmico distribuidos en un área determinada y que funcionan bajo una base de tiempo común. Se habla de una red local cuando ésta cubre un área de pocos kilómetros cuadrados, usualmente para monitorear objetivos específicos (p. ej. presas, zonas con enjambres sísmicos, etc.) Por otra parte, una red regional permite estudiar grandes extensiones territoriales como es el caso de aquella utilizada por el Servicio Sismológico Nacional ⁽²⁾.

Réplicas (Aftershock): Después que se produce un terremoto grande, es posible esperar que ocurran muchos sismos de menor tamaño, en la vecindad del hipocentro del sismo principal. A estos pequeños temblores se les denomina



réplicas. Algunas series de réplicas duran largo tiempo, incluso superan el lapso correspondiente a un año (para los eventos de Alaska 1964, Chile 1960). La zona que cubre los epicentros de las réplicas se llama "área de réplicas" y sus dimensiones, principalmente de las réplicas tempranas (uno a tres días de ocurrido el evento), son una indicación del tamaño de la falla asociada con el terremoto principal ⁽¹⁾.

Riesgo Sísmico: Producto de tres factores: El valor de los bienes expuestos (C), tales como vidas humanas, edificios, carreteras, puertos, tuberías, etc; la vulnerabilidad (V), que es un indicador de la susceptibilidad a sufrir daño, y el peligro (P) que es la probabilidad de que ocurra un sismo en un lugar determinado de cierta intensidad; así $R = C \times V \times P$. El grado de preparación de una sociedad determina la disminución de la vulnerabilidad y, en consecuencia, del riesgo ⁽¹⁾.

Sismo: Corresponde al proceso de generación de ondas y su posterior propagación por el interior de la Tierra. Al llegar a la superficie de la Tierra, estas ondas se dejan sentir tanto por la población como por estructuras, y dependiendo de la amplitud del movimiento (desplazamiento, velocidad y aceleración del suelo) y de su duración, el sismo producirá mayor o menor intensidad ⁽¹⁾.

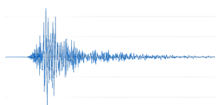
Sismógrafo: Instrumento que registra las ondas sísmicas ⁽¹⁾.

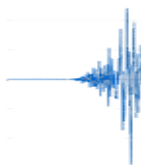
Sismograma: Registro hecho por un sismógrafo ⁽¹⁾.

Sismología: Disciplina de las ciencias geofísicas que tiene que ver con el estudio de los sismos y las propiedades elásticas de la Tierra. La ciencia de los sismos que estudia todo lo relacionado a su origen, fuerza, duración, distribución geográfica, recurrencia, impacto, etc ⁽¹⁾. Sus principales objetivos son ⁽²⁾:

- a) el estudio de la propagación de las ondas sísmicas en el interior de la Tierra a fin de conocer su estructura interna.
- b) el estudio de las causas que dan origen a eventos sísmicos
- c) la prevención de daños. La sismología incluye, entre otros fenómenos, el estudio de maremotos y marejadas asociadas (tsunamis) y vibraciones asociadas a erupciones volcánicas.

Sismólogo: Aquella persona que aplica los principios y procedimientos sismológicos a su trabajo ⁽¹⁾.

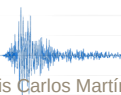




Tectónica de placas: Teoría que explica la dinámica de grandes porciones de la litósfera y su relación con la ocurrencia de sismos, volcanes y deformaciones corticales ⁽²⁾.

Tsunamis: Los terremotos muy grandes, cuyas zonas de ruptura están bajo el mar o en las cercanías de la costa, producen cambios de elevación en la superficie y el fondo oceánico. Estos cambios topográficos generan olas que se propagan a partir del epicentro y que pueden alcanzar alturas de varias decenas de metros sobre el nivel normal del mar. Estas olas se llaman "tsunamis", término derivado del japonés que significa literalmente ola de bahía. Este término es aceptado internacionalmente para designar marejadas producidas por impulsos en masas de agua y corresponde a lo que en Chile se denomina maremoto o salida de mar ⁽¹⁾.

Zonificación sísmica: Clasificación de un territorio en función de diferentes niveles de peligro derivados de la actividad sísmica. La distribución geográfica de las fuentes sísmicas, sus rangos de profundidad y de magnitud, así como la frecuencia de ocurrencia determinan esencialmente un cierto nivel de peligro. Una zonificación sísmica es empleada para orientar criterios de construcción sismorresistente, aunque no indica áreas con efectos de sitio. Cuando una clasificación de este tipo se lleva a cabo en un área específica, por ejemplo, un valle aluvial o área urbana, se le conoce como microzonificación sísmica. En ese caso sí se tiene una caracterización del efecto de sitio ⁽²⁾.



Comprendiendo la Sismología para Gestores del Riesgo

Conceptos Básicos

A manera de “notas de los autores” se dará claridad a algunos de los conceptos tratados en el desarrollo del capítulo.

[1] El término “**Sismo**” proviene del término griego “*Seísmo*”. Para efectos de definición, el término “*Sismo*” puede ser considerado sinónimo de “Terremoto” o “*Temblor de Tierra*”, lo cual corresponde a una serie de vibraciones de la superficie terrestre generadas por un movimiento brusco y repentino de las capas internas (corteza y manto). En el ámbito de los Gestores del Riesgo el término “*Sismo*” no va asociado a daños; a diferencia, los “*Terremotos*” por lo general se asocian a daños.

[2] La **sismología**, por su parte, es el estudio de la generación, propagación y medición de ondas sísmicas a través de la tierra y las fuentes que las generan. La palabra *sismología* se originó a partir de palabras griegas, “*seismos*” que significa terremoto y “*logos*” que significa ciencia. El estudio de la propagación de ondas sísmicas a través de la tierra proporciona la máxima información para la comprensión de la estructura interna de la tierra. Un estudio de ingeniería sísmica, por su parte, requiere una buena comprensión del proceso geofísico que causa los terremotos y sus diversos efectos sobre el terreno y su infraestructura.

[3] “**Licuefacción**” es un vocablo proviene del término inglés “*liquefaction*”. El término más adecuado a usar el de “*Licuación*” en virtud a que éste término se relaciona con el verbo “*licuar*”, similar al fenómeno que ocurre cuando una masa de suelo granular saturado es sometida a la vibración de un sismo, generando la reducción de la resistencia a los esfuerzos, perdiendo su firmeza y resistencia; situación ésta que puede generar subsidencias o asentamientos del suelo.

[4] “**Tsunami**” es una palabra japonesa, que proviene de “*tsu*” (bahía o puerto) y “*nami*” (ola). Para efectos de definición, los Gestores del Riesgo consideran como sinónimos el término “*Tsunami*” con “*Maremoto*”, sólo si este va asociado a actividad sísmica (situación que se estima en un 90% de los casos); en caso contrario, cuando estas olas van asociadas a actividad volcánica, meteoritos, o cualquier alteración que se produzca grandes deslizamientos marinos, solo se asume el término “*Tsunami*”.

Comprendiendo la Sismología Básica para Gestores del Riesgo

Videos recomendados

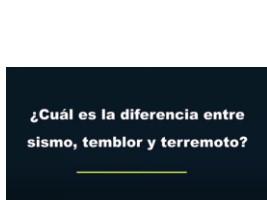
Video 1: Cuando un Terremoto Ocurre... ¿Dónde estarás? ¿Qué harás?



"Si vives en regiones propensas a los terremotos, no es cuestión de SI, sino de CUANDO ocurrirán estos eventos. No sabemos dónde estaremos cuando ocurra, pero podemos saber cómo protegernos cuando suceda ..."

IRIS Earthquake Science. (2019, Abril 30). Cuando un Terremoto Ocurre... ¿Dónde estarás? ¿Qué harás? (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 12 de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=-CdqVKYoOkw&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=>

Video 2: ¿Cuál es la diferencia entre sismo, temblor y terremoto?.



"Conoce la diferencia entre los términos sismo, temblor y terremoto y aprende a usarlos correctamente.

Es importante destacar que todos los movimientos de la tierra son sismos y consisten en una serie de vibraciones de la superficie terrestre generadas por un movimiento brusco y repentino de las capas internas (corteza y manto). Generalmente son provocados por disturbios tectónicos o volcánicos.

Un temblor es de menor magnitud, a comparación de un terremoto; incluso puede llegar a ser imperceptible. Para que un temblor se considere terremoto, tendría que generar daños y destrucciones."

Apaza, Norma. (2019, Julio). ¿Cuál es la diferencia entre sismo, temblor y terremoto? [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 12 de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=DQK-MbZZW0Y>

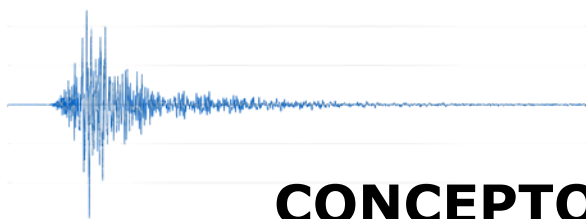
Video 3: ¡TERREMOTO! Sismo Inicial—Sismo Principal—Réplicas.



"Secuencia de Terremotos & El origen de la Ley de Omori.

A los mayores y grandes terremotos generalmente les siguen cientos o incluso miles de terremotos más pequeños, llamados réplicas, que ocurren a lo largo y adyacentes a la falla desplazada durante el gran terremoto. Con raras excepciones, todos los terremotos de magnitud 7 a magnitud 9 tienen una colección de réplicas de menor magnitud que pueden ocurrir durante semanas, años o incluso siglos después del sismo principal. Por otro lado, muchos terremotos mayores y grandes no tienen un sismo inicial antes del sismo principal. ..."

IRIS Earthquake Science. (2019, Octubre 30). ¡TERREMOTO! Sismo Inicial—Sismo Principal—Réplicas. (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 12 de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=E_6vkEOKVFI&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=35



CAPÍTULO II. CONCEPTOS BÁSICOS DE SISMOLOGÍA

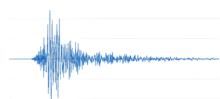
En los terremotos las ondas viajan desde la fuente hacia la superficie a diferentes velocidades, provocando vibraciones o movimientos telúricos, algunas veces percibidas por el Hombre y en la mayoría de los casos sólo percibida por instrumentación especializada. El tamaño y la severidad de los sismos son estimados por dos parámetros importantes: intensidad y magnitud. Como se ha manifestado previamente, la magnitud es una medida de la cantidad de energía liberada, mientras que la intensidad es el efecto aparente experimentado en un lugar específico.

Con la intención acercar a los gestores municipales y departamentales del riesgo a la comprensión de una sismología básica, en este aparte del texto, los autores han tratado de dar respuesta a una serie de preguntas, como: ¿dónde y por qué ocurren los terremotos?, ¿cómo se estudian?, ¿qué peligros traen al entorno físico natural y a la infraestructura?, antecedentes históricos de los sismos a nivel global y en Colombia, entre otros.

2.1. ASPECTOS HISTÓRICOS DE LOS SISMOS Y LA SISMOLOGÍA

2.1.1. Historia a nivel global

Al abordar el tema de la historia de los sismos se hace necesario remontarse a la historia misma de la humanidad, en ese sentido, aparecen registros de grandes movimientos del suelo desde hace cerca de 3.000 años provenientes de la China, así como en el Japón y oriente de Europa desde hace más de 1.500 años. Es un hecho que grandes pensadores y científicos de la antigüedad como Tales de Mileto, Anaxímenes de Mileto, Aristóteles, entre el periodo de los 585 años a. C. hasta el 340 a. C. escribieron sus primeras especulaciones académicas atribuyendo a casus naturales este tipo de eventos (Duncan Carr, 2020). Por su



parte, en la China en el año 132 d. C., Zhang Heng de la corte de la Dinastía Han inventa y presenta el primer sismógrafo del mundo; su réplica construida en el año 2005, puede detectar terremotos con la misma precisión que los instrumentos modernos (epoch-times, 2016); dicho artefacto se aprecia en la **Ilustración 1**:



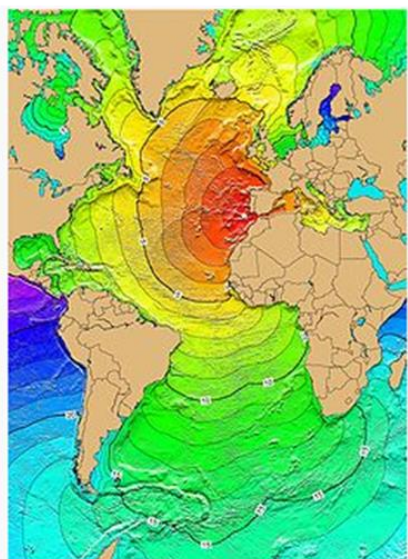
Ilustración 1. Réplica del antiguo sismógrafo chino
[Fuente: (epoch-times, 2016), a partir de Wikimedia Commons]

Para 1.664, Athanasius Kircher (un científico jesuita) propuso que los terremotos serían causados por el movimiento del fuego dentro de un sistema de canales que existiría dentro de la Tierra; por su parte en 1703, Martin Lister y Nicolás Lemery (científicos de origen inglés y francés, respectivamente) basaron su propuesta en que los terremotos serían causados por explosiones químicas dentro de la Tierra (Duncan Carr, 2020).

Uno de los hitos más importantes de la época se presentó en 1.795 con la ocurrencia del conocido “Gran Terremoto de Lisboa”, el cual se caracterizó por ser un evento de gran duración y de gran violencia, el cual le causó la muerte a un número aproximado a las 100.000 personas, además de las pérdidas en la infraestructura de esta ciudad (EIRD, 2007). Sobre este terremoto, cabe destacar que los sismólogos de hoy estiman una magnitud de momento (M_w) del mismo que oscila entre 8,2 y 9,0; se estima que su epicentro se presentó en el océano Atlántico a menos de 300 km de Lisboa; dicho evento fue seguido por un tsunami que afectó, además de Lisboa a algunas poblaciones de España y Marruecos (El Mundo, 2005). En la **Ilustración 2**

Terremoto de Lisboa de 1755

8,2-9,0 en potencia de Magnitud de Momento (M_W)



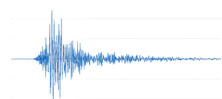
Epicentro y tiempo de llegada del tsunami

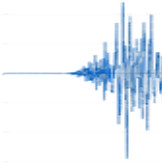
Fecha	1 de noviembre de 1755 (09:30-09:40)
Tipo	Terremoto submarino originado en la falla Azores-Gibraltar
Coordenadas del epicentro	36°N 11°O
Consecuencias	
Zonas afectadas	Portugal, España, Marruecos
Víctimas	Más de 100 000 muertos, 90 000 solo en Lisboa, más de 5000 en España, más de 10 000 en Marruecos.

Ilustración 2. Terremoto de Lisboa. Epicentro y tiempo de llegada el tsunami
[Fuente: (Wikipedia, 2019)]

El sismo de Lisboa coincide con una época de florecimiento de la ciencia en Europa, lo que despertó el interés específico de la comunidad científica habida de conocer; A partir de este momento se dan una serie de acontecimientos que permitieron fundar lo que es la sismología como ciencia (Duncan Carr, 2020):

- John Michel (cartógrafo estadounidense) en 1.761 determinó que “(...) *los terremotos eran ondas de movimiento causadas por «masas de roca que se mueven millas por debajo de la superficie» de la Tierra*” (Royal Academy of Berlin, s.f.).
- Robert Mallet (geofísico e ingeniero civil irlandés, considerado como uno de los fundadores de la ingeniería moderna) en 1.857, después de hacer una serie de experimentos con explosivos creó la que hoy conocemos como “sismología instrumental” y fue quien acuñó la palabra “seismology” (sismología en español).
- Emil Wiechert (físico y geofísico alemán) en 1897, estableció los cálculos teóricos que llevaron a establecer el modelo de la estructura interna de la





tierra, según el cual, ésta se conforma por un manto de silicatos que rodean un núcleo rico en hierro.

- Richard Dixon Oldham (sismólogo inglés) en 1906, identificó el arribo separado de las ondas P, las ondas S y las ondas de superficie en los sismogramas, y además encontró una evidencia clara de que la Tierra tiene un núcleo central.
- Harry Fielding Reid (sismólogo y glaciólogo estadounidense) en 1910, después de estudiar el terremoto de San Francisco de 1906, elaboró la “teoría del rebote elástico” que relaciona las fallas con los terremotos.
- Harold Jeffreys (matemático y geofísico británico) en 1926, fue el primero en descubrir que el núcleo de la Tierra está en estado líquido, basándose en su estudio sobre las ondas sísmicas.
- Inge Lehmann (matemática y sismóloga danesa) en 1937, determinó que dentro de ese núcleo líquido había un núcleo interno que era sólido, mientras que el núcleo externo sí era líquido.

Ya en los años 1960, el desarrollo de la “teoría de las placas tectónicas” unifica los conceptos en Ciencias de la Tierra, permitió comprender fehacientemente la causa de los terremotos al ubicarlos dentro de un contexto tectónico. Este tema será tratado a mayor extensión en este libro más adelante (ordinal 2.4.2, página 39).

2.1.1.1. Sismos más fuertes registrados

A continuación, se relacionan 10 de los eventos más fuertes que se han podido registrar hasta la fecha en el mundo, según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2019)

- Chile (Valdivia): Ocurrido en mayo 22 de 1960, con una magnitud Mw de 9.5, dejó entre 5.700 a 10.000 muertes y cerca de 2'000.000 de damnificados, este sismo se sintió en varios países de América y generó un tsunami que se propagó por el océano Pacífico, llegando a Hawái y Japón donde se reportaron miles de muertos y heridos.
- Indonesia (Sumatra): Ocurrido el 26 de diciembre del 2004, con una magnitud Mw de 9.3, dejó 229.866 muertes, por un tsunami que afectó diferentes islas de esta región del planeta.
- Estados Unidos (Anchorage, Alaska): Ocurrido el 28 de marzo de 1964, con una magnitud Mw de 9.2, dejó 128 muertes; se destaca que se produjo un levantamiento del suelo de hasta 11,5 m en 520 000 kilómetros cuadrados en el continente.



- Rusia (Península de Kamchatka): Ocurrido el 4 de noviembre de 1952, con una magnitud Mw de 9.0, dejó 22 muertes y daños materiales estimados cercanos a US\$1'000.000; se produjo un tsunami de 3,2 m que alcanzó las Islas Midway, Cocos, Hawái, Alaska y California, a unos 3000 Km de distancia del epicentro.
- Japón (Costa de Honshu): Ocurrido el 11 de marzo de 2011, con una magnitud Mw de 9.0, dejó 15.893 muertes, un tsunami que alcanzo a afectar a las costas de Rusia, Taiwán, Islas Midway, Hawái, Oregón, California, y México con cerca de 2 metros de altura. El terremoto tuvo graves efectos en la planta nuclear de Fukushima donde se alcanzó a presentar un accidente.
- Perú, hoy Chile (Arica): 13 de agosto de 1868, con una magnitud Mw de 9.0 dejó una cifra de 25.000 muertes en Perú y Chile, igualmente fue sentido en Bolivia y Produjo un tsunami que afectó gravemente algunas costas peruanas y que cruzó el Pacífico hasta llegar a costas de California y las islas del pacífico.
- Indonesia (Bengkulu, Sumatra): 24 de noviembre de 1833, con una magnitud Mw de 8.8 – 9.2, no se reportan muertes, pero si se formó un tsunami que afectó hasta las costas de África.
- Chile (Cobquecura, Ñuble): 27 de febrero de 2010, con una magnitud Mw de 8.8, se reportan 524 muertes, afectó principalmente a Concepción, Antofagasta y Los Lagos y se formó un tsunami. Se reporta además que El terremoto provocó que el eje de la tierra se desplazase aproximadamente 8 centímetros, acortando el día 1,26 microsegundos.
- Ecuador (Esmeraldas) – Colombia (Tumaco): 31 de enero de 1906, con una magnitud Mw de 8.8, dejando un número aproximado a las 1.000 muertes. Se produjo un tsunami que arrasó con Rio Verde (Ecuador) y las olas que llegaron a Tumaco (Colombia) alcanzaron alturas hasta de 5 metros, cruzaron el Pacífico hasta Hawái, Costa Rica, México y Japón.
- Estados Unidos y Canadá (California, Oregón, Washington y Columbia Británica) 26 de enero de 1700, con una magnitud Mw de 8.7, el tamaño de rotura de la falla se calculó en unos 1000 kilómetros con un deslizamiento de al menos 20 metros. El posterior tsunami impactó la costa este de Japón.

En la **Ilustración 3** se observa en forma gráfica este panorama.

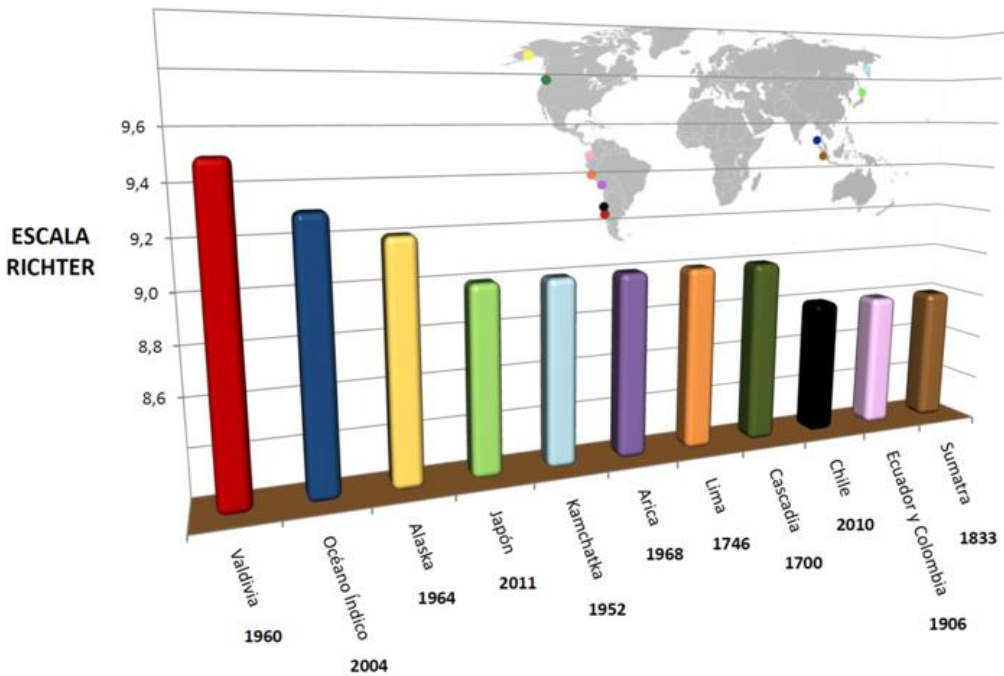


Ilustración 3. Terremotos de mayor magnitud en la historia.

[Fuente: (Wikimedia, 2018)]

Cabe resaltar, que a nivel de América Latina se resaltan algunos de los anteriores como de “Los 10 terremotos más potentes y mortíferos de la historia en América Latina” (BBC News, 2017) y en el cual recuerda los peores terremotos vividos en la historia de América Latina, en función de su magnitud y del balance de víctimas mortales, a parte de los de Chile de 1960, 1868 y 2010, el de Ecuador y Colombia de 1906, resalta uno de 8.7 de magnitud también en Chile el 8 de julio de 1730. Y dentro de los más mortíferos, en primera instancia ubica el de Haití de enero 12 de 2010 con 316.000 muertos, Perú de mayo 31 de 1970 con más de 66.000 muertos, Chile de enero 25 de 1939 con más de 24.000 víctimas fatales, Guatemala del 4 de febrero de 1976 con un saldo cercano a los 23.000 fallecidos, Nicaragua del 23 de diciembre de 1972 con más de 10.000 muertos, entre los más relevantes.

2.1.2. Historia a nivel de Colombia

Por su parte, en Colombia tenemos escritos que han permitido construir la historia sísmica del país, entre ellos destacamos el Boletín de estudios históricos,

Gutiérrez Villota, Arístides, 1932 (Enciclopedia de Desastres Naturales), El terremoto de Cúcuta de Luis Febres cordero (1926), Carta sismológica de Colombia de Francisco Javier Vergara y Velasco de la Enciclopedia de Desastres Naturales, Temblores que han azotado a Colombia de Ramón Correa, 1962, historia de los terremotos en Colombia del padre Jesús Emilio Ramírez y la historia sísmica de Colombia 1550 a 1830 del profesor Armando Espinosa Baquero (Espinosa B., 2004) y (Espinosa Baquero, 2012). En la se observan algunos documentos históricos que reflejan los inicios de la sismología en Colombia.



Ilustración 4. Documentos históricos de la sismología en Colombia
[Fuente: (Espinosa Baquero, 2012).]

Según Espinosa (2012), los siguiente son algunos de los acontecimientos más relevantes de la instrumentación sismológica en Colombia:

- 1923 – 1943: Primer sismógrafo en Colombia (Colegio San Bartolomé),
- 1943: Instalación de 3 nuevos sismógrafos,
- De los años 70 a 80: Se ponen en funcionamiento 4 nuevos sismógrafos en el país.
- 1993: Entra en operaciones la Red Sismológica Nacional de Colombia en INGEOMINAS (hoy SGC).

De igual forma Espinosa (2012), reporta seis (6) eventos históricos de impacto nacional en Colombia: Pamplona (1644), Popayán (1736), Santa Fé (1785), Honda (1805), Huila (1827) y Cúcuta (1875); pero además de éstos hace un énfasis especial en el sismo de Bogotá (Agosto 31 de 1917), de ésta Lisbeth Fog Corradine para el Espectador, citando al padre jesuita Jesús Emilio Ramírez en su libro Historia de los terremotos en Colombia Manifiesta “fue muy violento y duró algunos segundos” y agrega que “Durante diez días, la tierra se sacudió. Y

continuó el pánico” (El Espectador, 2017); al igual que Espinosa (2012) Fog (2017) señalan que para la zona aledaña a Bogotá se tienen registros de 44 y 74 sismos de interés por su nivel de daños; estos datos son de mucha relevancia a la hora de hacer unos análisis de recurrencia que permitan entender el panorama sismológico de la región.

2.1.2.1. Sismos más fuertes registrados en Colombia

Tomando como base la información del visor del Servicio Geológico Colombiano (SGC, Servicio Geológico Colombiano, 2019) se ha configurado la siguiente tabla en de los 30 sismos más fuertes ocurridos en el país, en función de su Magnitud (ver *Tabla 1*).

Tabla 1. Sismicidad histórica de Colombia

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO  Sismicidad Histórica de Colombia							
Grandes sismos de Colombia con intensidades mayores o iguales a 8 en Escala EMS-98							
No.	Fecha	Hora local	Area epicentral	Magnitud	Magnitud Tipo	Intensidad maxima	Escala
1	1906/01/31	10:36	Costa Pacífica, Pacífico	8.8	MW	10	EMS-98
2	1979/12/12	02:59	Costa Pacífica, Pacífico	8.1	MW	10	EMS-98
3	1958/01/19	09:07	Esmeraldas, Esmeraldas-Ecuador	7.6	MW	8	EMS-98
4	1976/07/11	15:41	Dariéacute;n, Dariéacute;n-Panamáacute;	7.3	MW	8	EMS-98
5	1979/11/23	18:40	Eje Cafetero, Colombia	7.2	MW	8	EMS-98
6	1991/11/19	15:28	Costa Pacífica, Pacífico	7.2	MW	8	EMS-98
7	2004/11/15	04:06	Bajo Baudó (Pizarro), Chocó	7.2	MW	8	EMS-98
8	1827/11/16	18:00	Altamira, Huila	7.1	MW	10	EMS-98
9	1974/07/12	20:18	Costa Pacífica, Pacífico	7.1	MW	8	EMS-98
10	1992/10/18	11:12	Murindó, Antioquia	7.1	MW	10	EMS-98
11	1938/02/04	21:23	Eje Cafetero, Colombia	7	MS	8	EMS-98
12	1967/02/09	10:24	Colombia, Huila	7	MW	10	EMS-98
13	1875/05/18	11:15	Cúcuta, Norte de Santander	6.8	MW	10	EMS-98
14	1961/12/20	08:25	Eje Cafetero, Colombia	6.8	MS	8	EMS-98
15	1967/07/29	05:24	Betulia, Santander	6.8	MW	8	EMS-98
16	1994/06/06	15:47	Páez (Belalcázar), Cauca	6.8	MW	8	EMS-98
17	1834/01/20	07:00	Santiago, Putumayo	6.7	MW	9	EMS-98
18	1917/08/31	06:36	Villavicencio, Meta	6.7	MW	9	EMS-98
19	1970/09/26	07:02	Bahía Solano (Ciudad Mutis), Chocó	6.6	MW	8	EMS-98
20	1976/04/09	02:09	Esmeraldas, Esmeraldas-Ecuador	6.6	MW	8	EMS-98
21	1644/01/16	05:00	Pamplona, Norte de Santander	6.5	MW	9	EMS-98
22	1766/07/09	16:00	Buga, Valle del Cauca	6.5	MW	8	EMS-98
23	1826/06/17	22:30	Úmbita, Boyacá	6.5	MW	8	EMS-98
24	1882/09/07	03:20	Colóacute;n, Colóacute;n-Panamáacute;	6.5	MW	9	EMS-98
25	1884/11/05	23:45	Hervey, Tolima	6.5	Mm	8	EMS-98
26	1962/07/30	15:18	Eje Cafetero, Colombia	6.5	MW	8	EMS-98
27	1995/01/19	10:05	Tauramena, Casanare	6.5	MW	8	EMS-98
28	1834/05/22	03:00	Santa Marta, Magdalena	6.4	MW	8	EMS-98
29	1885/05/25	15:05	El Tambo, Cauca	6.4	MW	8	EMS-98
30	1995/02/08	13:40	Calima (Dariéacute;n), Valle del Cauca	6.4	MW	8	EMS-98

* [Fuente: Adaptado de (SGC, Servicio Geológico Colombiano, 2019)]

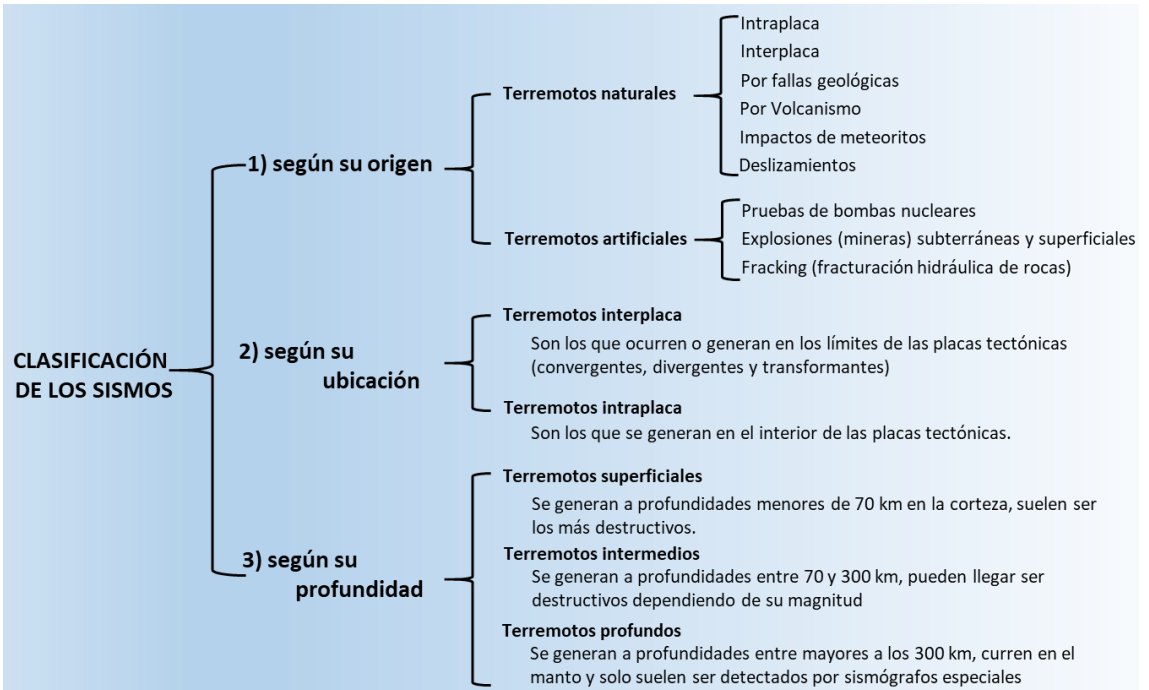


Ilustración 6. Clasificación de los Sismos. Según su origen, ubicación y profundidad
[Fuente: Los Autores]

En los temas subsiguientes se profundizará un poco por aquellos de origen natural, que como ya se conoce, en su mayoría van asociados a actividad tectónica y/o volcánica; sin embargo, para entender esta temática y a manera de preámbulo se trata la estructura interna de La Tierra y como desde su dinámica se asocian los diferentes fenómenos que causan los sismos.

2.3. ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA

La Tierra tiene un radio de aproximado de 6.371 km, aunque es aproximadamente 22 km más grande en el ecuador que en los polos. Por su parte, la densidad (definida como la relación masa / volumen), la temperatura y la presión aumentan con la profundidad en la Tierra.

En la estructura interna de la Tierra se diferencian principalmente tres capas concéntricas o cascos llamados “Geósferas”, conocidos como corteza, manto y núcleo, las cuales se diferencian en tres discontinuidades discontinuidades, a saber: Mohorovicic, Gutemberg y Lehman, en el presente aparte del libro se describen las mencionadas geósferas (ver **Ilustración 7**).

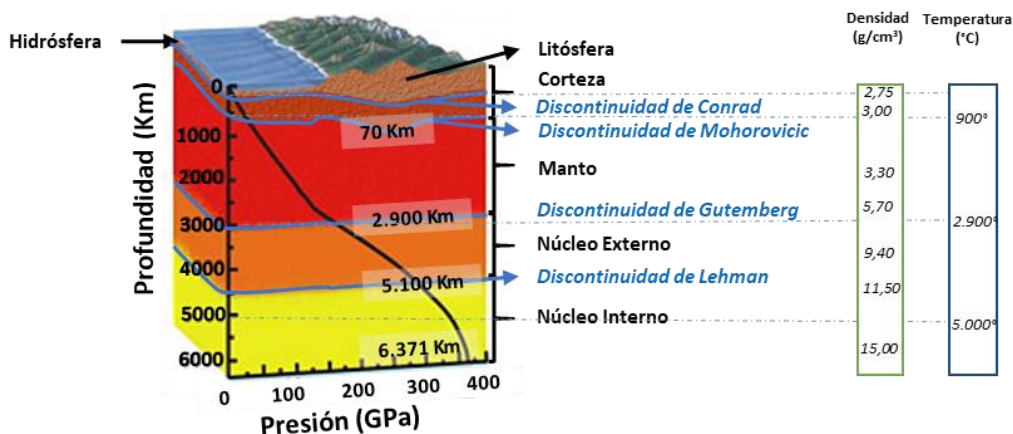


Ilustración 7. Estructura Interna de La Tierra
[Fuente: Los autores]

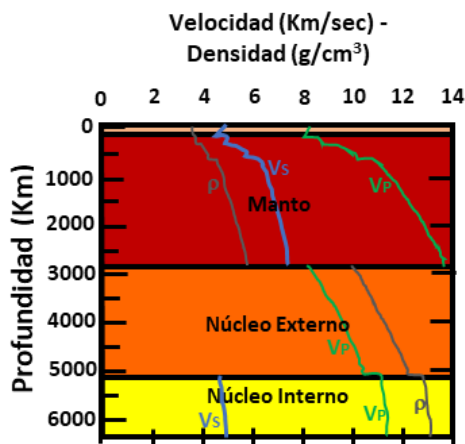
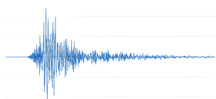
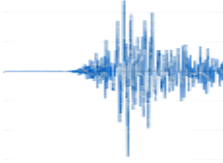


Ilustración 8. Variación de las Velocidades S y P, y la Densidad en función de la Profundidad en la Estructura Interna de La Tierra
[Fuente: Los autores]

Como se puede observar, en la **Ilustración 8**, atrás, en la medida en que se avanza en profundidad se da un incremento en la densidad (ρ) de los materiales, al igual que la Velocidad de las Ondas Primarias (V_p), por su parte, la Velocidad de las Ondas Secundarias (V_s), presentan un incremento en la medida que avanzan en Corteza y Manto, mientras que en el Núcleo Externo que se encuentra en Estado Líquido no hay propagación de éstas.

- Corteza:** Conocida como “Litósfera” corresponde a la capa más externa y delgada de la Tierra, se extiende hasta la **discontinuidad de Mohorovicic**, con una profundidad que varía entre 10 km y 70 km, disminuyendo a 5





km por debajo de los océanos. Constituye el 1,6% del volumen terrestre y el 1% de su peso. En comparación con las capas inferiores, esta capa tiene una alta rigidez y anisotropía. Su composición es heterogénea, donde se destacan el Oxígeno (O), el Silicio (Si), el Aluminio (Al), el Calcio (Ca) y el Hierro (Fe).

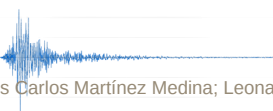
La Corteza terrestre se divide en: **Corteza continental** (con espesor variable entre 25 km y 70 km, está compuesta principalmente por rocas metamórficas, sedimentarias, volcánicas y graníticas, y ocupa el 47% de la superficie terrestre) y **Corteza oceánica** (con espesor entre 6 km a 12 km, está compuesta por rocas basálticas, principalmente).

- b) **Manto:** Se extiende hasta la **discontinuidad de Gutenberg**, desde los 70 km hasta los 2.900 km de profundidad, esta capa está compuesta de rocas densas y pesadas, principalmente de Silicio (Si), Hierro (Fe) y Magnesio (Mg). Constituye el 82% del volumen terrestre y su masa alcanza el 69% de la Tierra.

El Manto está dividido en dos partes: **Manto superior** (hasta los 1.000 km de profundidad, allí se localizan numerosos focos sísmicos) y **Manto inferior** (desde 1.000 km a los 2.900 km de profundidad).

- c) **Núcleo:** Centro de la Tierra, mucho más denso que la corteza y el manto. Se extiende desde los 2.900 km, hasta la **discontinuidad de Lehman** a unos 5.100 km hasta centro de la Tierra, a unos 6.378 km de profundidad. El Núcleo está compuesto por Hierro (Fe) y Níquel (Ni), principalmente; por su elevada densidad constituye el 16% del volumen y el 30% de la masa de la Tierra

El Núcleo de la tierra se divide en: **Núcleo externo** (Compuesto por Hierro y Níquel en estado líquido, y se extiende desde la **discontinuidad de Lehman** a los 5.100 km de profundidad) y el **Núcleo interno** (esfera sólida compuesta principalmente por metales pesados como el Hierro y Níquel, y se extiende hasta el centro a 6.378 km de profundidad).

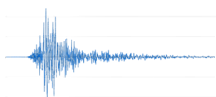


2.4. DERIVA CONTINENTAL Y TECTÓNICA DE PLACAS

2.4.1. Teoría de la Deriva Continental

En 1915 el científico alemán *Alfred Wegener* propuso la hipótesis de que los continentes habían formado una sola masa terrestre antes de separarse y llegar a sus lugares actuales. Este súper continente se rompió en varias piezas que formaban los continentes actuales; dichas piezas se han desplazado posteriormente a su posición actual. Aunque presentó muchas pruebas de la deriva continental, no pudo dar una explicación convincente de los procesos físicos que podrían haber causado esta deriva. Sugirió que los continentes habían sido separados por la pseudofuerza centrífuga de la rotación de la Tierra o por un pequeño cambio en el eje de rotación. A continuación se hace un detalle de la hipótesis propuesta por *Wegener* en el libro “*El origen de los continentes y los océanos*” **Ilustración 9:**

- a) En el **Período Pérmico** (se extendió desde hace 300 hasta 250 millones de años, siendo el último periodo de la *Era Paleozoica*) los continentes estuvieron unidos en un único continente llamado *PANGEA* (procedente de los vocablos del griego “*pan*” que significa todo y “*gea*” correspondiente a suelo o tierra, así su significado sería “toda la tierra”), el cual estaba rodeado por un océano llamado *PANTHALASSA* (vocablo griego que significa “*todos los mares*”, correspondiente al océano global que circundaba al Pangea desde finales del Paleozoico al inicio del Mesozoico.
- b) Para el **Período Triásico** (desde hace 252 hasta hace 200 millones de años, aproximadamente, se dividió en tres épocas principales: Temprano, Medio y Tardío), el *Pangea* se subdividió en dos grandes partes denominadas *LAURASIA* (al Norte) y *GONDWANA* (al Sur).
- c) Como se observa en la, más adelante, para el **Jurásico** (desde hace 200 millones de años hasta hace 145 millones de años y presenta tres épocas: el *Jurásico* temprano, el medio y el superior) y el **Cretácico** (periodo geológico que se extiende por 79 millones de años, desde el final del *Jurásico*, hace 145 millones de años, hasta el comienzo del periodo *Paleógeno* hace 66 millones de años); millones de años más tarde, estas placas en movimiento continuo se fueron diferenciando paulatinamente hasta lograr la configuración del planeta que hoy conocemos.



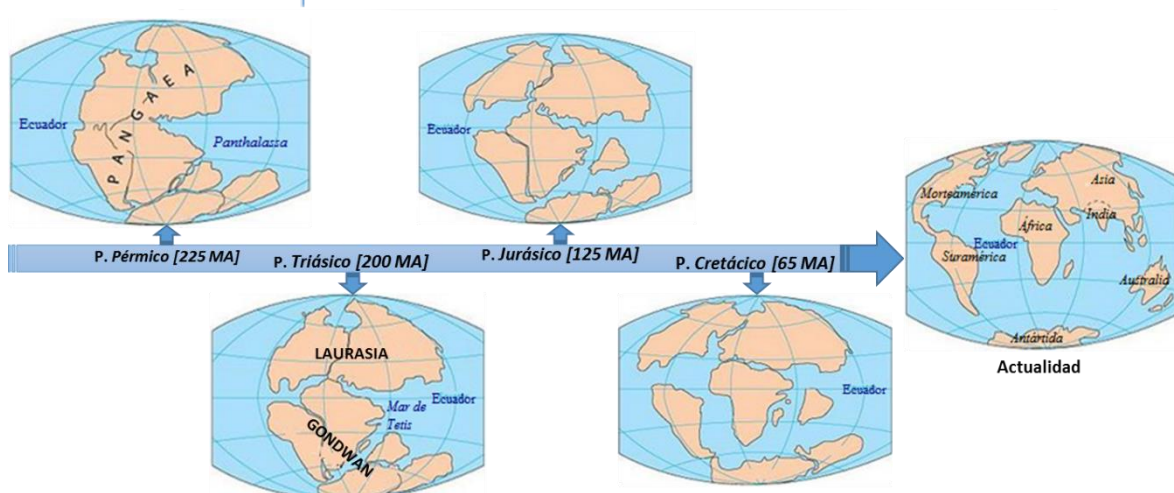
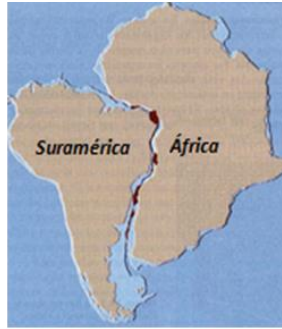


Ilustración 9. Línea de tiempo de la Deriva Continental de Wegener
[Fuente: Adaptado de (USGS, 1999)]

Esta teoría está basada en una serie de pruebas o argumentos que se resumen a continuación:

- Argumento Morfológico “Ajuste Continental”:** las formas de las costas de los continentes que hoy conocemos presentan un ajuste, tal es el caso del ajuste de Suramérica y África (*Ilustración 10*).
- Semejanza de Secuencias de Rocas y Cadenas Montañosas:** En la *Ilustración 10*, a la izquierda la posición actual de las Montañas Apalaches en Norteamérica y las Montañas de las Islas Británicas y Escandinavia, al Norte de Europa. A la derecha, una acomodación de las masas de tierra como en el PANGAEA o en LAURASIA, donde dichas cadenas montañosas forman un cinturón casi continuo.
- Evidencia Glacial o “Paleoclimática”:** Se da un desplazamiento de “Glaciales” conformados rocas y hielo del supercontinente meridional denominado GONDWANA hacia el polo Sur en lo que hoy conocemos como la Antártida (*Ilustración 11*).
- Argumento de Fósiles en Franjas Coincidentes:** En la *Ilustración 12*, se observa la presencia de evidencias fósiles de fauna y flora prehistóricas en franjas que coinciden en continentes de forma que presentan continuidad entre si al hacer el ejercicio gráfico de unirlos como en Pangea.
- Argumento Geológico:** se presenta una coincidencia en las estructuras geológicas a ambos lados de los continentes separados, se evidencia en corredores equivalentes con los mismos tipos y edades de las rocas (*Ilustración 12*).



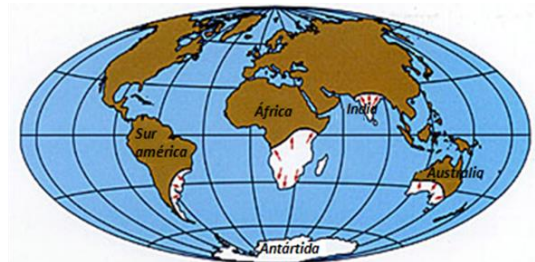
(a) Argumento Morfológico
"Ajuste Continental"



(b) Semejanza de Secuencias de Rocas y Cadenas Montañosas

Ilustración 10. Evidencias de Deriva Continental. (a) Argumento Morfológico o "Ajuste Continental": Se observa como encajan los litorales de Suramérica y África. (b) Semejanza de Secuencias de Rocas y Cadenas Montañosas: en el Atlántico Norte, principalmente, se muestra la evidencia de la unión de cordilleras.

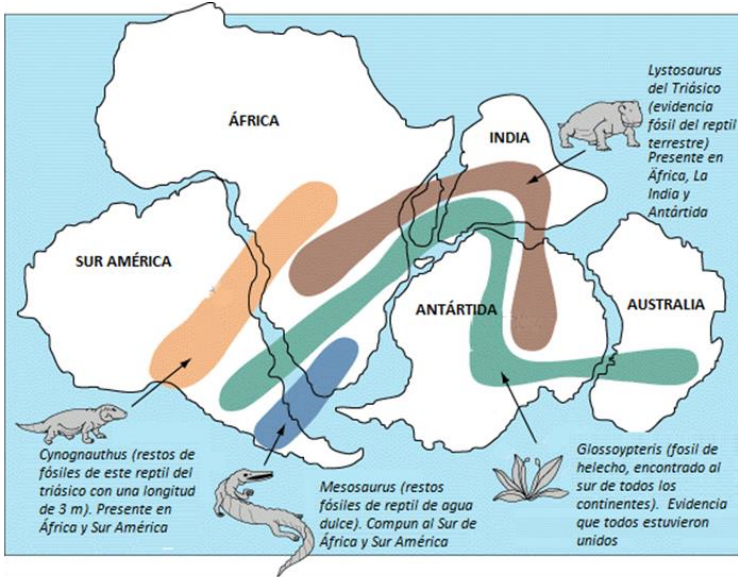
[Fuente: Adaptado de (NPTEL, 2013), a partir de (USGS, 1999)]



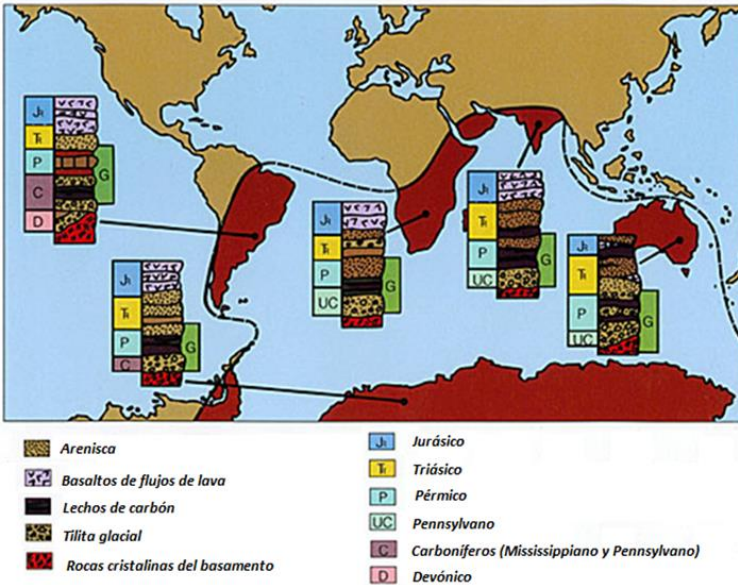
(c) Evidencia Glacial o "Paleoclimática"

Ilustración 11. Evidencias de Deriva Continental. (c) Evidencia Glacial o "Paleoclimática": Desplazamiento de "Glaciales" del Gondwana hacia la Antártida.

[Fuente: Adaptado de (NPTEL, 2013), a partir de (USGS, 1999)]



(d) Argumento Argumento de Fósiles en Franjas Coincidentes



(e) Argumento Geológico

Ilustración 12. Evidencias de Deriva Continental. (d) Argumento de Fósiles en Franjas Coincidentes: Fósiles de plantas y animales prehistóricos en franjas que dan continuidad a continentes correspondientes. (e) Argumento Geológico: Coincidencia de estructuras geológicas en los antiguos contactos de los continentes.

[Fuente: Adaptado de (NPTEL, 2013), a partir de (USGS, 1999)]

2.4.2. Tectónica de Placas

Esta teoría fue presentada por Robert Dietz, Bruce C. Heezen, Marie Tharp, Harry Hess, Maurice Ewing, Tuzo Wilson y otros, a principios de la década de 1960 y explica que la litósfera está dividida en siete segmentos grandes (y varios más pequeños) llamados placas. Se considera que la mayor parte superior de la tierra está dividida en dos capas con diferentes propiedades de deformación. La capa superior rígida, llamada **Litósfera**, como se ha dicho, está formada por costras y rocas rígidas de manto superior; la capa inferior, llamada **Astenósfera**, se extiende hasta unos 700 km de profundidad. La cáscara litosférica rígida se rompe en varias placas mayores de forma irregular y un gran número de placas menores o secundarias. Las placas litosféricas no son estacionarias, al contrario, flotan en un patrón complejo, con una velocidad de unos 2-10 cm/año sobre las rocas blandas de la Astenósfera subyacente como balsas en un lago.

Las placas *Africana*, *Americana*, *Antártica*, *Indo australiana*, *Euroasiática*, *Norteamericana* y *Pacífica* son consideradas como “*Placas Principales*” ya que poseen tamaño continental; aparte de esto, también existen varias placas más pequeñas como la *Cocos*, *Nazca*, *Filipina*, *Arábica*, *Escocesa*, *Juan de Fuca* y *Caribe*, sin conocidas como “*Placas Secundarias*”. A medida que la placa se desliza sobre la Astenósfera, los continentes y los océanos se mueven con ella. Debido a que las placas se mueven en diferentes direcciones, golpean contra sus vecinos en los límites; las grandes fuerzas así generadas en los límites de las placas construyen cadenas montañosas, causan erupciones volcánicas y terremotos. La mayor parte de la actividad geológica de la Tierra ocurre en los límites de las placas, las zonas donde las placas se encuentran e interactúan, como se muestra en la **Ilustración 13**.

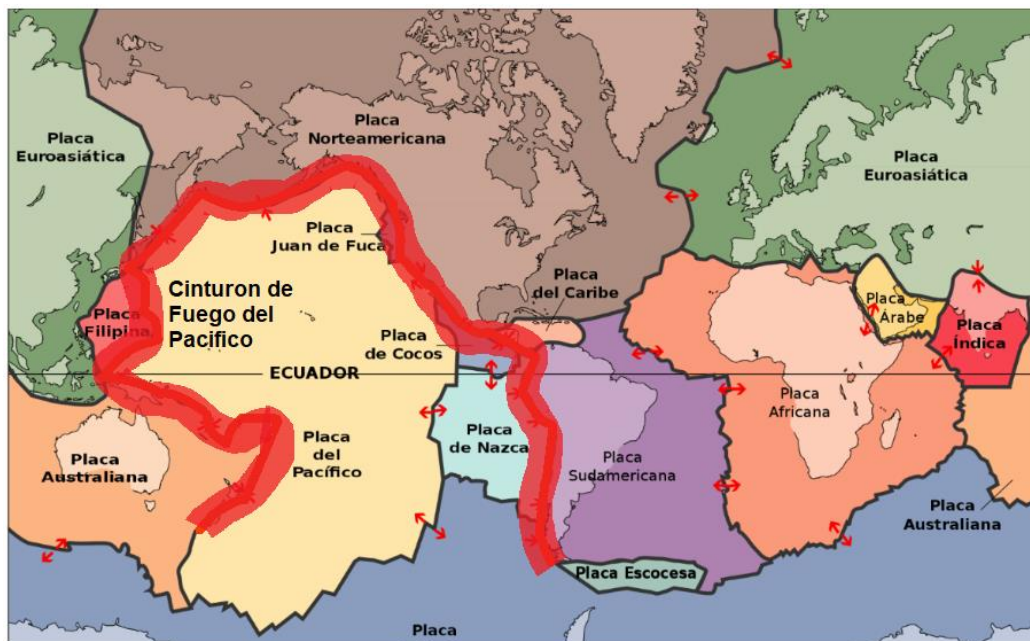


Ilustración 13. Mapa de placas tectónicas del mundo.

[Fuente: traducido al español por Wikimedia Commons (Wikimedia Commons, 2011), a partir de (USGS, 2006) y adaptado por los autores, resaltando el Cinturón de Fuego del Pacífico]

La teoría de **Tectónica de Placas** requiere una fuente que puede generar una fuerza tremenda que actúa sobre las placas. La explicación ampliamente aceptada se basa en la fuerza que ofrecen las **Corrientes de Convección** creadas por el comportamiento termomecánico del subsuelo terrestre. La variación de la densidad del manto con la temperatura produce un equilibrio inestable. La capa superior más fría y densa se hunde bajo la acción de la gravedad hasta la capa inferior más caliente, que es menos densa. El material menos denso se eleva hacia arriba y el material más frío a medida que se hunde se calienta y se vuelve menos denso (ver **Ilustración 14**). Estas corrientes de convección crean tensiones de cizallamiento en la parte inferior de las placas que las arrastran a lo largo de la superficie de la tierra.

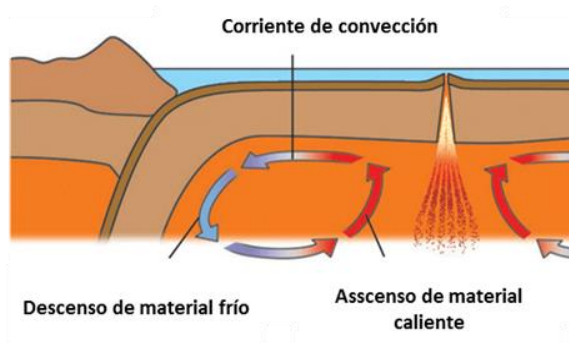
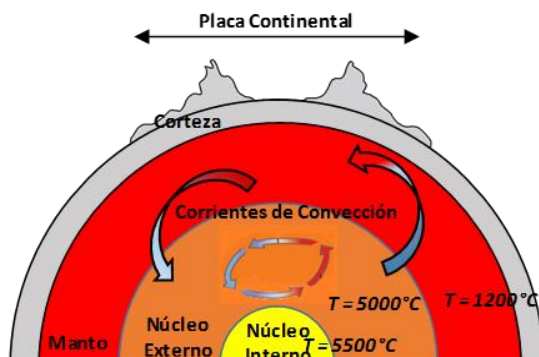
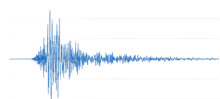


Ilustración 14. Corrientes de Convección.
[Fuente: Adaptado de (Duggal, 2013)]

2.4.3. Movimiento de los límites de placas

A la luz del conocimiento moderno se ha logrado la comprensión de cómo se mueven las placas y cómo se relacionan dichos movimientos con la actividad sísmica. La mayor parte del movimiento se produce a lo largo de zonas estrechas entre placas donde los resultados de las fuerzas tectónicas son más evidentes. En la **Ilustración 15**, anterior, tomada de (USGS, 1999), se observa una representación de los Límites de las Placas Rígidas, diferenciando el *Límite divergente* o “*bordes constructivos*” (A), *Límite convergente* o “*bordes destructivos*” (B), y el *Límite de falla transformante* o “*bordes pasivos*” (C).



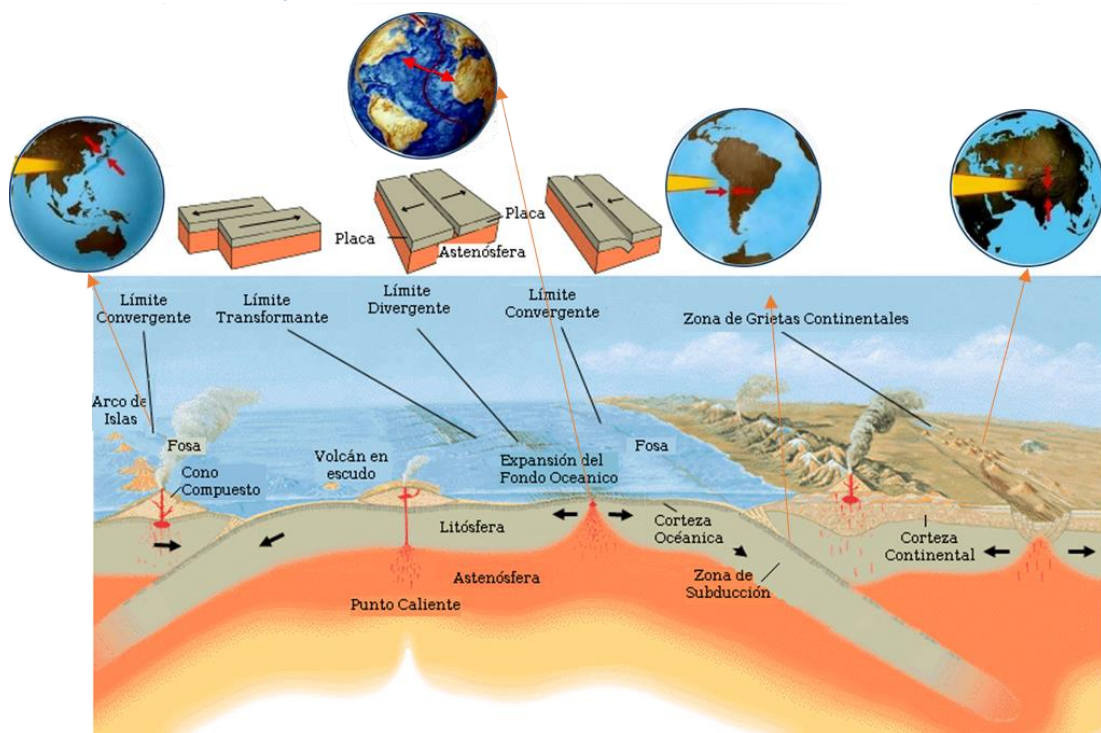


Ilustración 15. Representación de los Límites de las Placas Tectónicas.

[Fuente: adaptado por los autores de la traducción al español por (Wikimedia Commons, 2005) de (USGS, 1997)]

- a) **Límites divergentes:** conocidos como “*bordes constructivos*” y corresponde a la separación o “*divergencia*” de las placas de la litósfera, en estos se genera una nueva litósfera oceánica. Los límites divergentes coinciden con las **Dorsales Oceánicas** (situadas en el centro de los océanos, que corresponden a grandes cadenas montañosas submarinas de miles de kilómetros de longitud y alturas que oscilan entre los 1.500 m y 2.000 m) y los **Valles de Rift** (los “*Rift-Valley*” corresponden a la parte central de la dorsal que se encuentra hundida formando un surco lleno de fracturas).
- b) **Límites convergentes o de Convergencia:** conocidos como “*bordes destructivos*” y corresponde a zonas donde las placas se aproximan y empujan, destruyendo la litósfera oceánica. Por lo general se encuentran ubicados cerca de los bordes de los continentes.

Los límites divergentes coinciden con las **Zonas de Subducción**, regiones en las que una *Placa Oceánica*, más densa, “Subduce” o se introduce por debajo de otra *Placa Continental u Oceánica*. Las Zonas de Subducción coinciden con fosas marinas de profundidades mayores que alcanzan hasta los 11 km; en estas zonas, debido a los enormes empujes y roces que sufren las placas que subducen se producen numerosos terremotos y volcanes, los cuales se asocian a la formación de arcos de islas y la formación de cordilleras, como en el caso de la *Cordillera de Los Andes*, formada al hundirse la Placa Oceánica del Pacífico por debajo de la Placa Continental Suramericana dando origen a numerosos movimientos sísmicos; de igual forma, la *Placa Nazca* al hundirse en el manto se funde y el magma tiende a salir en la cadena montañosa, dando origen a la cadena volcánica de los Andes. En la **Ilustración 16**, Adaptado de (Universidad de Tulane, 2018)], se presentan las dos formas de Zonas de Subducción descritas: Convergencia Océano – Océano y B. Convergencia Océano - Continente.

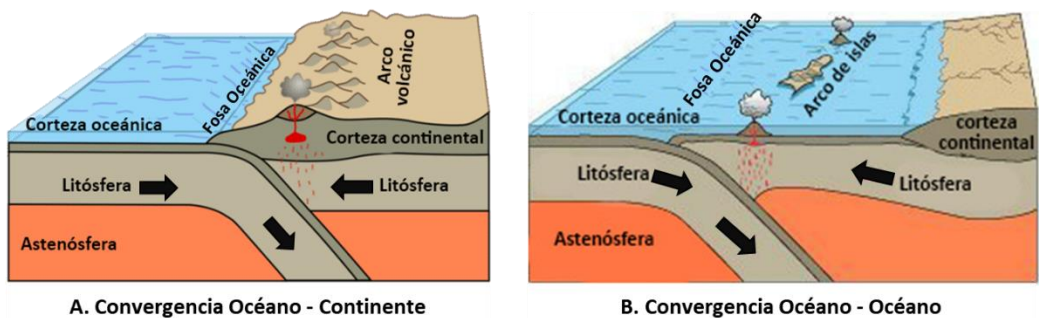
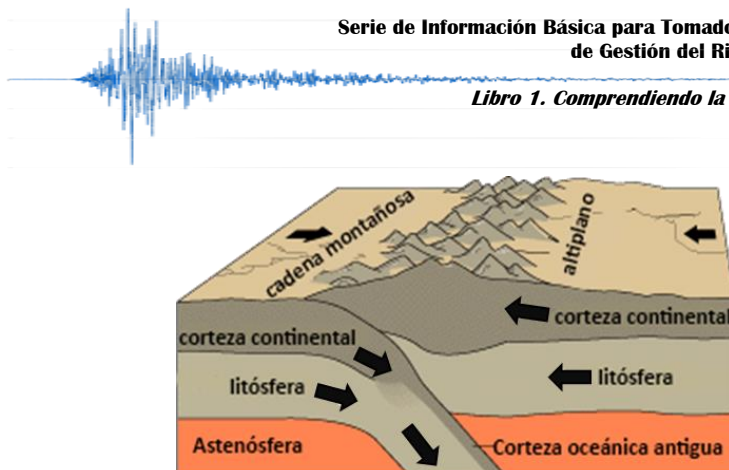


Ilustración 16. Zonas de Subducción, se presentan A. Convergencia Océano – Continente y B. Convergencia Océano - Océano.

[Fuente: Adaptado de (Universidad de Tulane, 2018) y (NPTEL, 2013)]

Cabe anotar que parte de las **Zonas de Obducción** corresponden a Áreas de Colisión entre continentes, dando origen a cadenas montañosas, como es el caso de la Cordillera del Himalaya, formada hace 50 millones de años, durante la era terciaria, como resultado del choque de la India y el Sur de Asia (Ver **Ilustración 17**).



C. Convergencia Continente - Continente

Ilustración 17. Zonas de Obducción, se presentan C. Convergencia Continente - Continente.

[Fuente: Adaptado de (Universidad de Tulane, 2018) y (NPTEL, 2013)]

- c) **Límites transformantes:** conocidos como “*bordes pasivos*”, corresponden a lugares donde no se crea ni se destruye la litósfera. En estos desplazamientos, que pueden alcanzar miles de kilómetros, las placas se deslizan lateralmente, una respecto a la otra. Estas fallas de transformación constituyen zonas de frecuentes y poderosos sismos, se conocen la *Falla de San Andrés* en California, USA, la cual se del límite entre la Placa del Pacífico y la Placa de América del Norte.

Por lo general los terremotos que ocurren en el límite de una placa se conoce como *Terremoto entre placas*; sin embargo, no todos ocurren en estos límites, aunque la porción interior de una placa tectónicamente silenciosa, los terremotos también ocurren lejos de estos límites, los cuales se conocen como *Terremotos Intraplacas*; como el caso de la zona de sismos intraplaca de Nueva Madrid en la zona céntrica de los Estados Unidos en los límites entre Arkansas, Missouri y Tennessee, el tiempo de recurrencia de este tipo de terremotos es mucho más largo que el de los terremotos entre placas.

Cabe hacerse notar que, a nivel como resultado de Global, a lo largo de las costas del Océano Pacífico (pasando por las costas de las Américas, desde el Sur, Centro y Norte; y continuando por las costas de Asia Oriental, Australia y Nueva Zelanda), en forma de herradura y por una longitud mayor a los 40.000 km, y asociada a las zonas de subducción se ha generado una zona de intensa actividad sísmica y volcánica denominada “*Cinturón de Fuego del Pacífico*”. En esta zona, el lecho del Océano reposa sobre Placas Tectónicas, las cuales permanecen en constante fricción y acumulación de energía, movimiento y colisión de las capas, la cual es el origen de un sinnúmero de terremotos y actividades volcánicas que

afectan a los países aledaños a dicho cinturón; de hecho en esta zona se encuentran el 75% de los volcanes activos e inactivos del planeta y es donde se presentan aproximadamente el 90% de todos los sismos del mundo, destacándose además, que el 80% de los terremotos (o sismos destructivos) ocurren en esta zona; en la **Ilustración 13** (atrás), esta zona se encuentra resaltada.

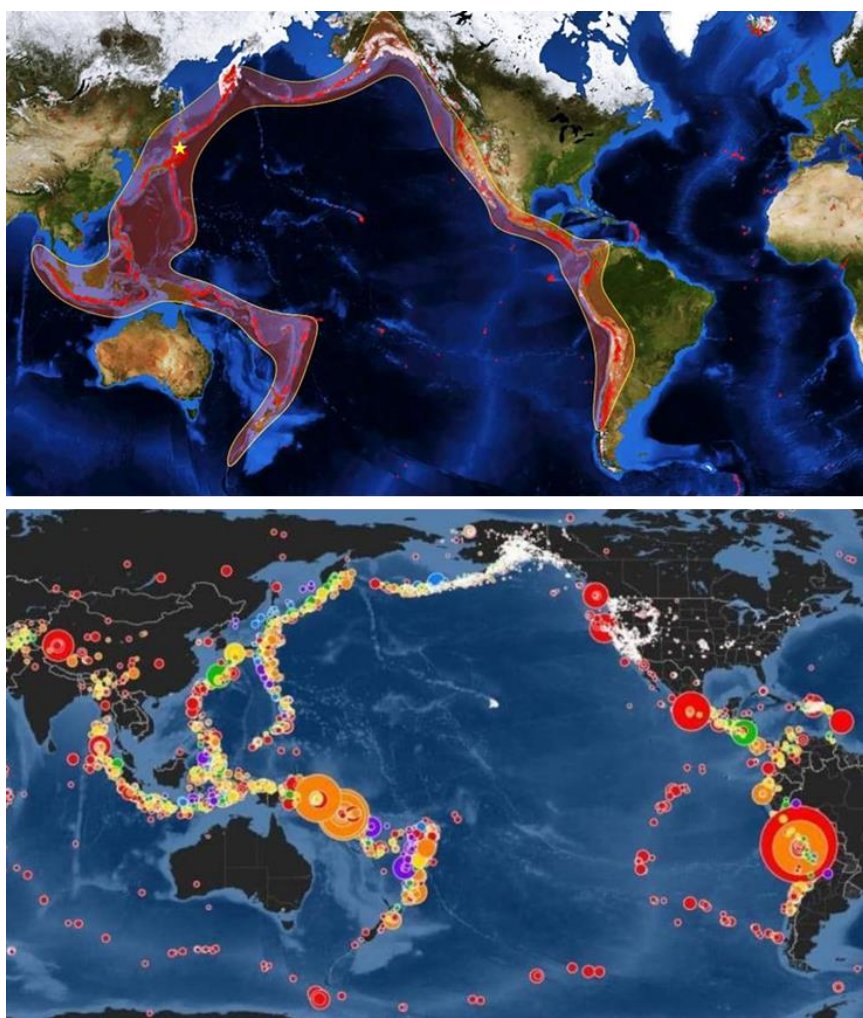
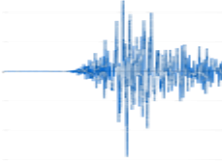


Ilustración 18. Cinturón de Fuego del pacífico y Sismos asociados.

[Fuente: adaptado de traducción al español por (Wikimedia Commons, 2005) de (USGS, 1997), para el gráfico superior, y de (El Objetivo, 2019), para el gráfico inferior]

Cabe hacerse notar que, a nivel como resultado de Global, a lo largo de las costas del Océano Pacífico, en forma de herradura y por una longitud mayor a los 40.000 km, y asociada a las zonas de subducción se ha generado una zona de intensa actividad sísmica y volcánica denominada “Cinturón de Fuego del Pacífico”. En



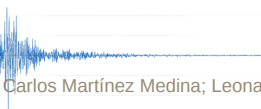
esta zona, el lecho del Océano reposa sobre Placas Tectónicas, las cuales permanecen en constante fricción y acumulando energía, la cual es el origen de un sinnúmero de terremotos y actividades volcánicas que afectan a los países aledaños a dicho cinturón, esta zona se encuentra resaltada en la **Ilustración 13** (atrás), de igual forma en la **Ilustración 18**, a continuación se hace una representación de los sismos asociados al Cinturón, donde el tamaño de la circunferencia en la zona epicentral se relaciona con la liberación de energía (magnitud) y los daños (intensidad) generados por éstos.

2.4.3.1. Fallas

El término “Falla” se utiliza para describir una discontinuidad dentro de la masa rocosa, a lo largo de la cual el movimiento había ocurrido en el pasado; los límites de las placas también son considerados como tipos de falla. Los lineamientos son características superficiales lineales cartográficas y pueden reflejar fenómenos del subsuelo; de igual forma, un lineamiento puede ser una falla, una unión o cualquier otro fenómeno geológico lineal. A la *Zona de Ruptura*, denominada “Plano de Falla” se asocian otras estructuras ocasionadas por la falla tales como: *brecha de falla, zona de cizalla, estrías de falla, bloque colgante, bloque yaciente*.

La mayoría de las fallas producen desplazamientos repetidos a lo largo del tiempo geológico. El movimiento a lo largo de una falla puede ser gradual o a veces repentino, generando así un terremoto.

Existen dos parámetros asociados con la descripción de las fallas, a saber, *buzamiento* y la *dirección de la rotura* (Ver **Ilustración 19**). La rotura se da en la dirección de una línea horizontal en la superficie de la falla; el buzamiento, por su parte, medido en un plano vertical perpendicular a la caída de la falla, es el ángulo del plano de falla con la horizontal. La pared colgante de una falla se refiere a la superficie de la roca superior a lo largo de la cual se ha producido el desplazamiento, mientras que la pared del pie es el término que se da a la de abajo.



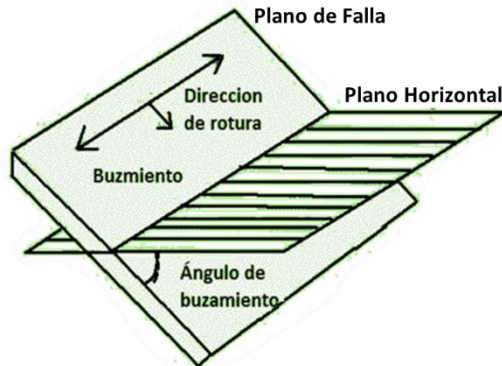


Ilustración 19. Terminología asociada con el plano de ruptura de una falla.
[Fuente: Adaptado (NPTEL, 2013)]

En la **Ilustración 20** se presenta la *Clasificación de las Fallas* según el movimiento de los bloques que son separados por esta.

- a) La **Falla Normal** también conocida como **trasversal de buzamiento** se presenta cuando el bloque que se encuentra encima de la falla (*bloque colgante*) se desplaza hacia abajo con respecto al bloque inferior (*bloque fijo*). Cabe resaltar que el movimiento de *falla natural* es causado por *fuerzas de tensión*, según se observa en la parte A de la **Ilustración 20**.
- b) En una **Falla Inversa**, por su parte, se presenta cuando el bloque superior de la falla (*bloque colgante*) se mueve hacia arriba con respecto al bloque inferior (*bloque fijo*). Según se puede observar en la parte B de la **Ilustración 20**, para este caso, también se forma en un plano inclinado causado por *fuerzas a compresión*.
- c) Una **Falla** se define como **de Rumbo** cuando el desplazamiento es horizontal y paralelo al rumbo de la falla. Esta falla también se conoce como de choque y deslizamiento. Ver parte C de la **Ilustración 20**.
- d) La **Falla es Oblicua o Mixta** se presenta cuando el desplazamiento es oblicuo tanto al rumbo como a la dirección del buzamiento. En la parte D de la **Ilustración 20** se sugiera que esta falla es causada por la combinación de fuerzas tensión y cortante de tipo compresional

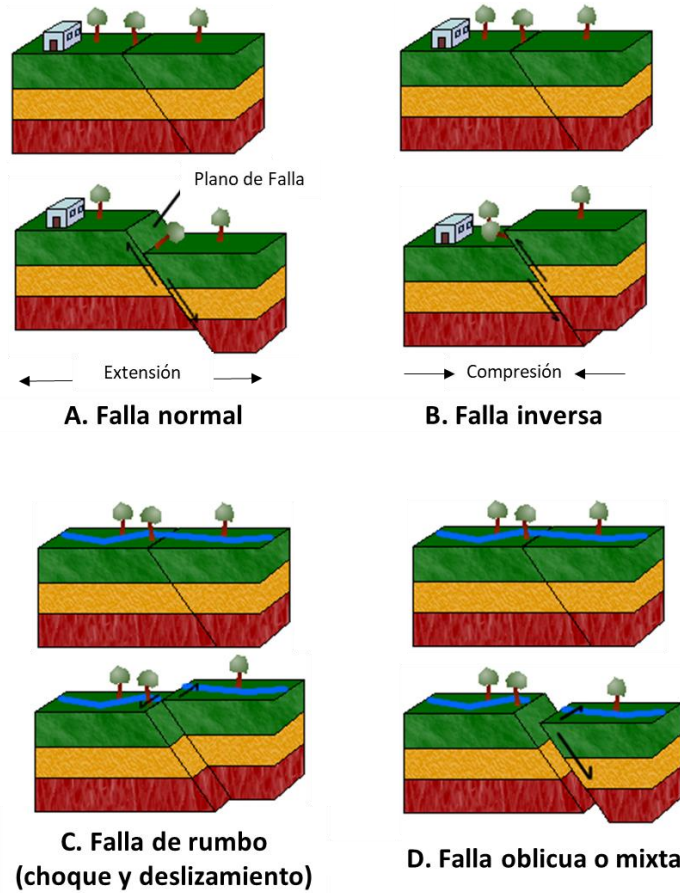


Ilustración 20. Tipos de fallas: A. Falla Normal. B. Falla Inversa. C. Falla de Rumbo. D. Falla Oblicua o Mixta (En los gráficos, las flechas muestran la dirección del desplazamiento relativo).
[Fuente: Adaptado de (IRIS, 2019)]

En ese orden de ideas, en condiciones de equilibrio, los rozamientos entre las placas se mantienen estáticas; por su parte, en la medida en que la energía de presión se acumula en un punto de fricción en la profundidad. Por su parte, cuando dicho equilibrio se rompe, las placas se desplazan y esa energía potencial acumulada se convierte en energía cinética, momento en el que se presentan los terremotos.

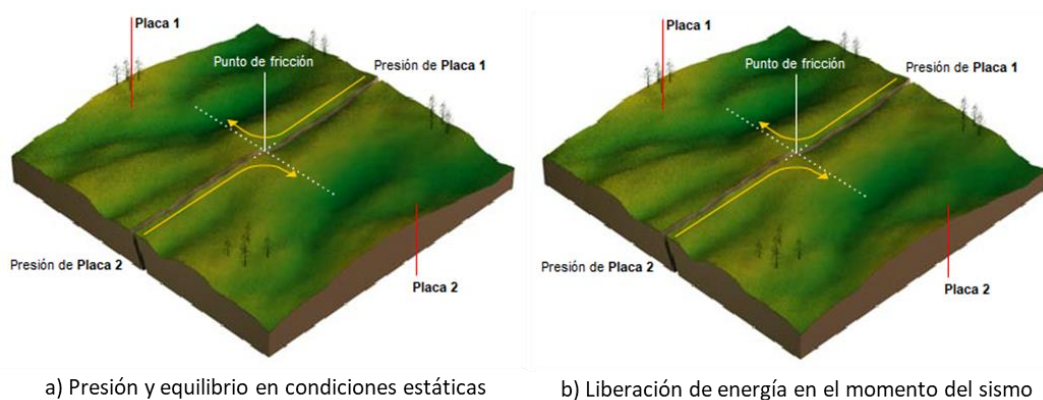
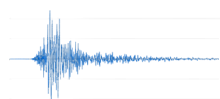


Ilustración 21. Presión y equilibrio antes del sismo y liberación de energía en el momento del sismo.

[Fuente: (Gobierno de Canarias, 2015)]

2.4.4. Teoría del Rebote Elástico

Según este postulado, en la medida que la placa trata de moverse en relación con la otra, la energía de deformación se acumula a lo largo de los límites. Cuando la acumulación de esfuerzos alcanza la resistencia máxima de la roca, esta se fractura y libera la energía de deformación acumulada (**Ilustración 22**). La naturaleza de la falla y el tipo de material dicta el efecto de la fractura; así para un material es muy dúctil y débil, apenas se puede almacenar energía de deformación en las placas debido a su movimiento; pero si el material es fuerte y frágil, la tensión acumulada y la consiguiente ruptura repentina libera la energía almacenada en forma de ondas de tensión y calor. La propagación de estas ondas de tensión elásticas causa el movimiento vibratorio asociado con los terremotos.



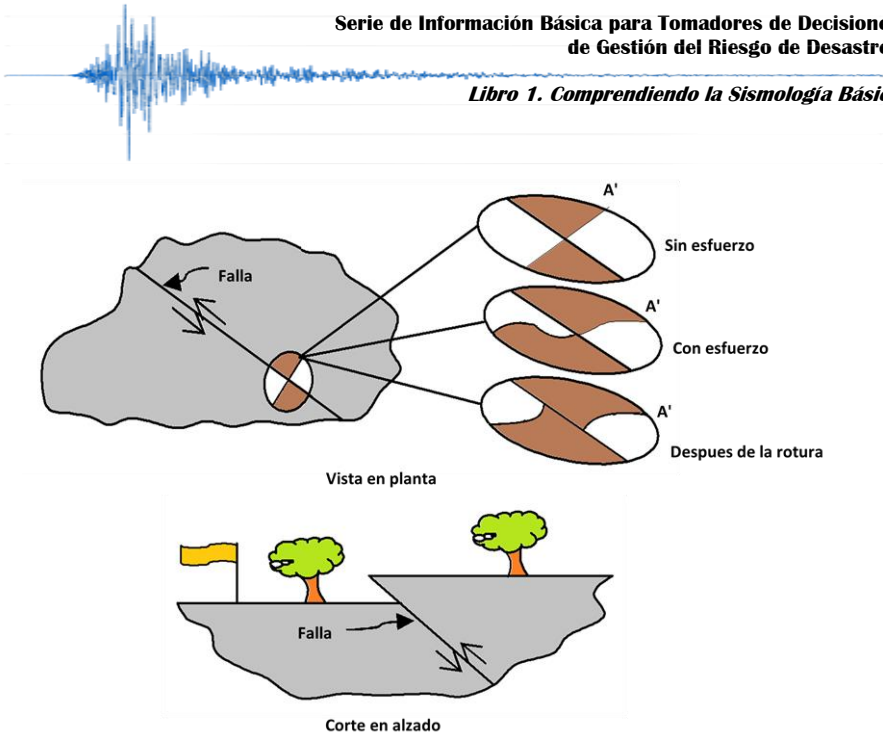


Ilustración 22. Rebote elástico a través de una falla. [Fuente: Adaptado (NPTEL, 2013)]

2.4.5. Características y Naturaleza de los Sismos

Un *Terremoto* o *Sismo* es la vibración de la superficie de la tierra causada por las ondas que provienen de una fuente de perturbación del interior de la tierra (**Ilustración 23**). Cabe decir que mayoría de los terremotos de importancia para la ingeniería son de origen tectónico y son causados por el deslizamiento a lo largo de fallas geológicas.

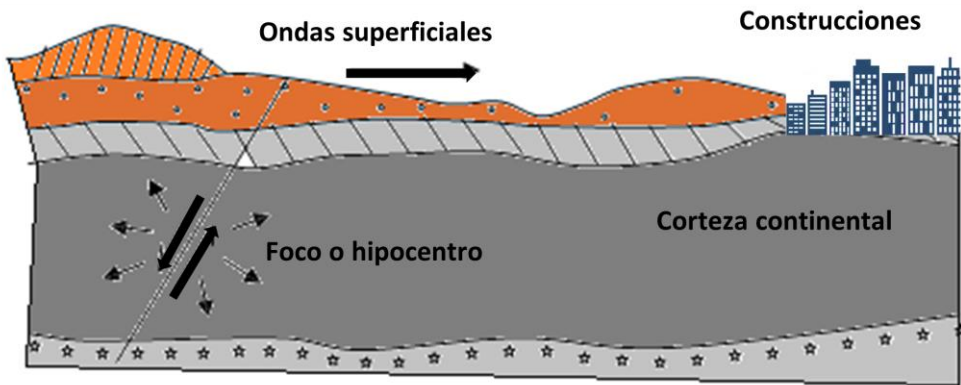


Ilustración 23. Representación general de un escenario de ruptura sísmica
[Fuente: Adaptado (NPTEL, 2013)]

Las características típicas de los terremotos dependen de los siguientes elementos: Caída de esfuerzos durante el deslizamiento en la falla, Desplazamiento total de la falla, Tamaño del área deslizada, Rugosidad del proceso de deslizamiento, Forma de la falla (Falla Normal, Falla Inversa, de Rumbo, Oblicua o Mixta), Proximidad del área de rotura a la superficie del suelo y Estado del material del suelo.

En la medida que las ondas se irradian desde la falla, sufren dispersión geométrica y atenuación debido a la pérdida de energía en las rocas; en virtud a que el interior de la tierra está formado por formaciones heterogéneas, las ondas sufren múltiples reflexiones, retracción, dispersión y atenuación a medida que viajan. Las ondas sísmicas que llegan a un sitio en la superficie de la tierra son el resultado de una compleja superposición que da lugar a un movimiento irregular.

2.5. LOS SISMOS Y PROPAGACIÓN ONDULATORIA

Cabe recordar que las ondas sísmicas, como todas las ondas de la naturaleza responden a las mismas consideraciones de la física de ondas. Así, en primera instancia se abordará el tema desde los aspectos generales del movimiento ondulatorio y se continuará con el tema de las ondas sísmicas.

2.5.1. Ondas sísmicas

Las ondas son un fenómeno que sucede tanto en el tiempo como en el espacio. Si lanzamos un objeto a un estanque, sabemos que se producen ondas que se esparcen por la superficie del agua a manera de circunferencias, que en la medida que el tiempo transcurre, se hacen más grandes y se van desvaneciendo. Por la experiencia se sabe que las oscilaciones en el sitio de caída persisten durante un tiempo después (si no fuera así, sólo observaríamos una circunferencia), pero van disminuyendo sucesivamente de amplitud (Méndez, 2015). En la *Ilustración 24*, a continuación se hace una comparación entre las ondas en el estanque y como se propagan en La Tierra.



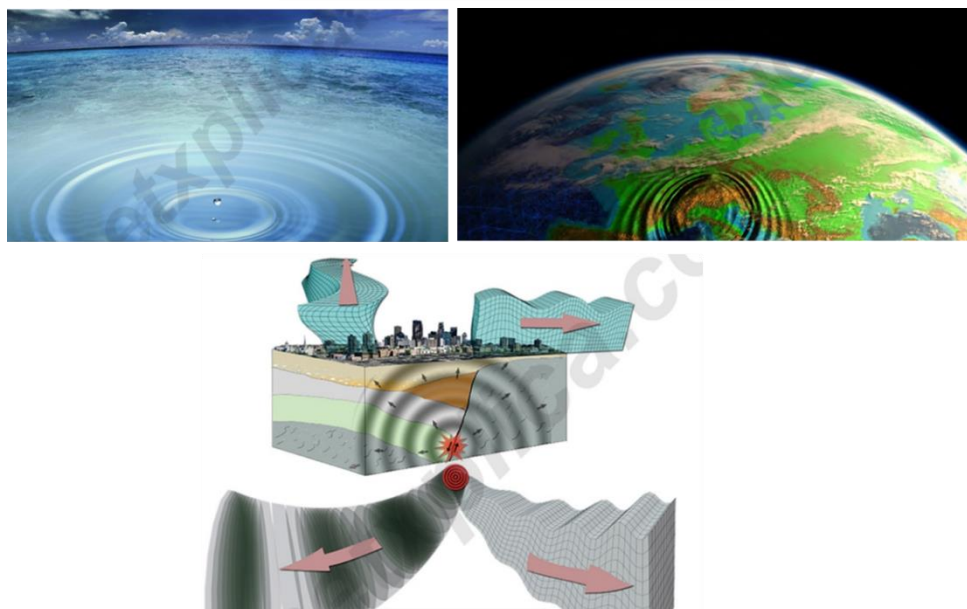


Ilustración 24. Comparación entre la propagación de las ondas de un estanque y en el suelo y subsuelo

[Fuente: adaptado de (Netxplica, 2016)]

2.5.2. Representación de las Ondas Sísmicas

Como se ha mencionado, las vibraciones sísmicas se originan desde el punto de inicio de la ruptura y se propagan en todas las direcciones. Estas vibraciones viajan a través de las rocas en forma de ondas elásticas. Principalmente hay dos tipos de ondas asociadas con la propagación de una onda de tensión elástica generada por un terremoto:

- Las **Ondas de Cuerpo** viajan desde el foco y se propagan hacia la superficie; se trata de *Ondas Primarias (P)* y las *Ondas Secundarias (S)*
- Por su parte las **Ondas Superficiales** las cuales solo viajen a través de la superficie, son de una frecuencia más baja que las de cuerpo, y aunque llegan después de las de cuerpo, son responsables de la mayoría de los daños y destrucción asociados a terremotos, para los casos de sismos profundos, el daño asociado a ondas superficiales se reduce considerablemente.

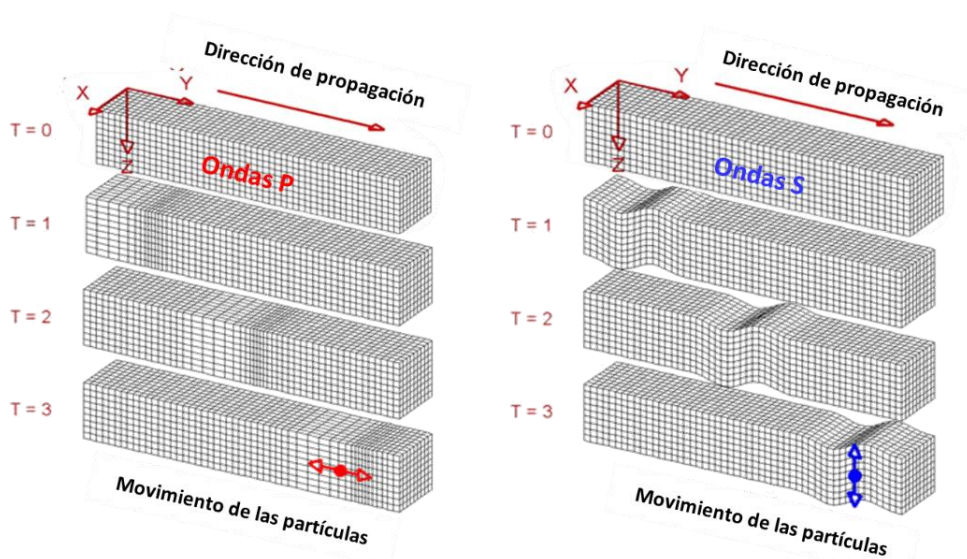


Ilustración 25. Representación gráfica tridimensional de Ondas de Cuerpo (S y P)
 [Fuente: (UPSeis - Michigan Tech University, 2017) a partir de L. Braile, Universidad de
 Purdue: www.ics.purdue.edu/~braile]

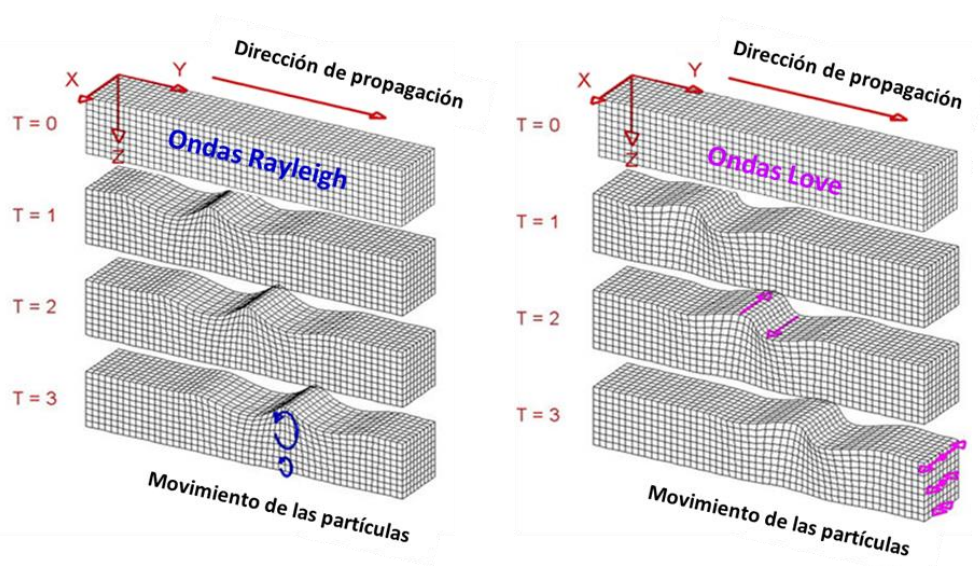


Ilustración 26. Representación gráfica tridimensional de Ondas Superficiales (R y L)
 [Fuente: (UPSeis - Michigan Tech University, 2017) a partir de L. Braile, Universidad de
 Purdue: www.ics.purdue.edu/~braile]

En la tabla a continuación, adaptada de (British Geological Survey, 2018), se presenta un resumen de los diferentes tipos de ondas sísmicas y sus propiedades.

Tabla 2. Tipos de ondas sísmicas y sus propiedades

Tipo (y nombres)	Movimiento de partículas	Velocidad típica	Otras características
Ondas P <i>Compresional</i> <i>Longitudinal</i> <i>Primaria</i>	Compresiones alternas (empujes) y dilataciones (tirones) en la misma dirección en que se propaga la onda	<u>En corteza terrestre:</u> $V_P \approx 5 - 7 \text{ km/s.}$ <u>En manto y núcleo:</u> $V_P > \approx 8 \text{ km/s.}$ <u>En agua:</u> $V_P \approx 1,5 \text{ km/s.}$ <u>En el aire:</u> $V_P \approx 0,3 \text{ km/s}$	El movimiento de P se desplaza más rápido en los materiales, por lo que la onda P es la primera energía que llega a un sismograma. Generalmente menor y mayor frecuencia que las ondas S y de superficie. Las ondas P en un líquido o gas son ondas de presión, incluidas las ondas de sonido.
Ondas S <i>de Corte</i> <i>Transversal</i> <i>Secundaria</i>	Movimientos transversales alternos perpendiculares a la dirección de propagación.	<u>En corteza terrestre:</u> $V_S \approx 3 - 4 \text{ km/s.}$ <u>En manto:</u> $V_S > \approx 4,5 \text{ km/s.}$ <u>En núcleo interno (sólido):</u> $V_S \approx 2,5-3,0 \text{ km/s}$	Las ondas S no viajan a través de los fluidos, por lo que no existen en el núcleo externo líquido de la Tierra ni en el aire o el agua o la roca fundida (magma). Las ondas S viajan más lentamente que las ondas P en un sólido y, por lo tanto, llegan después de la onda P.
Ondas L <i>Love</i> <i>ondas</i> <i>superficiales</i>	Movimiento horizontal transversal, perpendicular a la dirección de propagación y generalmente paralelo a la superficie de la Tierra.	$V_L \approx 2,0 - 4,5 \text{ km/s}$ en la Tierra dependiendo de la frecuencia de la onda de propagación	Las ondas L existen debido a la superficie de la Tierra. Son más grandes en la superficie y disminuyen en amplitud con la profundidad. Las ondas L son dispersivas, es decir, la velocidad de la onda depende de la frecuencia, con frecuencias bajas que normalmente se propagan a una velocidad más alta. La profundidad de penetración de las ondas L también depende de la frecuencia, con frecuencias más bajas que penetran a mayor profundidad.
Ondas R <i>Rayleigh</i> <i>ondas de</i> <i>superficie</i>	El movimiento es a la vez en la dirección de propagación y perpendicular (en un plano vertical)	$V_R \approx 2,0 - 4,5 \text{ km/s}$ en la Tierra dependiendo de la frecuencia de la onda de propagación	Las ondas de R también son dispersivas y las amplitudes generalmente disminuyen con la profundidad en la Tierra. Apariencia y movimiento de partículas son similares a las ondas de agua.

* [Fuente: Adaptado de (British Geological Survey, 2018)]

Como se puede observar en la **Ilustración 27**, con la incorporación de la instrumentalización a la sismología, los registros de los sismos permiten identificar los arribos de los diferentes tipos de las ondas sísmicas.

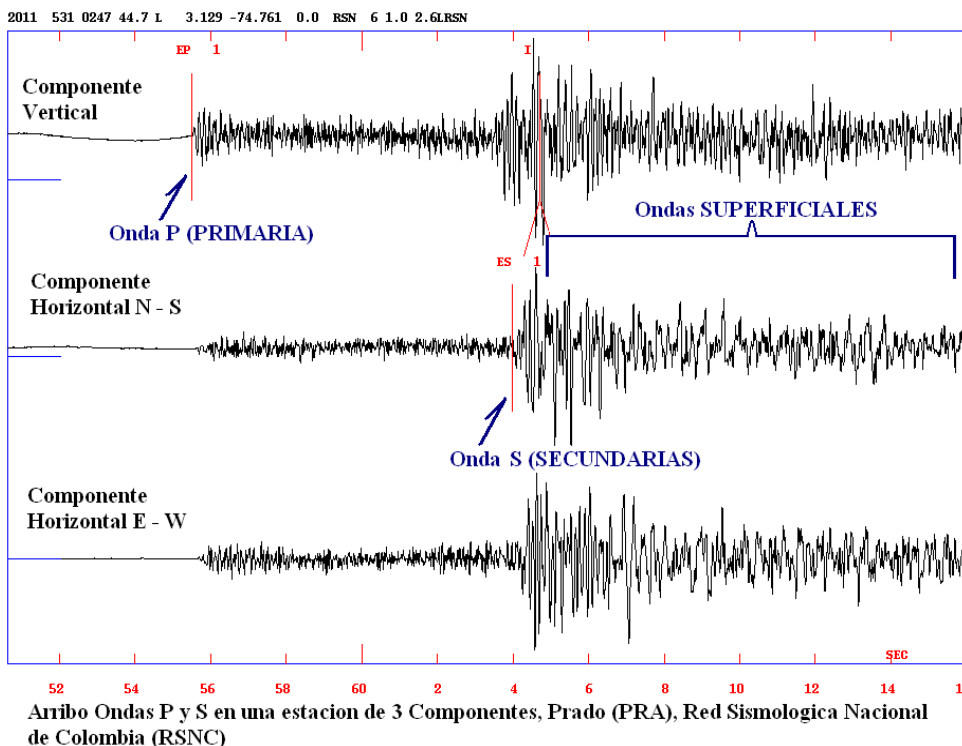


Ilustración 27. Arribos de los diferentes tipos de las ondas sísmicas a una estación
[Fuente: (Rescate de Occidente, s.f.), a partir de la RSNC]

Del mismo modo, a nivel de los países y a nivel global, se han creado redes de estaciones sismológicas, con el fin de coadyuvar con la localización de los sismos, a pesar de que en la actualidad se tienen estaciones automatizadas, se parte de un principio común, según el cual, a mayor distancia de la zona epicentral, mayor es el tiempo de la llegada, ya que esta situación se rige por la condición fundamental de la física, según la cual el tiempo guarda una relación directa de proporcional con la distancia ante una velocidad dada; así, cuando se cuentan con diferentes estaciones sismológicas se puede ubicar la distancia epicentral al determinar la velocidad de llegada a cada una de las estaciones y al trazar una circunferencia con radio igual a la distancia que separan las estaciones con el epicentro, en la intersección de estas circunferencias se podría identificar el epicentro, según se observa en la , a continuación.

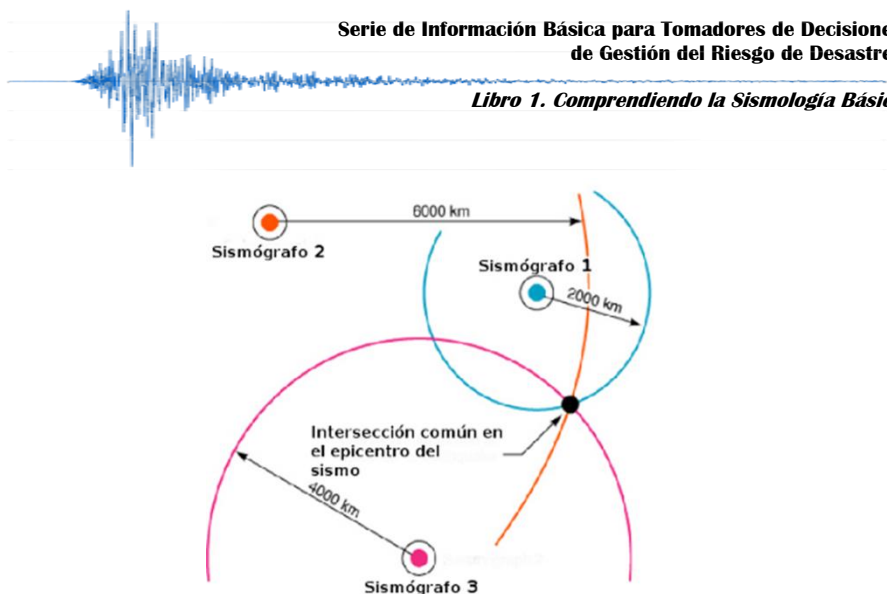


Ilustración 28. Determinación del epicentro

[Fuente: (CSN: Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, 2002)]

2.6. MEDIDAS DE LOS SISMOS

Conforme han mejorado las maneras de medir tanto el tamaño como las características de los terremotos; han sido desarrolladas diferentes escalas de las cuales existen dos tipos: una cualitativa (Intensidad) y otra instrumental cuantitativa (Magnitud).

Ambos sistemas de medida buscan definir el tamaño del terremoto. La intensidad define los efectos y/o daños que se producen (daños produce en las estructuras civiles y cómo afecta al paisaje), así como la percepción de las personas, especialmente en la zona epicentral; la magnitud, por su parte, mide la energía liberada en el foco del terremoto. En ese sentido, se puede afirmar que la intensidad es una medida más subjetiva que la magnitud, ya que se basa en observaciones sobre los efectos que produce el terremoto en la zona afectada y que se evalúan, casi visualmente, por el observador.

A continuación, en una especie de línea de tiempo respecto a los usos de sistemas de medidas, se presentan los siguientes hitos:

- 1883: Rossi y Forel, propusieron la primera escala dividida en diez grados
- 1902: Mercalli hace una modificación de la propuesta por Rossi y Forel. Cabe decir que la Escala de Mercalli sirvió de base a las que existen en la actualidad.
- 1931: Wood y Newmann proponen la Mercalli Modificada (MM).

- 1958: Richter, propone una escala, que como ya se ha planteado, se dedica a medir la energía liberada por un terremoto, la Escala de Richter es de amplio uso en América.
- 1967: Medvedev, Sponheur y Karnik presentan la Escala MSK de mayor uso en Europa.
- 1992: La escala MSK fue actualizada, pasando a denominarse EMS92, siendo esta la utilizada en Europa en la actualidad.

2.6.1. Magnitud

Con respecto a la magnitud en la actualidad aún no existe un acuerdo absoluto entre la manera de medir este parámetro, lo que lleva a la existencia de numerosas escalas. Algunos países utilizan la escala de magnitud m_b (o de ondas internas), otros, las escalas de magnitud m_D (de duración), M_s (superficial), M_L (Richter o local). Estas escalas se diferencian por la metodología con que miden la energía del terremoto y sus valores sólo coinciden en un estrecho rango. En la actualidad hay una tendencia a unificar todas estas escalas en una única llamada de magnitud momento (M_w), en virtud a que esta es la única que caracterizar perfectamente cualquier tamaño de terremoto.

2.6.1.1. Escala de Richter

La escala sismológica de Richter, también conocida como escala de magnitud local (ML), es una escala logarítmica arbitraria que asigna un número para cuantificar la energía que libera un terremoto, denominada así en honor del sismólogo estadounidense Charles Francis Richter (1900-1985); esta escala es abierta, es decir que no tiene límite inferior ni superior. A nivel mundial se viene usando esta escala para determinar la magnitud de sismos de magnitudes entre 2,0 y 6,9 y de 0 a 400 kilómetros de profundidad; sin embargo, cabe hacerse notar que para sismos de magnitudes superiores a 7,0 en la escala de Richter se considera incorrecto, puesto que los sismos con magnitudes superiores a 6,9 se deben medir con la escala sismológica de magnitud de momento.

Esta escala se establece a partir de la Amplitud de las Ondas S en milímetros (A), medida directamente en el sismograma, en el diferencial de tiempo en segundos desde el inicio de las ondas P al de las Ondas S (Δt), asignando además, una magnitud arbitraria pero constante a terremotos que liberan la misma cantidad de energía (2.92); el uso del logaritmo en la escala es para reflejar la energía que se desprende en un terremoto, dicho logaritmo incorporado a la escala hace que los valores asignados a cada nivel aumenten de forma exponencial, y no de forma lineal. Se determina por la siguiente relación:

$$M = \log_{10} A(mm) + 3 * \log_{10}(8 * \Delta t(s)) - 2.92$$



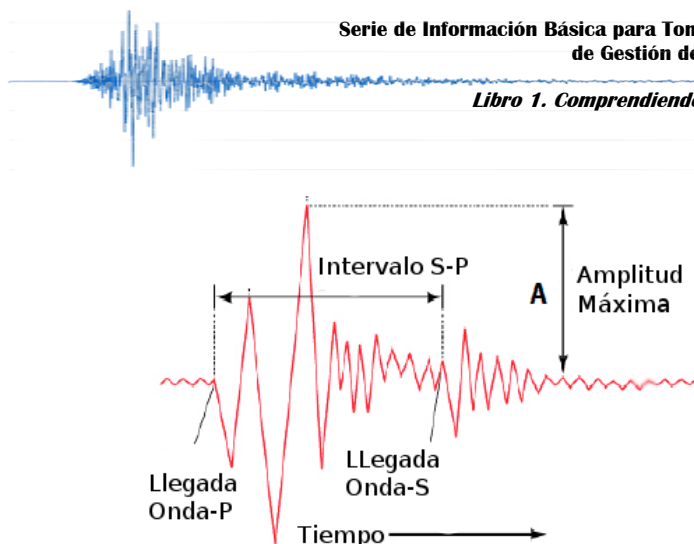


Ilustración 29. Representación gráfica de los elementos para determinar la Magnitud de un sismo por Richter

[Fuente: (CSN: Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, 2002)]

2.6.1.2. Sismógrafos

Como se ha mencionado, el sismógrafo o sismómetro es un equipo ampliamente utilizado para la medición de la magnitud de los terremotos; desde sus inicios, básicamente está conformado por un resorte, una masa fija, un cilindro de papel con un rollo de papel, un estilete (o pluma de tinta) y una base apoyada en el suelo (Ver la **Ilustración 30**, a continuación).

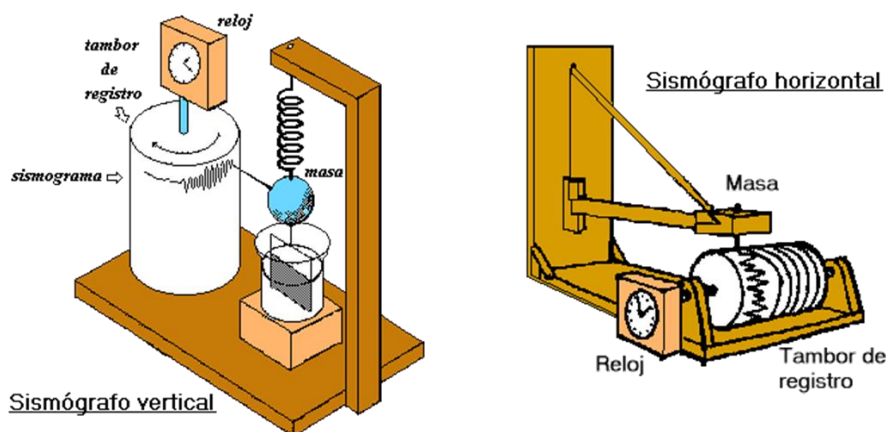


Ilustración 30. Esquema básico de un sismógrafo

[Fuente: (Rescate de Occidente, s.f.), a partir de la RSNC]

2.6.2. Intensidad

Se sabe que la intensidad define los que se producen en caso de un terremoto, es de carácter subjetiva, pues se fundamenta en la percepción en las personas que sienten el evento, así como en los daños produce en a infraestructura.

2.6.2.1. Escala de Mercalli

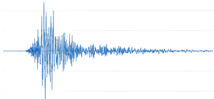
Esta escala sismológica debe su nombre al físico italiano Giuseppe Mercalli, se fragmenta en doce grados (notados en números romanos) y fue desarrollada para evaluar la intensidad de los terremotos a través de los efectos y daños causados a distintas estructuras.

Los niveles bajos de la escala están asociados por la forma en que las personas sienten el temblor, mientras que los grados más altos se relacionan con el daño estructural observado.

La tabla siguiente es una guía aproximada de los grados de la escala de Mercalli modificada.

Tabla 3. Escala de Intensidad de Mercalli

Grado	Descripción
I - Muy débil.	Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables. Aceleración menor a 0,5 Gal.
II - Débil.	Perceptible sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar. Aceleración entre 0,5 y 2,5 Gal.
III - Leve.	Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo perciben como un terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Sensación semejante al paso de un camión pequeño. Aceleración entre 2,5 y 6,0 Gal.
IV - Moderado.	Perceptible por la mayoría de personas dentro de los edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbación en cerámica, puertas y ventanas. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación semejante al paso de un camión grande. Aceleración entre 6,0 y 10 Gal.
V - Poco fuerte.	Sacudida sentida casi por todo el país o zona y algunas piezas de vajilla o cristales de ventanas se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen los relojes de péndulo. Aceleración entre 10 y 20 Gal.
VI - Fuerte.	Sacudida sentida por todo el país o zona. Algunos muebles pesados cambian de sitio y provoca daños leves, en especial en viviendas de material ligero. Aceleración entre 20 y 35 Gal.
VII - Muy fuerte.	Ponerse de pie es difícil. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables en estructuras pobremente construidas. <u>Mampostería</u> dañada. Perceptible por personas en vehículos en movimiento. Aceleración entre 35 y 60 Gal.
VIII - Destructivo.	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles derrumbes. Daño severo en



Grado	Descripción
	estructuras pobremente construidas. <u>Mampostería</u> seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar. Aceleración entre 60 y 100 Gal.
IX - Muy destructivo.	Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con derrumbes parciales. Edificios desplazados fuera de las bases. Aceleración entre 100 y 250 Gal.
X - Desastroso.	Algunas estructuras de madera bien construidas quedan destruidas. La mayoría de las estructuras de <u>mampostería</u> y el marco destruido con sus bases. Vías ferroviarias dobladas. Aceleración entre 250 y 500 Gal.
XI - Muy desastroso.	Pocas estructuras de <u>mampostería</u> , si las hubiera, permanecen en pie. Puentes destruidos. Vías ferroviarias curvadas en gran medida. Aceleración mayor a 500 Gal.
XII - Catastrófico.	Destrucción total con pocos <u>supervivientes</u> . Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados. Imposibilidad de mantenerse en pie.

* [Fuente: (RSN - Universidad de Costa Rica, 2015)]

2.6.3. Diferencias y relaciones entre las escalas de magnitud e intensidad

En la tabla, a continuación, se pueden apreciar las diferencias y relaciones que se presentan entre las escalas sísmicas de magnitud e intensidad.

Tabla 4. Diferencias y relaciones entre escalas sísmicas de Mercalli y Richter

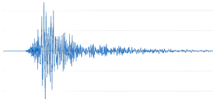
MM	ESCALA MERCALLI	Mw	ESCALA RICHTER
I	Casi nadie lo ha sentido.	2,5	En general no sentido.
II	Muy pocas personas lo han sentido.		Registrado por los sismógrafos
III	Tembor notado por mucha gente. No suele ser percibido como terremoto	3,5	Sentido por mucha gente.
IV	Sentido por muchas personas. Sentido en el interior de los edificios.		
V	Sentido por casi todos. Árboles y postes presentan oscilación.		
VI	Sentido por todos. Los muebles se mueven. Producen pequeños daños.	4,5	Puede producirse algunos daños locales pequeños.
VII	Malas construcciones son dañadas. Pequeños daños en el resto de estructuras.		
VIII	Construcciones comunes se derrumban. Construcciones reforzadas sufren daños.	6	Terremoto destructivo.
IX	Todos los edificios muy dañados. Desplazamiento de muchos cimientos. Grietas observables en el suelo.		
X	Muchas construcciones destruidas Suelo muy agrietado.		
XI	Derrumbe de casi todas las construcciones. Puentes destruidos. Grietas muy amplias en el suelo.	8	Grandes terremotos, de 8,0 a más.
XII	Destrucción total. Se producen ondulaciones en el suelo.		

. * [Fuente: (Carpetapedagogica.com, s.f.)]

2.6.4. Efectos de los Sismos

Una idea general de la frecuencia de ocurrencia de grandes sismos se puede obtener de la siguiente tabla y que se representa gráficamente en la **Ilustración 31**.

Tabla 5. Frecuencia de ocurrencia de grandes sismos [Fuente: (USGS, 2006)]



Magnitud (M_w =Mayores de 6,9)	Descripción	Efectos de un sismo	Frecuencia de ocurrencia
M_L =De 2,0 a 6,9)			
Menos de 2,0	Micro	Los microsismos no son perceptibles.	Alrededor de 8000 por día
2,0-2,9	Menor	Generalmente no son perceptibles.	Alrededor de 1000 por día
3,0-3,9		Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños.	49 000 por año.
4,0-4,9	Ligero	Movimiento de objetos en las habitaciones que genera ruido. Sismo significativo pero con daño poco probable.	6 200 por año.
5,0-5,9	Moderado	Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas. En edificaciones bien diseñadas los daños son leves.	800 por año.
6,0-6,9	Fuerte	Pueden llegar a destruir áreas pobladas, en hasta unos 160 kilómetros a la redonda.	120 por año.
7,0-7,9	Mayor	Puede causar serios daños en extensas zonas.	18 por año.
8,0-8,9	Gran	Puede causar graves daños en zonas de varios cientos de kilómetros.	1-3 por año.
9,0-9,9		Devastadores en zonas de varios miles de kilómetros.	1-2 en 20 años.
10,0+	Épico	Nunca registrado; ver tabla de más abajo para el equivalente de energía sísmica.	En la historia de la humanidad (y desde que se tienen registros históricos de los sismos) nunca ha sucedido un terremoto de esta magnitud.

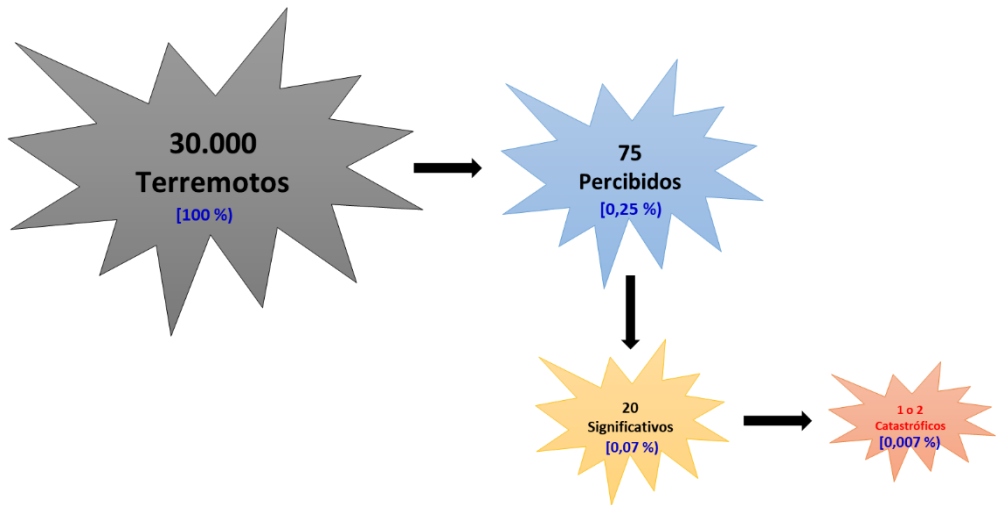


Ilustración 31. Representación gráfica de la ocurrencia terremotos y su relación con los más significativos y/o catastróficos [Fuente: Los autores, a partir de (USGS, 2006)]

FRECUENCIA Y MAGNITUD DE LOS TERREMOTOS

MAGNITUD

Energía de ondas sísmicas

La magnitud es un número que caracteriza el tamaño relativo de un terremoto. Cada aumento de un número entero representa un aumento de diez veces en la amplitud medida, y 32 veces más de liberación de energía.

Ejemplos de grandes terremotos y sus magnitudes:

Here are some factors that determine how destructive an earthquake can be:

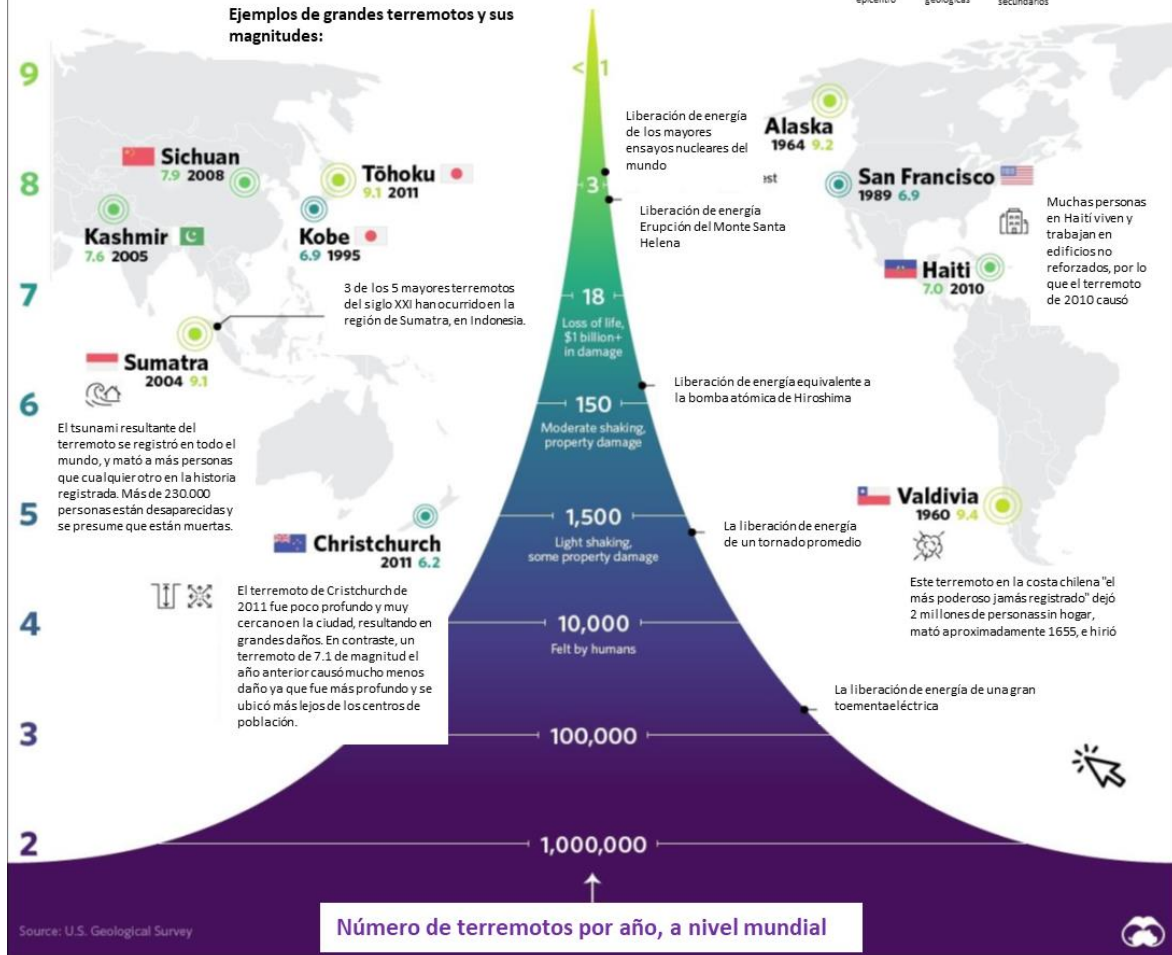
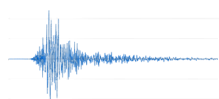


Ilustración 32. Infografía de frecuencia y magnitud de los terremotos [Fuente: Traducida por los autores de (LePan, 2019), a partir de un recurso del USGS]



Comprendiendo la Sismología Básica para Gestores del Riesgo

Videos recomendados

Video 4: Capas de la Tierra — Una breve historia del descubrimiento.



“¿Cómo descubrieron los científicos las capas de la Tierra? A principios de la década de 1900, los científicos descubrieron que podían usar los datos de los terremotos como un método para observar en las profundidades debajo de la superficie. Al comprender los tiempos de viaje de diferentes ondas sísmicas hasta estaciones en todo el mundo, los científicos pudieron calcular dónde ocurrieron los límites y qué representaban esos límites. Así determinaron que la Tierra tiene tres capas basadas en la composición química. Corteza, manto y núcleo. Como una analogía para la escala relativa, estas capas pueden compararse con un huevo, con la cáscara representando la capa frágil más externa, el manto representado por la clara y la yema el núcleo.”

IRIS Earthquake Science. (2019). Capas de la Tierra — Una breve historia del descubrimiento (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 12 de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=P3umoFZeqMq&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=2>

Video 5: La Teoría de la Tectónica de Placas—Breve Historia.



“La teoría de la tectónica de placas no fue aceptada durante siglos porque nadie podía responder adecuadamente a la pregunta: “¿Cuál es el mecanismo que impulsa las placas?””

IRIS Earthquake Science. (2019). La Teoría de la Tectónica de Placas—Breve Historia (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 12 de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=BZ4mLadRuk&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=3>

Video 6: Placas Tectónicas: ¿Que son las Placas (litosféricas) tectónicas?.



“La capa exterior rígida y fría de la tierra, la litósfera, se rompe en placas masivas. Hay alrededor de una docena de placas principales y muchas placas más pequeñas en movimiento continuo, ya que chocan, se deslizan debajo o se mueven una sobre otra en un proceso conocido como tectónica de placas. Una placa puede ser completamente litosfera oceánica, como la Placa del Pacífico o, como la placa norteamericana, puede ser parte litosfera oceánica y parte litosfera continental....”

IRIS Earthquake Science. (2019, Febrero 01). Placas Tectónicas: ¿Que son las Placas (litosféricas) tectónicas?. (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 12 de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=7Dwt2XTBG7M&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=4>

Video 7: ¿Qué impulsa la tectónica de placas?.

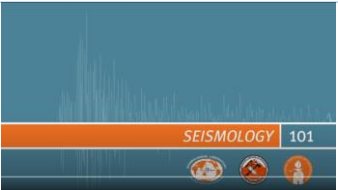


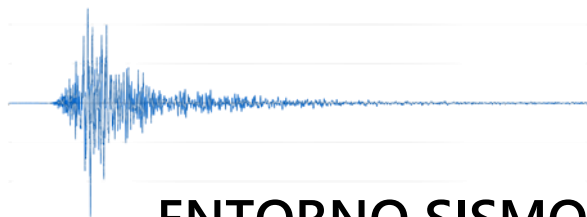
“Conoce de manera didáctica y resumida la teoría de la tectónica de placas, las capas internas de la tierra, los tipos de límites de las placas: límites transformantes, límites divergentes y límites convergentes..”

IRIS Earthquake Science. (2019, Abril 29). ¿Qué impulsa la tectónica de placas?. (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 12 de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=AUPBLNWsKUq&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=6>

Comprendiendo la Sismología Básica para Gestores del Riesgo

Videos recomendados

Video 8: ¿Por qué se mueven las placas tectónicas?	
	“Conoce de manera didáctica y resumida la teoría de la tectónica de placas, las capas internas de la tierra, los tipos de límites de las placas: límites transformantes, límites divergentes y límites convergentes.”
Apaza, Norma. (s.f.). ¿Por qué se mueven las placas tectónicas? [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 08 de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=q5tTpFOMpL4&t=99s	
Video 9: Intensidad de Terremoto: ¿Que controla la sacudida que sientes?	
	La intensidad sísmica, que es el temblor que experimentas, puede ser leve o severo, corto o largo, brusco o de bandeo. A diferencia de la magnitud de un terremoto, que es una medida de la energía liberada y es la misma para todos los lugares. La intensidad sísmica que percibes depende de dónde te encuentras. La intensidad está controlada por tres factores principales: 1) Magnitud: ¿Que tan grande fue el terremoto? 2) Distancia desde el hipocentro: La intensidad varía de un lugar a otro, y 3) Condiciones locales de roca y suelo.
IRIS Earthquake Science. (2019, Abril 29). Intensidad de Terremoto: ¿Que controla la sacudida que sientes? (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 08 de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=zrKhOVAZDL0&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=7	
Video 10: Cambiando la magnitud de un Terremoto ¿Por qué los sismólogos hacen eso?	
	¿Por qué los sismólogos degradan o ascienden de categoría los terremotos?
IRIS Earthquake Science. (2019, Abril 29). Cambiando la magnitud de un Terremoto ¿Por qué los sismólogos hacen eso? (2019-educativa) [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 08 de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=-DEDSenXz3w&list=PL2E1E62BCF37D619A&index=8	
Video 11: Seismology 101	
	
Caltech (California Institute of Technology). (2013). Seismology 101 [Archivo de video]. Recuperado el 1 de 08 de 2019, de https://www.youtube.com/watch?v=6qMluuSiXrk	



CAPÍTULO III. ENTORNO SISMOTECTÓNICO DE COLOMBIA

Se presenta en este capítulo una síntesis general del marco sismotectónico de Colombia, con el fin de que el lector pueda conocer y entender los aspectos fundamentales que conforman y originan los sismos en el País.

Destacamos el hecho de que se trata de un tema que está en continua discusión por parte de investigadores nacionales e internacionales, el cual dista mucho de estar cerrado y en muchos casos se pueden tener opiniones y posiciones divergentes y contradictorias por parte de dichos grupos, en este sentido no pretenden los autores tomar una posición absoluta sobre la secuencia de formación del territorio de lo que actualmente conocemos como Colombia, si no por el contrario mostrar de manera esquemática se considera razonablemente válido basado en la información científica disponible.

El capítulo inicia con una breve discusión de la orogenia del territorio colombiano y presenta en su parte final los principales sistemas de fallamiento geológico del país y que generan los sismos a nivel nacional.

3.1. OROGENIA DE SURAMÉRICA

Partiendo desde la Pangea entre finales del Carbonífero (- 300 Millones de Años) y principios del Pérmico, todos los continentes estaban unidos como se mencionó en el capítulo anterior, alrededor de 250 Millones de años atrás a finales del Pérmico, la Pangea inicia su división en dos supercontinentes Laurasia al norte y Gondwana al sur, para el caso específico de Suramérica este quedó Gondwana y a finales del Triásico inicia su separación del bloque que conformaba con lo que hoy es África.

Sudamérica estuvo conformado por los Cratones primogénitos, de los cuales solo unos cuantos de ellos al separarse de la Pangea constituyeron la base primaria de Suramérica. Para el caso específico de Colombia, prácticamente

solo el Cratón Amazónico tiene su origen en la Pangea y Gondwana, las demás partes del territorio de Colombia fueron acrecionadas posteriormente, esto se puede observar en *Ilustración 33*



Ilustración 33. División de Pangea en Laurasia y Gondwana, se resalta en negro la ubicación de Colombia

[Fuente: adaptado de (Wikimedia Commons, 2019)]

En la *Ilustración 34*, se muestra una secuencia esquemática de los últimos 175 Millones de años, se resalta el hecho de que hay diversas teorías que ubican la localización de Gondwana coincidente con el polo sur terrestre, otras por el contrario la ubican más centrada hacia la línea ecuatorial, para efectos de visualización iniciamos con la partición de Gondwana meridional en los continentes Suramericano y África, es clara en la secuencia (ver figura (a)), que solo el cratón amazónico formó parte desde el principio del territorio que conocemos hoy, esto es la parte este del país limitada por el piedemonte llanero, posteriormente partes emergentes o bloques acrecionados se fueron uniendo para conformar el territorio, siendo el final del Cretácico (alrededor de 70 millones de años atrás) y hasta finales del Paleogeno (alrededor de 20 millones de años atrás) el tiempo de mayor dinamismo para las acreciones y las tierras emergentes que se unieron para la conformación del país.

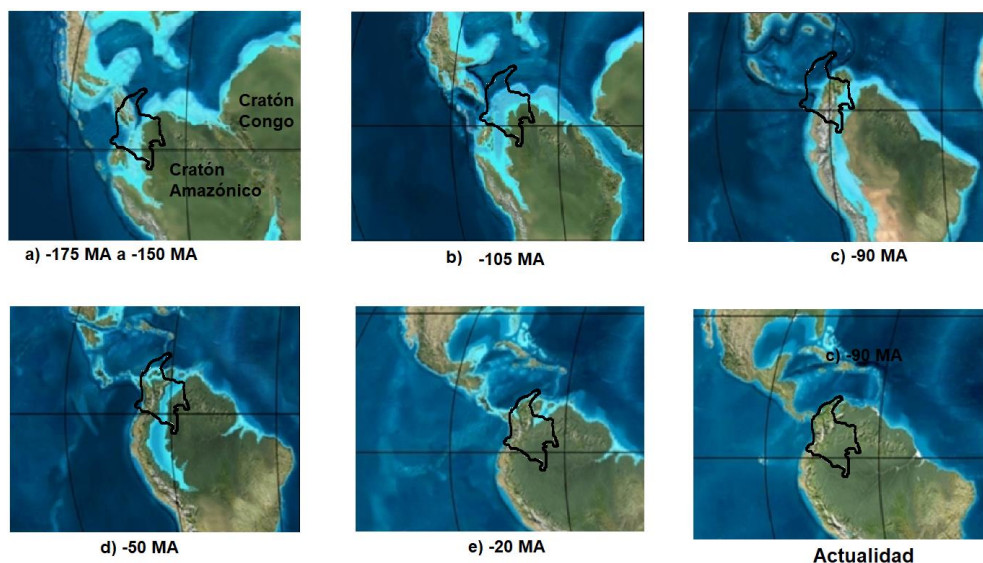


Ilustración 34: Secuencia de Formación de Colombia -175 Millones de Años – Presente. Se resalta la ubicación de Colombia en la secuencia
[Fuente: adaptado de (Wikimedia Commons, 2019)]

3.2. OROGENIA DE COLOMBIA

Con el fin de poder identificar las fuentes sismogénicas que tienen un rol predominante en Colombia, se presentará en este numeral una síntesis de la orogenia local del territorio nacional, considerando que no se desea profundizar más allá de poder distinguir las formaciones más importantes del país y cómo a partir de sus juntas o uniones se pueden distinguir los grandes sistemas de fallamiento que ocasionan la sismicidad actual.

En la **Ilustración 35** se presentan las macro provincias tectónicas que se formaron a partir del Cratón Primogénito Amazónico y los terrenos acrecionados posteriormente.

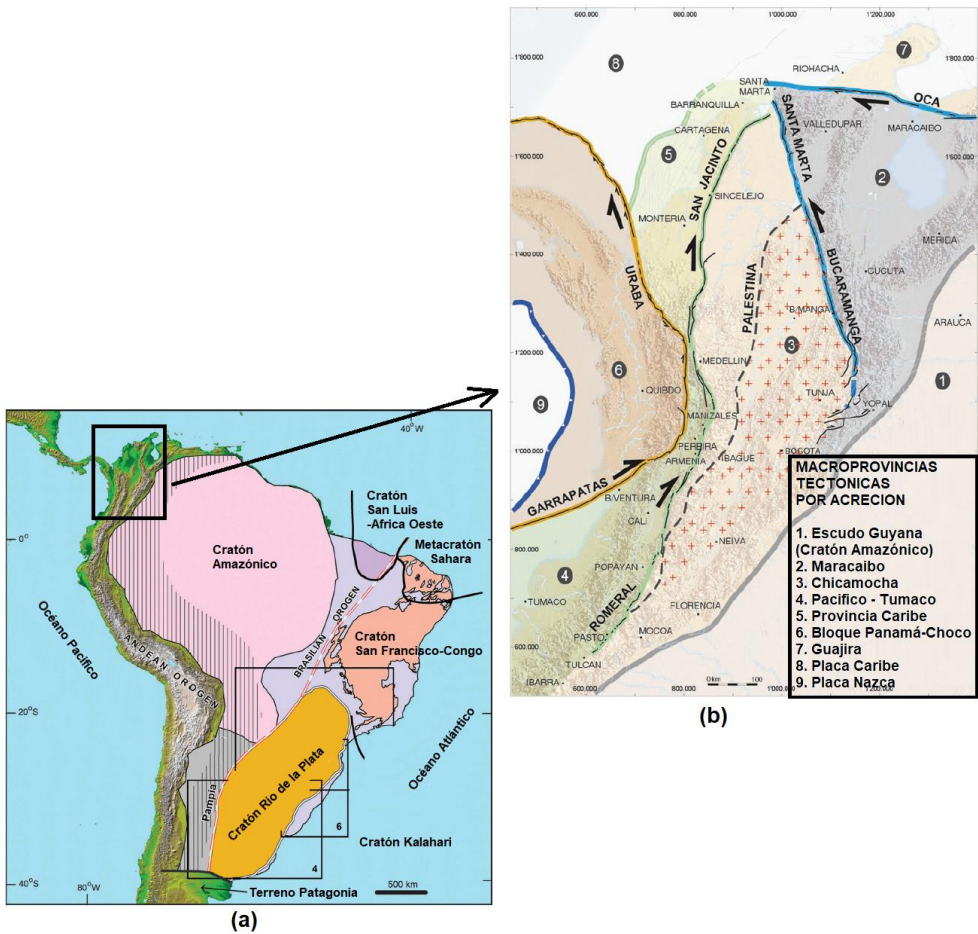


Ilustración 35. Cratones en Suramérica y Macroprovincias Tectónicas por Acreción en Colombia

[Fuentes: (a) Adaptado de (João O.S. Santos, 2019) y (b) adaptado de (Fabio, 2019-2)]

Esta situación particular genera en el territorio colombiano una gran cantidad de uniones o suturas entre bloques que se fueron uniendo (no todos a la vez), al ser empujados unos contra otros conforme las fuerzas geodinámicas terrestres los iban moviendo.

Es importante resaltar el hecho de que la unión dentro del territorio nacional de estos terrenos acrecionados, genera principalmente dos tipos de sismicidad claramente diferenciables: Los sismos corticales de tipo superficial (fallas superficiales) y la sismicidad de tipo intermedia y profunda (zonas de contacto a profundidad entre las placas).

Aunque la secuencia y cronología de las uniones entre diversos bloques son de trascendental relevancia en estudios geológicos, para el objeto de este libro es suficiente iniciar con el estado actual de la tectónica en el territorio nacional y la consecuencia desde el punto de vista de generación de sismos de este contexto.

3.2.1. El sistema de cordilleras en Colombia

Un aspecto de trascendental importancia para el fenómeno sísmico en Colombia es la presencia del sistema andino de cordilleras en el país, ya que representan no solo la zona de mayor actividad sísmica a nivel superficial, si no que coinciden con las zonas más densamente pobladas y donde se concentra gran parte de la cadena económica productiva.

De una manera muy simple podemos mencionar que el origen de las cordilleras en Colombia es similar al origen de todo el sistema andino, esto es terrenos acrecionados con bloques en levantamiento continuo, debido a la acción de los sistemas de subducentes de placas entre sí que deforman la corteza.

Tratar de resumir la secuencia exacta de la formación de las cordilleras en unas cuantas líneas no solamente puede ser realmente confuso para el lector, dada la larga duración del fenómeno y los continuos cambios de dirección de las fuerzas, lo que genera tiempos en los cuales grandes territorios fueron levantados durante varios millones de años, para luego bascular y ser deprimidos y posteriormente durante varios millones de años más fueron nuevamente comprimidos y volvieron a ser alzados.

En síntesis, podemos ver y entender el fenómeno desde una perspectiva general y no particular puntual. En ese sentido podemos observar en la parte (a) de la **Ilustración 35** que hace 15 millones de años atrás el bloque componente de las cordilleras occidental y central correspondiente al macizo central andino proveniente del norte de Ecuador, es empujado hacia el oriente por la acreción del Bloque Panamá-Choco, en ese tiempo la cordillera oriental no existía. Entre los 12 millones de años atrás y los 6 millones de años atrás, el empuje de la Placa Caribe sobre el Cratón Amazónico (Escudo de las Guayanas) genera el levantamiento de la cordillera oriental, la cual corresponde a la cordillera más joven del país, esta situación se puede observar en la parte (b) de la **Ilustración 35**, la cual corresponde a un período aproximado de 5 millones de años, entre 6 y 1

millón de años atrás, la situación se ha mantenido en el último millón de años con cambios menores a como la observamos ahora.

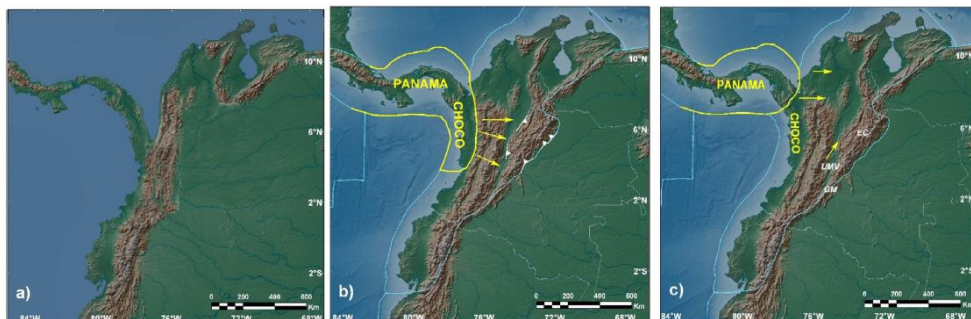


Ilustración 36. Formación del Sistema de Cordilleras en Colombia a) 12 a 15 Millones de años atrás b) 6 a 1 Millón de años atrás c) Tiempo Presente
[Fuentes: Adaptado de (João O.S. Santos, 2019) y (Fabio, 2019-2)]

Obviamente en las descripciones anteriores no se ha mencionado el efecto del clima, la hidrografía y el vulcanismo, los cuales modifican el relieve de manera significativa, especialmente en zonas de alta actividad.

3.2.2. Sistemas de fallas en Colombia y fuentes sismogenicas

Como se mencionó anteriormente, la conformación del territorio colombiano nos permite de manera general identificar los grandes sistemas de fallamientos existentes en el territorio nacional, igualmente nos permite entender el origen de nuestros sismos y por supuesto donde podemos esperar los eventos sísmicos futuros.

Para esto obsérvese en **Ilustración 37** que el desplazamiento de las placas tectónicas, la conformación de la subducción y el empuje de los territorios de acreción conforman en síntesis los grandes sistemas de fallas del país y las fuentes sismogénicas o generadoras de sismos.

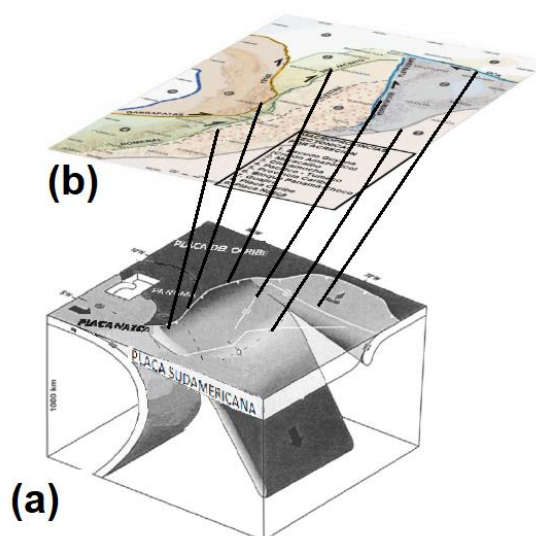


Ilustración 37. Origen primario de los grandes sistemas de Fallas del País de Colombia [Fuentes: Adaptado de (João O.S. Santos, 2019) y (Fabio, 2019-2)]

Se generan dos tipos principales de fuentes potenciales generadoras de sismos:

- La zona de subducción, la cual podemos dividir en 3 subzonas dependiendo de la profundidad y localización de los sismos que esta genera.
- Fallas de tipo cortical o superficiales, las cuales generan

3.2.2.1. Subducción

Respecto a la subducción debemos entender que debido a la convergencia de las 3 placas en la esquina noroccidental de suramerica, la subducción en nuestro país tiene unas complejidades importantes y que dificultan de manera significativa la clara identificación de los sismos.

En primera instancia la velocidad de desplazamiento relativo entre las placas Nazca y Suramericana es del orden de 6 a 7 por año, lo que implica una mayor acumulación de energía de deformación en intervalos de tiempos más cortos, generando mayor actividad sísmica y sismos potencialmente más grandes, esto se puede ver en la parte (a) y (b) de la **Ilustración 37**.

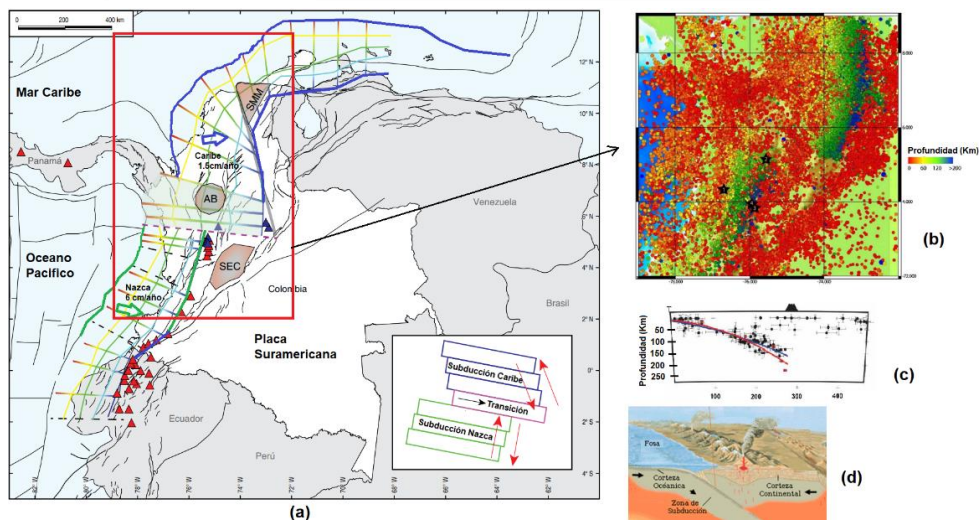


Ilustración 38. Subducción en el Territorio Colombiano (a) Zonas de Subducción Placa Nazca-Placa Suramericana y Placa Caribe-Placa Suramericana (b) Localización y Profundidad de los sismos (En Verde y Azul – Sismos Correspondientes a Subducción) (c) Corte Longitudinal para 4N-6N, se aprecia el perfil de Subducción Nazca-Suramericana (d) Representación Esquemática Subducción Nazca-Suramericana. Adaptados de las Referencias (ver comentario) [Fuentes: a) (Vargas, 2020), b) y c) (Monsalve, Valencia, Cano, & Vargas, 2018), d)Wikimedia commons,2005 de (USGS, 1997)]

De otra parte, la Placa Caribe tiene un desplazamiento respecto a la placa Suramericana de solo 1 a 1.5 cm por año con un componente de 87 grados, lo cual implica no solo una menor cantidad de energía acumulada si no una disminución de la misma debido a que el choque no es directo si no más tangencial como se observa en la parte (a) de la **Ilustración 38**.

Si se comparan los desplazamientos relativos de las placas es evidente que el fenómeno de subducción potencialmente peligroso para el país corresponde al de la Placa Nazca-Suramericana, el cual afecta toda la costa pacífica y la parte central del país.

Un punto de interés particular corresponde al denominado Nido de Bucaramanga el cual se encuentra localizado en 6.8N y 73.1 (Zarifi Z., 2007) la zona de mayor actividad sísmica se concentra a una profundidad promedio de 150 km, esta zona representa la mayor fuente sismogénica por densidad de volumen en toda Colombia e incluso uno de los mayores a nivel

mundial, su proyección sobre la superficie está cerca de Umpala y Cepita (Santander).

Para tener una idea de la cantidad enorme de sismos que se concentran en esta zona, por ejemplo en el territorio nacional entre 1993 y 2018 fueron registrados 114778 sismos con profundidades mayores a 100km, de estos 93226 sismos fueron registrados en un área de 50km alrededor de Bucaramanga lo cual implica que más del 81% de los sismos con profundidades mayores a 100km registrados por la Red Sismológica Nacional se presentan en esta pequeña área, con una tasa promedio de más de 10 sismo al día.

Diversas hipótesis se manejan respecto a la naturaleza del Nido de Bucaramanga, la más aceptada hasta el momento es que se trata de la zona de contacto de dos bloques de placas, la primera de ellas es la parte sur de la Placa Caribe y la segunda es la parte norte de la Placa Nazca, el Nido de Bucaramanga se encuentra dentro de la parte correspondiente a la Placa Nazca.

En la **Ilustración 39** se muestra el modelo esquemático de la zona de colisión acorde a (Zarifi Z., 2007) y la distribución de sismos en profundidad usando datos de la Red Sismológica Nacional de Colombia del Servicio Geológico Colombiano.

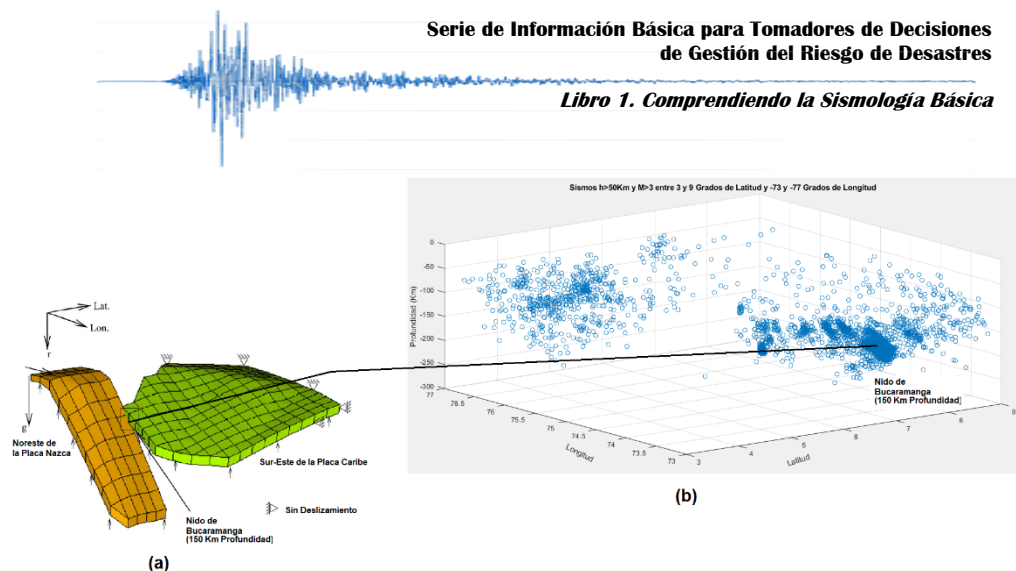


Ilustración 39. Nido de Bucaramanga (a) Zonas de Contacto entre Placa Nazca-Placa Suramericana y Placa Caribe-Placa Suramericana (b) Localización de los sismos con $M > 3$ y Profundidades Mayores de 50Km. 1993-2018 Fuente: (a) Zarifi Z., Havskov J., Hanyga A., *An insight Into the Bucaramanga Nest., Tectonophysics, Volume 443, 2007, Elsevier, doi:10.1016/j.tecto.2007.06.004* (b) Generado por los Autores con datos del SGC

Hasta la fecha el sismo registrado de mayor magnitud corresponde a un 6.4 en 1994, sin embargo, debido a que la mayor parte de los sismos tienen profundidades mayores a 100Km los daños ocasionados no han sido extremos. La información disponible es escasa para el fenómeno que se presenta en el Nido de Bucaramanga y solo hay 5 nidos sísmicos más a nivel mundial, de los cuales solo 2 tienen características similares al Nido de Bucaramanga. Se requiere por lo tanto la ejecución de estudios que permitan establecer con mayor precisión la naturaleza del Nido de Bucaramanga y el verdadero nivel de peligrosidad sísmica del mismo.

3.2.2.2. Fallas superficiales o corticales

Como se ha mencionado con anterioridad la acción de los empujes de las placas tectónicas, generan también fallamientos a nivel más superficial, dichas fallas las conocemos como fallas corticales o fallas en superficie.

Se debe entender primero el concepto de sistema de fallas, el cual en esencia es la agrupación de una enorme cantidad de fallas menores que tienen una orientación predominante, sin que se trate de una falla única como tal.

Por ejemplo, referente a la parte (b) de la **Ilustración 40**, el sistema Cauca – Romeral el cual obedece a la sutura entre el bloque Tumaco y los bloques

Chicamocha (en algunos textos referido como chibcha) y Caribe, corresponde a una gran cantidad de fallas menores que tienen una orientación Sur-Norte principalmente, pero que puede tener en algunos tramos fallas menores de tipo oblicuo e incluso transversales y unirse o traslaparse con otros sistemas, como en este caso con el Sistema Garrapatas y Uraba-Dabeida-Choco, esta situación se muestra en la

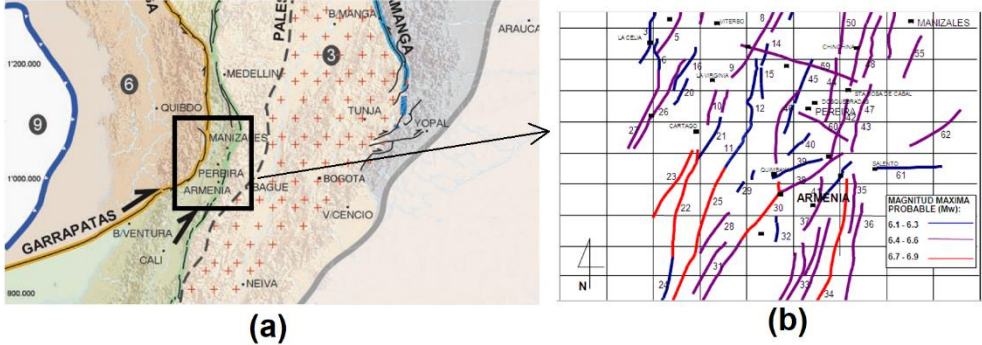


Ilustración 40.

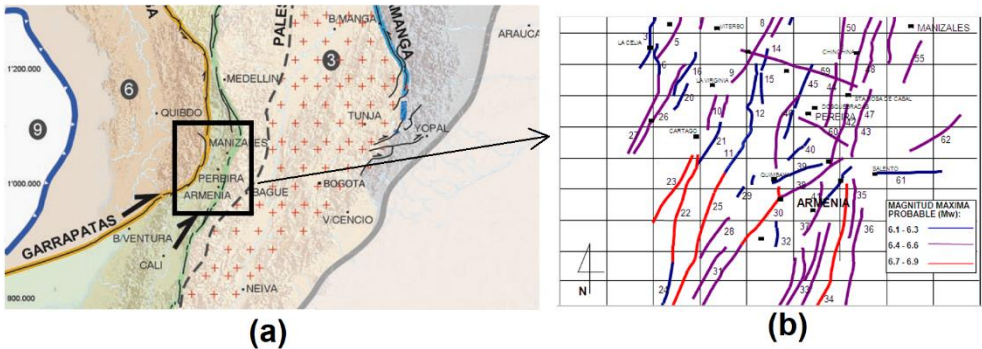


Ilustración 40. Sistema de Fallas de Romeral a la altura de la zona del Eje Cafetero. (a) Provincias Tectónicas (b) Fallas locales y Magnitudes Máximas Probables componentes del Sistema Romeral en la zona del Eje Cafetero
[Fuentes: Adaptado de (João O.S. Santos, 2019) y (Fabio, 2019-2)]

Teniendo en cuenta que el Libro está dirigido principalmente para tomadores de decisiones de gestión del riesgo de desastres en Colombia, se hace una presentación general de los principales sistemas de fallas que inciden en el territorio y con ello se pueden identificar aquellos sistemas que son preponderantes para una región o departamento específico.

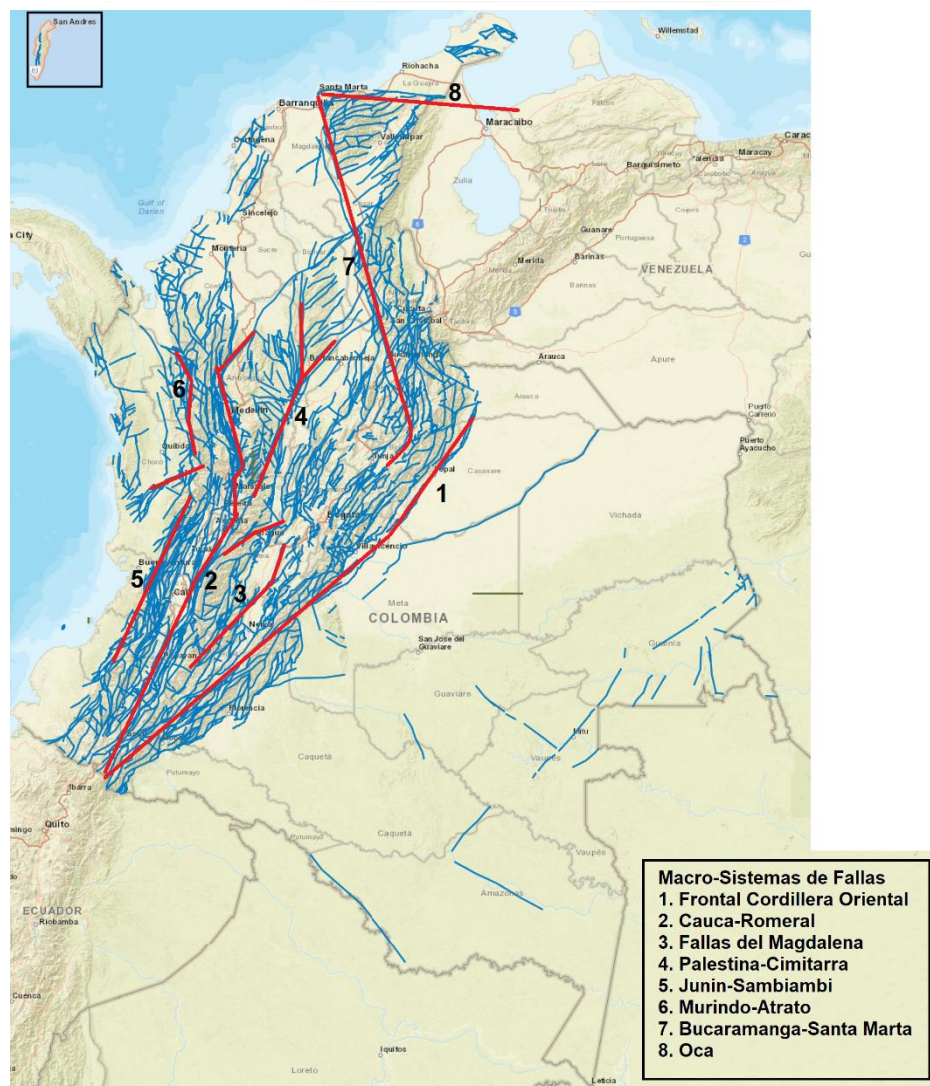


Ilustración 41. Macro-Sistemas de Fallas para Colombia
[Fuentes: Adaptado de (João O.S. Santos, 2019) y (Fabio, 2019-2)]

Respecto a las fuentes corticales o superficiales, en la **Ilustración 41** se destacan 8 de los Macro-Sistemas de Fallas de Colombia, los cuales como ya se mencionó corresponden a la agrupación de una enorme cantidad de fallas pequeñas locales (ver **Ilustración 41**), las cuales dependiendo principalmente de su longitud de ruptura pueden generar sismos desde magnitudes muy pequeñas, hasta eventos que no siendo muy grandes desde el punto de vista de liberación de energía, pueden ser enormemente

destructivos debido a su cercanía con los centros poblados, tal es el caso de los eventos de Popayán de 1983 y Armenia de 1999.

Finalmente, en **Ilustración 42** se presentan la agrupación de todas las fuentes sismogénicas para Colombia, destacándose que las fuentes 3,4,5,6,25, 35, 36 y 37 corresponden a fuentes sismogénicas de subducción y las demás fuentes corresponden a fuentes superficiales o corticales.

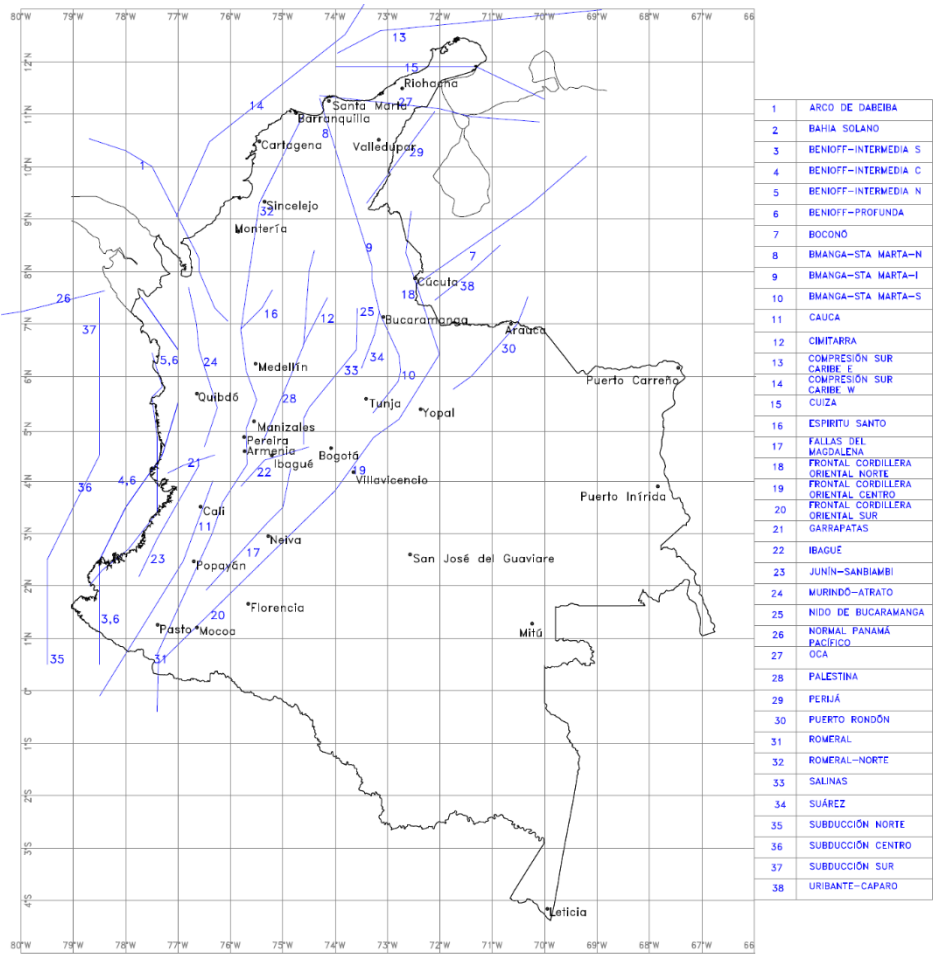


Ilustración 42. Sistema Completo de Fuentes Sismogénicas de Colombia
[Fuente: Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia - 2009., Asociación (AIS, 1984)].

En la Ilustración 28 de puede observar claramente la coincidencia los sismos superficiales ($H < 30$ Km) con los principales sistemas de fallamiento

corticales y la coincidencia de los sismos de profundidad intermedia ($30\text{Km} < H < 60\text{Km}$) y profunda ($H > 60\text{Km}$) con las zonas de subducción.

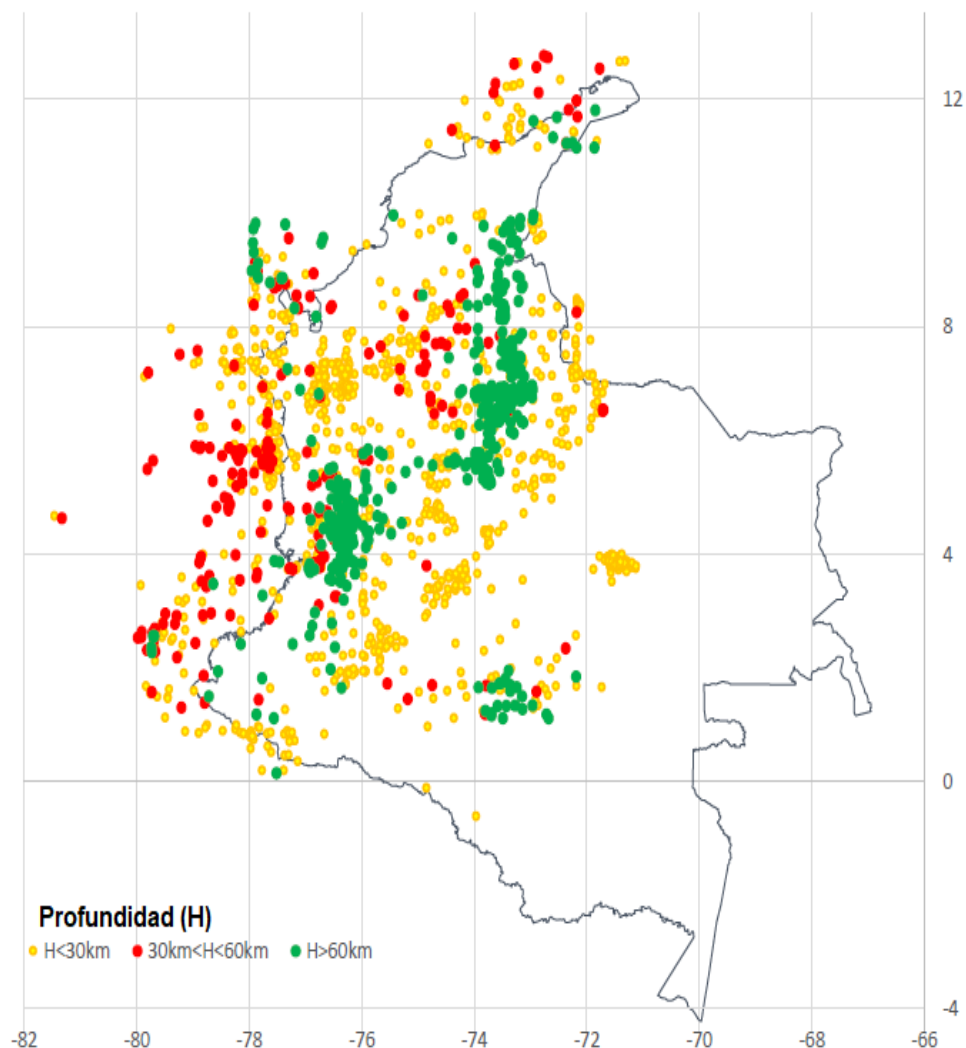


Ilustración 43. Localización de Sismos Acorde a la Profundidad
[Fuente: (Yela, 2019)]

Las discusiones anteriores nos permiten sintetizar que un aspecto de trascendental importancia para el fenómeno sísmico en Colombia es la

presencia del sistema andino de cordilleras en el país, ya que representan no solo la zona de mayor actividad sísmica a nivel superficial, si no que coinciden con las zonas más densamente pobladas y donde se concentra gran parte de la cadena económica productiva del país.

Comprendiendo la Sismología para Gestores del Riesgo

Resumen de Aspectos Generales de Sismotectónica, que debe tener en Cuenta el Tomador de Decisiones en Gestión del Riesgo de Desastres

[1] En el territorio colombiano confluyen tres placas tectónicas, que se desplazan continuamente entre sí.

[2] Los territorios de la Orinoquia y Amazonia limitados cerca al piedemonte de la cordillera oriental corresponden al antiguo cratón que hizo parte alguna vez de la Pangea y posteriormente de la Gondwana, los demás territorios corresponden a acreciones y bloques que se fueron uniendo empujados por desplazamiento de las placas.

[3] Se presentan básicamente dos zonas de subducción, la primera y más activa es la generada entre la placa Nazca y la Suramericana y la segunda la generada entre la Placa Caribe y la Suramericana.

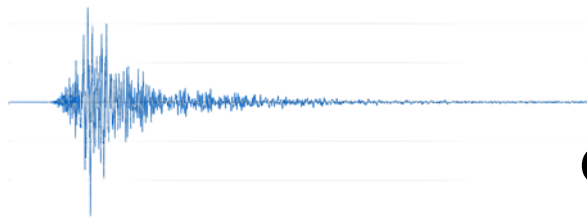
[4] La zona de subducción Nazca-Suramericana tiene el mayor potencial de producir sismos fuertes, generando tres tipos de sismicidad: La trinchera, sismicidad intermedia (Benioff intermedia) y sismicidad profunda (Benioff profunda).

[5] Un punto de contacto entre las placas Nazca, Caribe y Suramericana de particular interés es el Nido de Bucaramanga, el cual se encuentra a una profundidad media de 150Km y constituye una de las zonas donde se producen más sismos en promedio por día a nivel mundial.

[6] Las zonas de unión entre los diferentes bloques acrecionados y el cratón de la amazonia, generan fallas de tipo cortical superficial, las cuales tienen la capacidad de producir sismos que, aunque siendo de menor magnitud a los sismos de subducción, pueden generar grandes daños debido a que se encuentran más cerca de los centros poblados.

[7] Existen mapas a nivel nacional y regional que muestran la ubicación de los sistemas de fallas, se debe tener especial cuidado en el hecho de que los sistemas de fallamiento mostrados en los mapas nacionales, generalmente obedecen a la agrupación de subsistemas o fallas más pequeñas de tipo local y no representan el trazo de fallas únicas en el terreno.

[8] Cuando se tienen proyectos especiales como represas, puentes de gran envergadura o cuando existen zonas con movimientos de remoción en masa, es importante la ejecución de estudios puntuales de la zona, que permitan conocer las fallas corticales locales con exactitud y su potencial para producir sismos.



CAPÍTULO IV. AMENAZA SÍSMICA

4.1. CONCEPTO Y USO DE LA AMENAZA SISMICA

Hasta este punto tenemos claro el origen de los sismos y los efectos que pueden traer sobre nuestras ciudades, también sabemos a nivel nacional donde están y por qué se localizan ahí las principales fuentes sismogénicas.

El aspecto final desde el punto de vista de sismología básica es: ¿para qué nos sirve esa información y cómo podemos usarla para nuestro quehacer profesional dentro del ámbito de gestión y mitigación del riesgo?

Para resolver esta inquietud debemos primero tener claro es recordar de acuerdo a lo estudiado en los capítulos anteriores, que uno de los principales efectos de los sismos es que estos nos generan vibraciones en el suelo que llegan a nuestras edificaciones.

Estas vibraciones desde el punto de vista ingenieril nos producen aceleraciones en el terreno y conforme a la segunda Ley de Newton para cuerpos de masa constante (como un edificio, por ejemplo), la fuerza que se genera sobre este debido a la aceleración del terreno será:

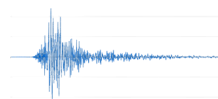
$$F=m*a$$

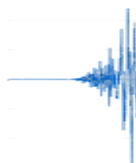
Donde:

F: Fuerza

m: masa (Kg)

a: Aceleración del terreno (m/sec²)





Si consideramos la masa de la estructura constante durante el sismo, podemos ver que la Fuerza que se aplicara a la estructura terminara dependiendo de la aceleración.

Aunque el análisis realizado es correcto, el problema del efecto del sismo sobre la estructura es un poco más complejo, debido a que adicional a la aceleración del terreno producida por el sismo, también es necesario involucrar en el problema la relación que existe entre el contenido frecuencial del sismo y las frecuencias de vibración de la estructura, además de la duración del sismo.

Sin embargo, a partir de la ecuación $F=m*a$, usando un enfoque simple, resulta evidente la relación directa que existe entre la aceleración del terreno y la fuerza que tendrá que resistir la estructura.

La masa de la estructura (edificio, puente etc.) la podemos calcular de forma directa, ya que la masa es todo lo que compone la edificación (Recordar que la masa es la suma total del peso de columnas, vigas, losas de entrepiso, muros etc., dividida entre la gravedad ($g=9.81 \text{ m/sec}^2$)), por lo tanto, la masa en sí, es una variable que conocemos o podemos determinar con relativa facilidad.

Ya que la masa la conocemos entonces si queremos diseñar una estructura para que pueda resistir los sismos, es necesario conocer la aceleración que consideramos podrá ocurrir en el sitio donde se encuentra la edificación.

Este es el concepto básico de amenaza sísmica que nos interesa manejar en el texto, esto es la amenaza sísmica desde un punto de vista práctico es el cálculo de la aceleración máxima que podemos esperar para un sitio específico, con el fin de poder obtener las fuerzas básicas para poder diseñar estructuras que sean capaces de resistir dichos sismos.

Es importante clarificar que, en un estudio de amenaza sísmica, existen otras variables que se pueden calcular también en lugar de la aceleración, como es el caso de la velocidad (la cual juega un papel determinante en los daños en tuberías durante sismos) o el desplazamiento.

Sin embargo, desde el punto de vista legal para el caso que nos ocupa, la Amenaza Sísmica quedo definida dentro de la Ley 400 de 1997 como:



“Amenaza sísmica. Es el valor esperado de futuras acciones sísmicas en el sitio de interés y se cuantifica en términos de una aceleración horizontal del terreno esperada, que tiene una probabilidad de excedencia dada en un lapso de tiempo predeterminado.” (Congreso de la República Ley 400 de 1997)

Estipulado lo anterior, dentro de este capítulo revisaremos el cálculo de la amenaza sísmica, tal cual lo define la Ley 400 de 1997, esto es como la evaluación de la aceleración máxima que podemos esperar en un sitio en un tiempo determinado y con una probabilidad de ser excedida especificada.

4.1.1. Métodos de Evaluación de la Amenaza Sísmica

Existen dos métodos básicos para evaluar la amenaza sísmica:

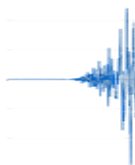
- Métodos Deterministas
- Métodos Probabilistas

A continuación, se realizará una breve descripción de cada uno de los dos métodos enunciados, haciendo énfasis en los métodos probabilistas, debido a que son los más usados.

4.1.1.1. Métodos Deterministas

Los métodos deterministas abordan la problemática intentando resolver el problema de manera “exacta”, esto es se considera el máximo sismo posible que se pueda presentar en el sitio de interés, usando para ello la información científica disponible principalmente calculando dicho sismo a partir de la información sismotectónica o usando los registros sísmicos mayores o relevante que existan para la zona o región.

Lamentablemente la información disponible tanto a nivel sismotectónico como instrumental para el caso de Colombia es escasa en el primer caso y con una ventana de tiempo extremadamente pequeña en el segundo (la Red Sismológica de Colombia del Servicio Geológico Colombiano, solo posee información registrada de sus propios instrumentos desde la década de los 90s, por lo tanto con solo 30 o 40 años de registro, no podemos decir que hemos registrado los mayores sismos que pueden ocurrir en el territorio). Esta escasa información instrumental se puede completar con información histórica, la cual ha sido compilada rigurosamente a partir de registros escritos y narrados, (Espinosa B., 2004), existen muchos eventos sísmicos



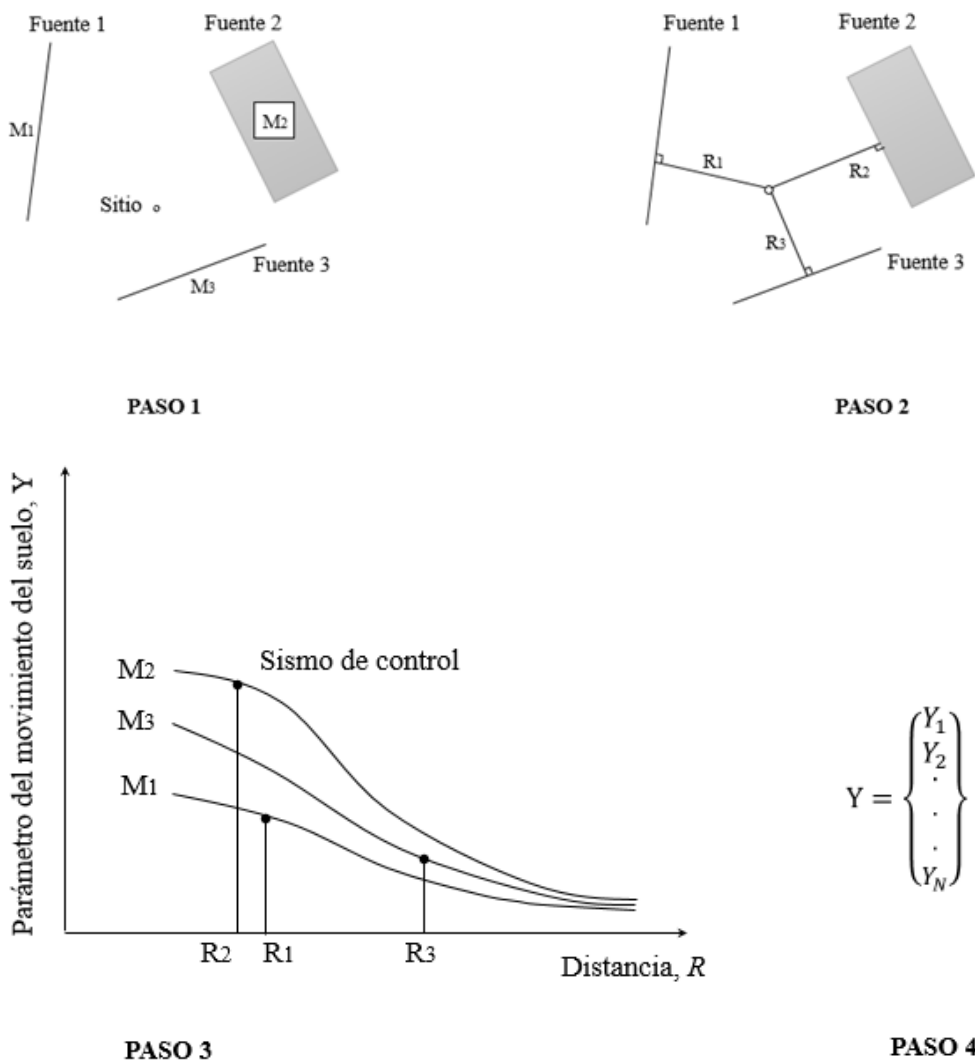
que no tuvieron registro histórico, ocurrieron en zonas poco pobladas, o fueron eventos superficiales que siendo importantes la atenuación no les permitió ser sentidos por la población a grandes distancias.

De otro lado la cantidad disponible de estudios de sismotectónica y neotectónica aún es escasa y no cubre todo el territorio, se requieren más proyectos de investigación que enfoquen el problema, por lo tanto, tampoco usando sismotectónica se tiene un registro completo de los sismos importantes que han ocurrido en el país.

Con estas limitaciones en mente, podemos decir que lo primero que debemos hacer para evaluar la amenaza sísmica con un método determinista es calcular la magnitud del mayor sismo posible para cada una de las fuentes sismogénicas en el área de influencia (esta área puede ser un círculo o polígono con centro en el sitio de interés), para el caso de áreas circulares, es usual tomar un radio de 300Km.

Mediante el uso de líneas, áreas o volúmenes se representan las fuentes sismogénicas de la región y utilizando la información de distancia a la fuente y la magnitud máxima, se calcula la aceleración máxima que ocurrirá en el sitio de interés, usando para ello ecuaciones de atenuación de la amplitud del movimiento con la distancia.





Usando la **Ilustración 44**, podemos sintetizar los pasos para la evaluación de la amenaza sísmica así (Monsalve & Cano, 2019):

- Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas capaces de producir movimientos de suelo significativos para un sitio. La caracterización de la fuente incluye la definición de cada fuente en geometría y potencial sísmico.

- Selección de la distancia de la fuente al sitio como parámetro de cada zona sísmica. En un análisis determinista se toma la menor distancia entre la fuente y el sitio. La distancia puede ser expresada como distancia epicentral o distancia hipocentral dependiendo de la ecuación de predicción usada en el siguiente paso.
- Selección del sismo de control (el sismo que se considera va a producir el mayor nivel de sacudimiento), expresado generalmente en los mismos términos que el movimiento de suelo, para el sitio. La selección es hecha para comparar los niveles de sacudimiento producidos por el sismo (definidos en el paso 1) asumiendo que ocurran a las distancias identificadas en el paso 2.
- La amenaza para el sitio es definida, usualmente en términos del movimiento de suelo producidos para el sitio, pero del mismo control. La amenaza puede ser expresada en términos de la aceleración (A_m), la velocidad (V_m), aceleración espectral (A_s), entre otros.

4.1.1.2. Métodos Probabilistas

Como se mencionó anteriormente uno de los principales problemas que tiene la evaluación de la amenaza sísmica por métodos deterministas es precisamente establecer de manera precisa el máximo sismo para la fuente que se considera de control, debido a la ausencia de información suficiente tanto sismotectónica como de registros sísmicos.

Para subsanar este inconveniente una solución alternativa al problema consiste en asumir que la amenaza sísmica en un sitio no depende de una fuente única si no que es el producto de la contribución o aporte de muchas fuentes a dicha amenaza, este enfoque se denomina cálculo de la amenaza sísmica probabilista (PSHA, por sus siglas en inglés).

El método probabilista es el enfoque que se ha utilizado en el país por diferentes grupos de investigadores del tema (AIS 1983., AIS 1998, Cano et. Al 2001., AIS 2009., SGC 2010, SGC 2013) y por ello vamos a realizar

un análisis del mismo. [Referencias: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS., Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia.,

El respaldo matemático del enfoque probabilista, se basa en que un cuando un evento que suceda puede ser producido por muchas causas con efectos iguales o similares, la probabilidad de su ocurrencia se puede calcular como la suma de las probabilidades de cada una de las causas que pueden generar el evento, esto se conoce como el teorema de la probabilidad total, el cual se puede expresar para el cálculo de la amenaza sísmica como:

$$\lambda[X \geq x] \approx \sum_{\text{fuentes } i} \int_{M_0}^{M_{MX}} \int_{R|M} P[X \geq x|M, R] f_M(m) f_{R|M}(r|m) dr dm$$

Donde $\lambda[X \geq x]$ es la frecuencia anual que el movimiento de suelo para un sitio excede el nivel seleccionado $X \geq x$; v_i , es la tasa anual de ocurrencia sobre la fuente sísmica, considerando magnitudes entre M_0 y M_{MX} , donde M_0 es la magnitud mínima de interés en ingeniería y M_{MX} es la máxima magnitud asumida que pueda ocurrir sobre una fuente; $P[X \geq x|M, R]$ denota la probabilidad condicional que el nivel del movimiento de suelo seleccionado sea excedido por una determinada magnitud y distancia; $f_M(m)$ es la función de densidad de la probabilidad de la magnitud sísmica; $f_{R|M}(r, m)$ es la función de la densidad de la probabilidad de la distancia de la fuente para el sitio de interés.

Estas expresiones se solucionan para cada fuente sísmica de un modelo sismotectónico.

Una vez la tasa anual de excedencia es conocida, la probabilidad que el parámetro de un movimiento de suelo observado sea mayor o igual al valor en los próximos t años (el periodo expuesto) es fácilmente computado por la ecuación:

$$P[X \geq x] = 1 - e^{-t\lambda[X \geq x]}$$

Donde el periodo de retorno de x está definido como:

$$R_X(x) = \frac{1}{\lambda[X \geq x]} = \frac{-t}{\ln(1 - P[X \geq x])}$$

Para clarificar el concepto básico de probabilidad total, por ejemplo revisemos la **Ilustración 45**, donde podemos observar que el mismo nivel de aceleración en el sitio de interés (parte (b) de la Ilustración), puede ser generado por dos fuentes distintas, una Fuente 1, localizada a 150Km que genera un sismo de magnitud 7.0 o también por una Fuente 2 que genera un sismo de solo magnitud 5.0, pero al estar localizada solo a 25Km del sitio de interés, produce la misma aceleración en el sitio. Por lo tanto, la probabilidad de que un nivel de aceleración en el sitio se pueda alcanzar en un periodo de tiempo determinado, se puede calcular como la suma o contribución de la probabilidad de cada una de las fuentes en generar el sismo que produce para dicha fuente una magnitud tal que en el sitio se alcance el mismo nivel de aceleración objetivo en dicho tiempo de exposición.

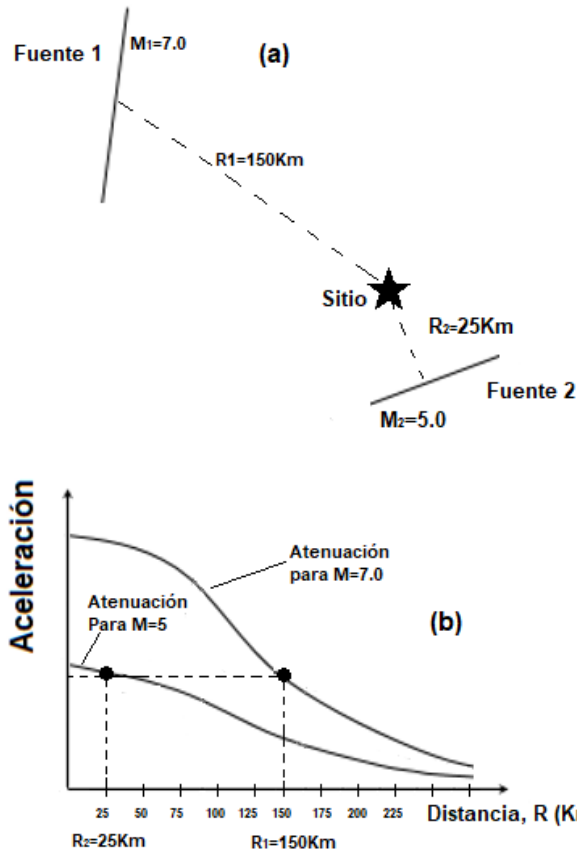


Ilustración 45. Relación Esquemática entre Magnitud, Distancia y Atenuación de la Aceleración para el Cálculo de Amenaza (a) Distancia de las Fuentes al Sitio. (b) Atenuación de la Aceleración con la Distancia.
 [Fuente: Reiter L., *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, Columbia University Press., 1990].

El cálculo de la amenaza sísmica por métodos probabilistas se presenta esquemáticamente en la **Ilustración 46**:

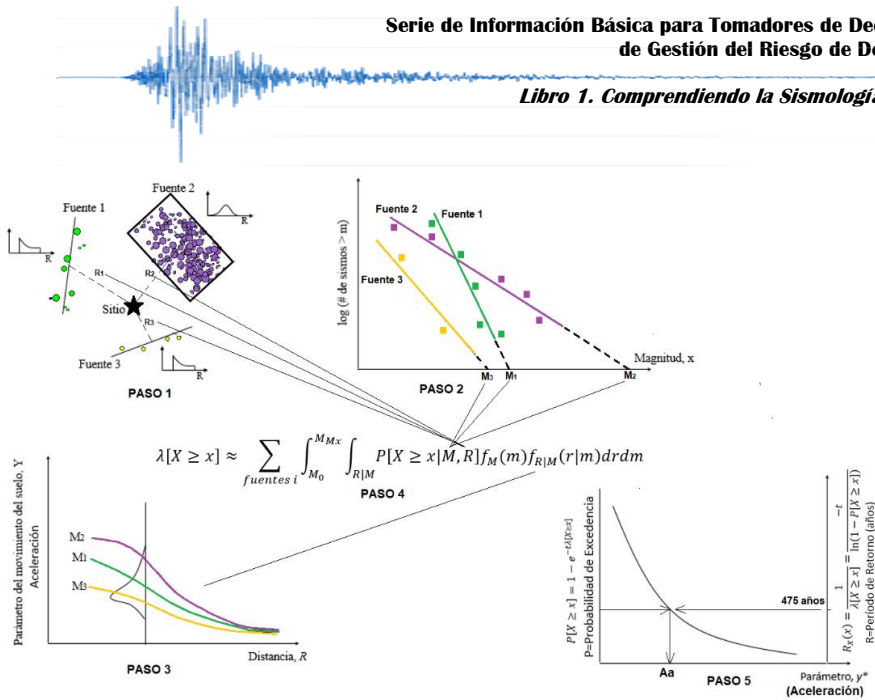


Ilustración 46: Pasos esquemáticos del procedimiento para evaluar la Amenaza Sísmica en un Sitio.

[Fuente: Reiter L., *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, Columbia University Press., 1990].

A continuación, se explicará el procedimiento de evaluación de la amenaza y se realizarán los comentarios de los aspectos relevantes de cada paso y sus incertidumbres:

Paso 1: Identificación de Fuentes Sísmogénicas y Catálogo Sísmico

Se identifican las fuentes sísmogénicas que pueden producir sismos dentro de un área o radio de influencia, usualmente entre 300Km y 500Km. Para esta explicación tomamos como ejemplo 3 fuentes.

A cada una de estas fuentes se le asignan los sismos del catálogo sísmico que le corresponden (en la gráfica identificados como sismos de color verde para la fuente 1, de color morado para la fuente 2 y amarillos para la fuente 3).

Incertidumbres del paso 1:

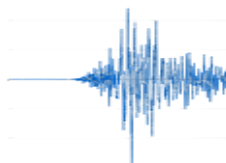
Las principales incertidumbres que pueden conducir a errores o inexactitudes posteriores en la evaluación de la amenaza sísmica es que en primer lugar la identificación de las fuentes en una zona casi nunca es completa o conocida totalmente, lo cual puede conducir a generalizaciones o simplificaciones sobre la geométricas de las fuentes debido a la falta de información sismotectónica de la zona.

De otra parte, las redes sismológicas en Colombia, son muy recientes y en muchos casos con baja cobertura para algunas zonas y se ven enfrentadas a muy bajos presupuestos para funcionamiento y operación, problemas de vandalismo que pueden sacar de operación estaciones durante lapsos de tiempo considerables, sin mencionar zonas con problemas de orden público e influencia de grupos al margen de la Ley, que imposibilitan la implementación de programas de mantenimiento adecuados. Lo anterior genera problemas de completitud de los catálogos y problemas en la localización de los sismos, principalmente en profundidad por falta de cobertura adecuada o modelos de velocidad en la corteza aun incompletos o por refinar. Estos problemas de localización conducen muchas veces a que algunos sismos son asignados erróneamente a fuentes que no los produjeron, modificando la peligrosidad individual de las fuentes sismogénicas.

El catálogo de registros propios de la Red Sismológica de Colombia contiene sismos solo a partir de 1993 y un catálogo unificado con 34681 sismos incluidos históricos e instrumentales desde 1610 hasta 2014, el cual ha sido utilizado para la evaluación de la amenaza sísmica [Referencia: Servicio Geológico Colombiano., 2020: www.sgc.gov.co]. La información instrumental data solo de la década de 1960.

Paso 2: Cálculo de la Ley Gutenberg-Richter o Regresión de Magnitudes.

Con los sismos asignados en el paso 1, para cada una de las fuentes se puede construir una gráfica de recurrencias de magnitudes o gráfica Gutenberg-Richter (G-R) (Gutenberg & Richter, 1956), también conocida como Ley G-R, en la cual en el eje vertical se toma el número de sismos que exceden una magnitud determinada y en el eje x la magnitud (en este caso los puntos en forma de cuadrado con el color correspondiente). Con cada una de la serie de puntos correspondiente a cada fuente, se calcula mediante regresión



una línea recta, conocida como Línea G-R o a menudo como línea de peligrosidad sísmica de la fuente. (Gutenberg & Richter, 1956).

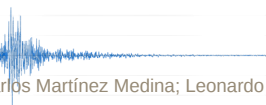
Se ha demostrado que la Ley G-R es válida incluso para sismos en la Luna o Lunamotos y ha sido utilizada para probar entre otras cosas, que debe existir agua o fluidos en el interior lunar, ya que la asociación de la Ley G-R con sismos producto de choques de meteoritos, sismos térmicos y sismos profundos por presión y variación de la órbita Lunar al acercarse o alejarse de la tierra así lo demuestran (Crampin & Gau, 2015).

La línea G-R desempeña un papel fundamental en la evaluación de la amenaza sísmica, ya que define varios parámetros de transcendental importancia entre los cuales podemos mencionar:

- La magnitud máxima instrumental de la fuente (Llamada así porque es calculada a partir de los sismos registrados por la red sismológica), la cual se determina como el corte de la línea de regresión G-R con el eje horizontal (líneas punteadas en el Paso 2 de la Ilustración 31), esta magnitud para cada fuente se ingresa como valor máximo de integración de magnitud en la integral del Paso 4 (M_{mx}).
- El parámetro β , el cual corresponde a la pendiente de la línea de regresión y de alguna manera indica la peligrosidad de la fuente, para el ejemplo que nos ocupa la fuente con mayor peligrosidad en este caso sería la fuente denominada como Fuente 2.

Incertidumbres del paso 2:

Debido al mismo problema de la poca cantidad de años de operación de la Rede Sismológica Nacional, los sismos registrados, aunque bastantes en cantidad, representan una ventana de tiempo de observación muy corta, si a esto le sumamos el hecho de que se pueden tener problemas de localización en profundidad para eventos de magnitudes pequeñas, es muy factible que la asignación de sismos a fuentes corticales superficiales sea problemática en algunas partes del territorio. También la eliminación de las réplicas es importante debido a que tener muchas replicas dentro del análisis tiende a verticalizar la línea de regresión, disminuyendo la peligrosidad de la fuente en estudio.



Todo lo anterior conduce a que en ocasiones, la magnitud instrumental máxima calculada mediante la Ley G-R puede no ser coherente o representativa de la falla, debido precisamente a la poca o escasa cantidad de sismos registrados con magnitudes medianas o grandes para una fuente, en estos casos es frecuente que dicha magnitud instrumental sea comparada y complementada con información de sismos históricos o con estudios de neotectónica para determinar el valor a usar en el cálculo de la amenaza sísmica.

Paso 3 Ecuaciones de Atenuación:

La energía que se propaga a través de las ondas sísmicas, se atenúa con la distancia debido a muchas razones, entre ellas la atenuación geométrica, el amortiguamiento del medio, la interferencia, dispersión, fricción, calor y otros fenómenos.

Para entender el fenómeno de atenuación imagine que se un encuentra dentro de un auditorio escuchando a un orador, aquellas personas que se encuentran cerca del orador (Zona Roja de la **Ilustración 47**) van a escuchar la voz del orador más fuerte que aquellas personas que se encuentran retiradas del orador (Zona Amarilla de la **Ilustración 47**), la diferencia se debe a que la energía vibratoria (ondas sonoras producidas por el orador), al alejarse de la fuente de emisión (orador) debe cubrir un mayor volumen de aire y por lo tanto su magnitud respecto al volumen de aire va disminuyendo, esto se conoce como atenuación geométrica de ondas.

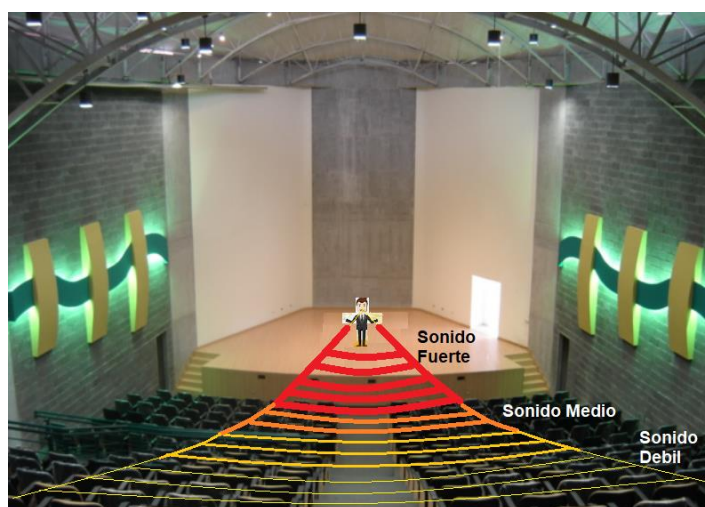
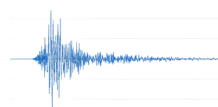
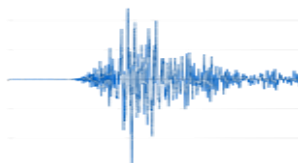


Ilustración 47: Atenuación de Ondas Sonoras con la Distancia.





Exactamente lo mismo sucede con las ondas sísmicas, las cuales al alejarse del hipocentro van disminuyendo su energía al tener que cubrir cada vez más un volumen mayor de espacio.

Las ecuaciones que predicen para un sismo el decaimiento de la aceleración, velocidad o desplazamiento del terreno conforme aumentan la distancia, se denominan ecuaciones de atenuación. Se puede decir que, aunque existen modelos generalizados para la formulación de estas ecuaciones, dada las particularidades especiales en cada región, se pueden obtener ecuaciones específicas de atenuación, las cuales pueden considerar entre otras variables (Magnitud, distancia, tipo de falla, mecanismo de ruptura, propiedades elásticas e inelásticas de la roca y muchos otros parámetros).

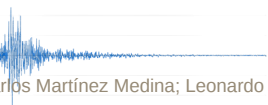
Para el caso de Colombia existen numerosos estudios y propuestas de diferentes curvas de atenuación que han sido calibrados usando datos de la Red Sismológica Nacional y de otras redes a nivel mundial.

En síntesis, para cada una de las fuentes se debe seleccionar las ecuaciones o curvas de atenuación, las cuales tienen en general el comportamiento mostrado en la Ilustración 30 (b) e Ilustración 31 (Paso 3), esto es la aceleración disminuye con el aumento de la distancia a la fuente que produjo el sismo.

Incertidumbres del paso 3:

Las ecuaciones de atenuación para una región se obtienen utilizando en general datos de estaciones acelerográficas, para lo cual Colombia cuenta con redes acelerográficas que cubren el territorio y otras redes ubicadas en ciudades capitales.

Al igual que la Red Sismológica, la Red Nacional de Acelerógrafos adscrita al Servicio Geológico Colombiano es muy reciente (1993) y por lo tanto la ventana de tiempo de captura de registros aún es muy pequeña. El otro aspecto es que de las 121 estaciones reportadas como activas por el SGC, solo 72 (60%) se encuentran en roca y por lo tanto son las únicas que son útiles para el cálculo de la atenuación a nivel de basamento rocoso, ya que el uso de estaciones sobre suelo, puede incluir efectos locales que si no



extraídos de la respuesta total pueden tergiversar el verdadero valor de la aceleración en el sitio. [Referencia: www.datos.gov.co].

No se desea en este texto básico profundizar en los aspectos técnicos del tema más allá de lo necesario para no hacer muy intrincado el tema, pero es importante resaltar el hecho de que la atenuación también depende del tipo de onda y su frecuencia y por lo tanto el tema tiene bastante complejidad física y matemática y cuando se reduce su comportamiento a una simple curva para toda una región solo en función de la magnitud y el tipo de fuente, se están haciendo simplificaciones de talla mayor, por lo tanto, el tema es objeto de amplia investigación y está aún lejos de ser resuelto.

Paso 4 Calculo de la Probabilidad de Excedencia:

Para determinar la probabilidad de que un valor de aceleración, velocidad o desplazamiento sea excedido en el sitio de interés, se utilizan diferentes modelos de probabilidad, siendo el más usado el modelo de Cornell (Cornell, 1968) y los trabajos de Der-Kiureghian y Ang (Der-Kiureghian A., 1977).

El procedimiento algorítmico implica la resolución para cada una de las fuentes de la siguiente integral doble, la cual es solucionada entre los límites de internos de distancia y la integral externa entre los límites menores y mayores de las magnitudes de cada fuente, el procedimiento se ha llevado a cabo usando programas computacionales como: EQ-Risk (R., 1976), Crisis (Mordaz, 1991), SeisRisk III (USGS, 1992)), OpenQuake ((Pagani, 2014)), R-Crisis 2017 (Ordaz, 2017), OpenSHA (Gupta N., 2019), los cuales lógicamente introducen cambios o ajustes a los algoritmos y las variables consideradas.

Incertidumbres del paso 4:

Uno de los principales problemas que tiene el cálculo de la amenaza sísmica es por el método probabilista, es que este se basa en un modelo de probabilidades de Poisson, lo cual implica que implícitamente se tiene una independencia temporal y espacial de los eventos, o sea que una falla cualquiera tiene la misma probabilidad de generar un evento aun cuando hace muy poco dicha falla haya generado un sismo, lo cual desde el punto de vista físico no parece ser totalmente cierto ni en tiempo ni en espacio, ya que la generación de eventos no es un fenómeno aislado e independiente y

por el contrario depende de la interacción entre los esfuerzos que se generan en las diversas fallas. Para subsanar esto en algunos estudios se adoptan distribuciones no equiprobables para las fallas, sin embargo, la información existente es escasa y los modelos que tengan en cuenta independencia temporal y espacial aún están en desarrollo.

Paso 5 Calculo de la Amenaza Sísmica:

El último paso implica determinar la curva de probabilidades de excedencia de aceleración, velocidad o desplazamiento, para diferentes períodos de exposición y con diferentes valores de ser excedidos.

El valor del período de exposición, así como la probabilidad de excedencia para Colombia quedan definidos por la Ley en función del tipo de edificación o el tipo de protección que se desee dar.

Por ejemplo, para protección contra colapso la NSR-10 en su literal A.2.2.1. determina que:

“A.2.2.1 — Los movimientos sísmicos de diseño se definen en función de la aceleración pico efectiva, representada por el parámetro A_a , y de la velocidad pico efectiva, representada por el parámetro A_v , para una probabilidad del diez por ciento de ser excedidos en un lapso de cincuenta años.”

Esto implica que el sismo de diseño para protección contra colapso tiene un período de retorno ($T_r=R_x$) de 475 años, el cual usando $t=50$ años (vida útil de la estructura) y excedencia del $P(X \geq 10\% = 0.1)$, se puede calcular así:

$$R_x(x) = \frac{1}{\lambda[X \geq x]} = \frac{-t}{\ln(1 - P[X \geq x])}$$

$$T_r = -50 / (\ln(1 - 0.1)) = 475 \text{ años}$$

Por otra parte, si lo que se busca es que la edificación deba seguir operando o funcionando después de un sismo (por ejemplo, para el caso de Hospitales), se entiende que estos deben ser capaces también de resistir sismos más frecuentes (pero menos intensos) sin que se produzcan daños que los saquen de operación. Estos sismos la norma los denomina sismos del umbral del daño y para definirlos la NSR-10 en su literal A.12.2.1 especifica que:

“A.12.2.1 — Los movimientos sísmicos del umbral de daño, se definen para una probabilidad del ochenta por ciento de ser excedidos en un lapso de cincuenta años, en función de la aceleración pico efectiva al nivel del umbral de daño, representada por el parámetro A_d . El valor de este coeficiente, para efectos del presente Reglamento, debe determinarse de acuerdo con A.12.2.2 y A.12.2.3.”

Esto significa que el período de retorno para el sismo del umbral de daño se puede calcular usando un $t=50$ años y una probabilidad de excedencia el 80% ($P[X>0.8]$), lo cual conduce a:

$$R_X(x) = \frac{1}{\lambda[X \geq x]} = \frac{-t}{\ln(1 - P[X \geq x])}$$

$$Tr=50/(\ln(1-0.8))=31 \text{ años}$$

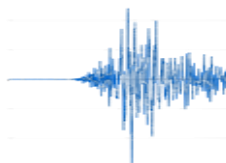
Como se observa son sismos cuya frecuencia de ocurrencia es más alta (menor período de retorno), y que la estructura obviamente podrá resistir, pero se obliga a que no le generen a la estructura daños que puedan hacer que esta salga de operación o funcionamiento.

Incertidumbre del paso 5:

Aunque parece resuelto por la Ley, uno de los temas controversiales en este paso y que genera bastante incertidumbre es fijar de antemano el período de exposición y la probabilidad de excedencia para una edificación o proyecto.

Por ejemplo, para el caso de edificaciones fijar el período de retorno del sismo contra colapso en 475 años, para el país viene desde el primer código de construcción nacional (Congreso de la Republica, 1984), sin embargo, si se modifica el tiempo de exposición o la probabilidad de excedencia se modifica la aceleración esperada y consecuentemente las fuerzas de diseño de la edificación.

La selección del tiempo de exposición y la probabilidad de excedencia está ligada a la importancia de la infraestructura (Por ejemplo entre una edificación de vivienda, un puente y una represa, la represa tiene mayor vida útil y se espera que por su importancia también tenga una menor probabilidad de falla, por ello podemos decir que su sismo de diseño es más fuerte, teniendo un mayor período de retorno entre 2500 y 3000 años, para el caso del puente y específicamente según el numeral 3.10.1 de la Norma

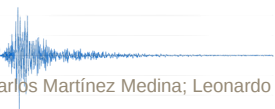


Colombiana de Diseño de Puentes – CCP – 2014, estos se diseñan para un sismo con período de retorno de 1000 años, la vivienda como ya se discutió se diseña para un sismo con período de retorno de 475 años. A pesar de que normativamente se definen los períodos de retorno para cada tipo de estructura, esto no necesariamente garantiza que se estén diseñando las estructuras con sismos compatibles entre la amenaza sísmica del territorio y el grado de desempeño esperable o adecuado de la estructura, esto significa que la estructura puede sobrevivir al sismo, pero no ser funcional u operativa, lo cual para efectos prácticos en algunos casos puede representar una afectación inaceptable (Ministerio de Transporte, 2015).

Espectros de Amenaza Sísmica Uniforme:

Otro aspecto que frecuentemente se considera dentro de los estudios de amenaza sísmica es el cálculo de esta en función de los periodos de vibración de las estructuras, esto es para cada periodo de vibración se puede obtener la aceleración, velocidad o desplazamiento pico efectivo esperable a nivel de basamento rocoso, los datos anteriores se coleccionan en una gráfica que tiene la misma probabilidad de excedencia para todos los períodos, la cual se denomina espectro de amenaza sísmica uniforme (Ordaz, 2017).

En la **Ilustración 48** se esquematiza el procedimiento, en la parte (a) se calcula la curva de amenaza para el sitio para un período (en este caso de $T=0.2$ segundos), el valor leído de la curva de amenaza para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (Período de retorno de 475 años), es llevado a la gráfica (b) donde en el eje horizontal se tienen los períodos y en el vertical la aceleración (en este caso en el eje horizontal se toma $T=0.2$ seg y en el vertical $A=0.55g$). Si el anterior procedimiento se repite para muchos períodos estructurales, se obtiene la gráfica de la parte (c), el cual se denomina espectro de amenaza sísmica uniforme.



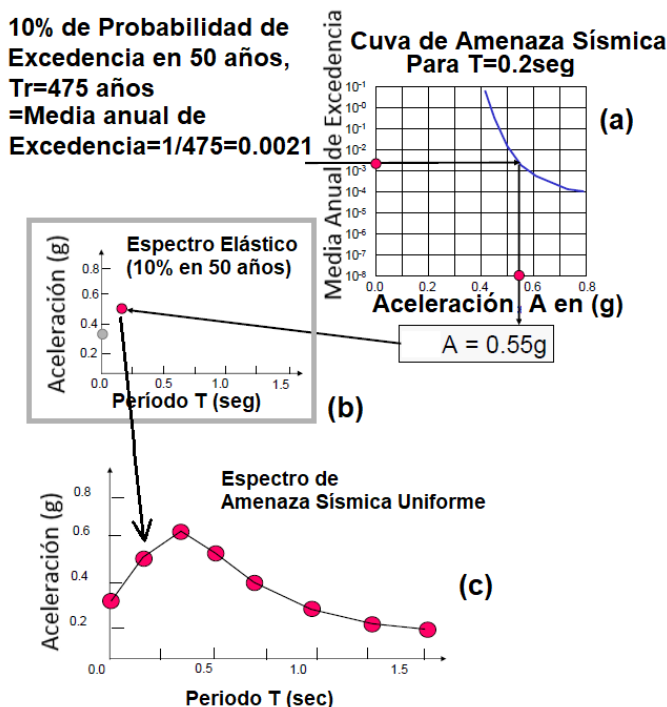


Ilustración 48: Espectros de Amenaza Sísmica Uniforme. (Adaptado de la referencia:

[Fuente: (NEHRP Recommended Provisions: Instructional Materials (FEMA 451B), 2010)]

4.2. AMENAZA SISMICA PARA COLOMBIA

En el país se han realizado diversos estudios de amenaza sísmica, principalmente con el fin de establecer los parámetros y fuerzas de diseño para las edificaciones, casi todos los estudios se han desarrollado usando métodos probabilistas, los métodos deterministas y los métodos no paramétricos han sido usados en pocos estudios, algunos de ellos solo con cubrimiento regional (Alfaro, enero-junio 2013) y (Garzón, 2011)

A continuación, se presentan los mapas de amenaza sísmica incluidos en la normatividad nacional a través de la historia, con el fin de que se pueda observar su evolución en el tiempo, todos ellos han sido obtenidos a partir del modelo de Cornell (1968), previamente discutido.

Estudio de Amenaza Sísmica para el Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes de 1984

Este estudio el cual se denominó Estudio General del Riesgo Sísmico de Colombia, fue desarrollado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS y vale la pena resaltar que en ese momento se denominaba riesgo sísmico lo que ahora conocemos como amenaza sísmica.

En la **Ilustración 49** se muestran los diferentes sistemas de fallas y los sismos usados en el estudio.

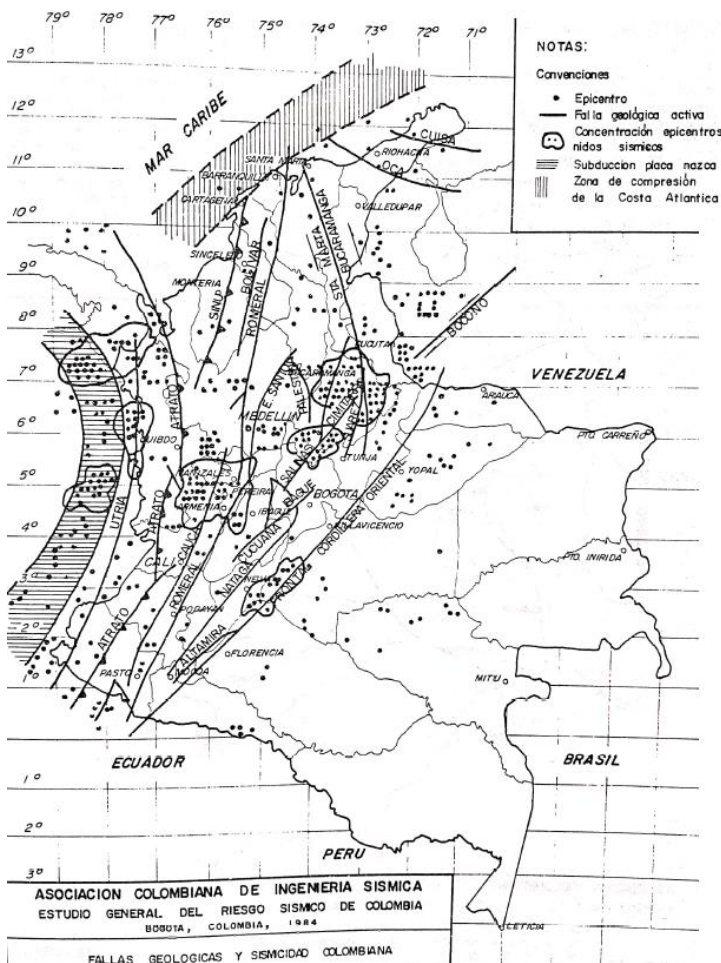


Ilustración 49: Fallas Geológicas y Sismicidad Colombiana usada en el Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia 1984

[Fuente: (AIS, 1984)]

El resultado final del estudio en mención fue llevado al Capítulo A.2. del Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes de 1984 y se presenta en la **Ilustración 50**, donde se pueden apreciar las zonas de riesgo sísmico (léase Amenaza Sísmica) que quedaron definidas para el país y que fueron válidas desde 1984 hasta 1998.

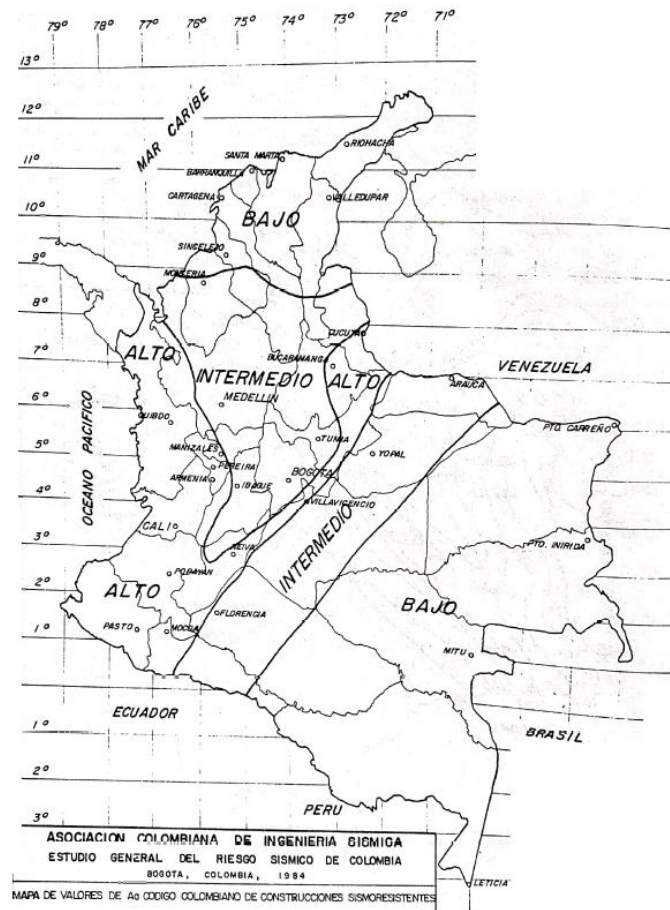


Ilustración 50: Mapa de Riesgo Sísmico (Amenaza) de Colombia según el Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia 1984
[Fuente: Tomado de (AIS, 1984)]

Estudio de Amenaza Sísmica para las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente – NSR-98

Para la actualización de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismorresistente de 1998 - NSR-98, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, elaboró el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia en 1996, utilizando nuevamente el modelo de Cornell (1968), el mapa de amenaza sísmica final quedó consignado dentro de la NSR-98 como la figura A.2.1, dicho mapa se presenta en la **Ilustración 51**.

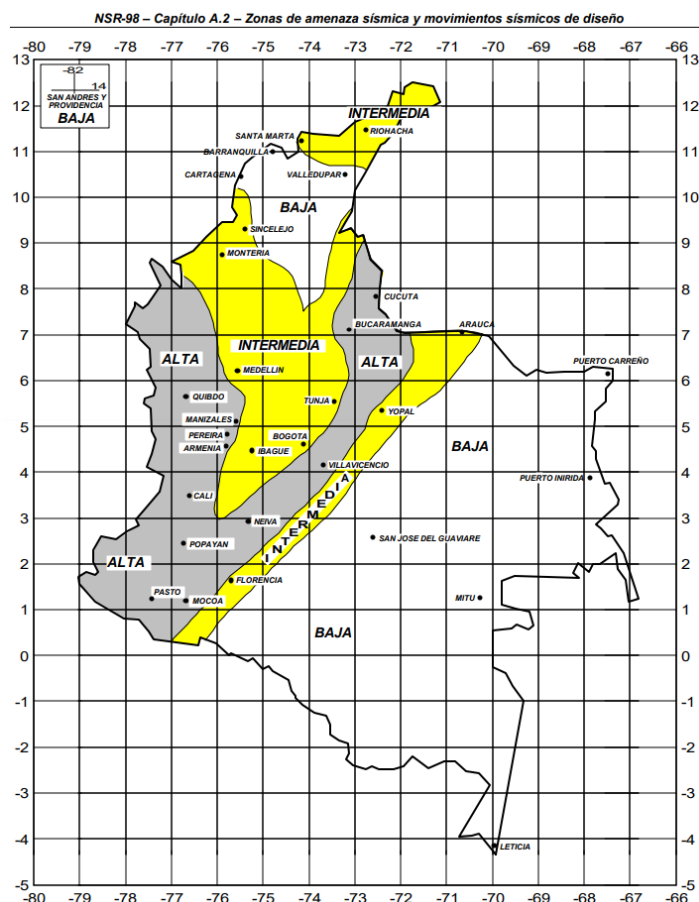


Ilustración 51: Mapa de Amenaza Sísmica de Colombia según el Estudio General de Riesgo Amenaza Sísmica de Colombia 1996
[Fuente: (Congreso de la República, 1998)]

Estudio de Amenaza Sísmica para las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente – NSR-10

Debido a que este es el estudio vigente actualmente a nivel normativo, se realizara una discusión detallada de su ejecución, referenciándola permanentemente con los cinco pasos generales discutidos previamente para la evaluación probabilista de la amenaza sísmica.

La norma de diseño y construcción sismorresistente actualmente vigente en el país, corresponden a la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismorresistente NSR-10 y la cual está enmarcada dentro de la Ley 400 de 1997 y los siguientes decretos normativos, los cuales en su conjunto constituyen lo que conocemos como NSR-10, dejando de manifiesto que la expedición de una nueva Normatividad deja sin aplicación los mencionados decretos:

- Decreto 926 del 19 de marzo de 2010
- Decreto 2525 del 13 de julio de 2010
- Decreto 0092 del 17 de enero de 2011
- Decreto 0340 del 13 de febrero de 2012
- Decreto 0945 del 05 de junio de 2017
- Decreto 2113 del 25 de noviembre de 2019.

Catálogo Sísmico e Identificación de Fuentes Sísmogénicas:

Referente al catálogo sísmico, en el estudio se usaron los sismos históricos desde 1566 hasta 1922 y se compilaron los catálogos instrumentales de ISA 1989 e Ingeominas (actual Servicio Geológico Colombiano – SGC) del 2008.

Se realizo una depuración del catálogo, una homogenización de magnitudes y se extrajeron las réplicas, al final del procedimiento se consiguió obtener un catálogo con 7401 sismos en los cuales solo se incluyen eventos con magnitud igual o superior a 4.

Para la asignación de eventos a las fuentes, el estudio modelo 30 fuentes superficiales corticales, con anchos de corredor de 60Km, las cuales se presentan en la **Ilustración 52**.

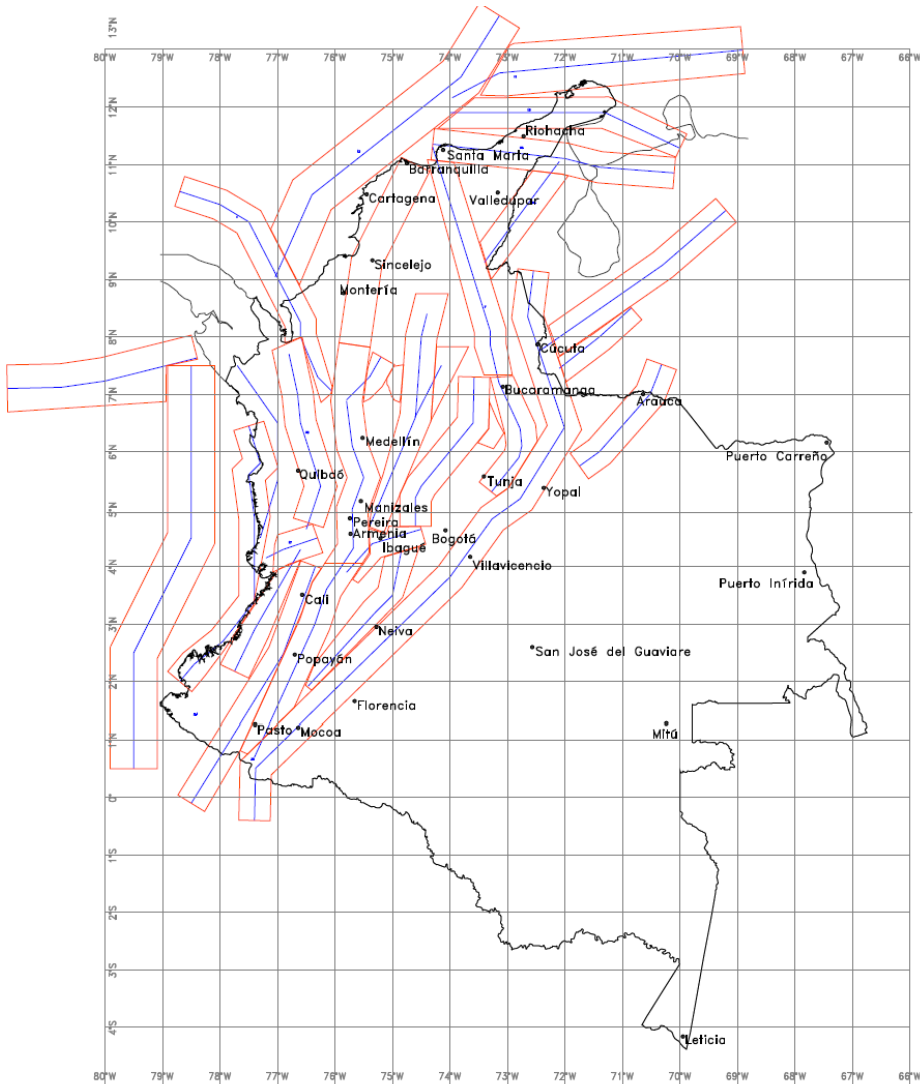


Ilustración 52: Fuentes superficiales corticales utilizadas en el estudio con anchos de corredor de 60 Km [Fuente: (AIS, 1984)]

La asignación de los eventos superficiales del catálogo sísmico, se presenta en la **Ilustración 53**, en la cual el color del sismo está asociado a la falla a la cual fue asignado.

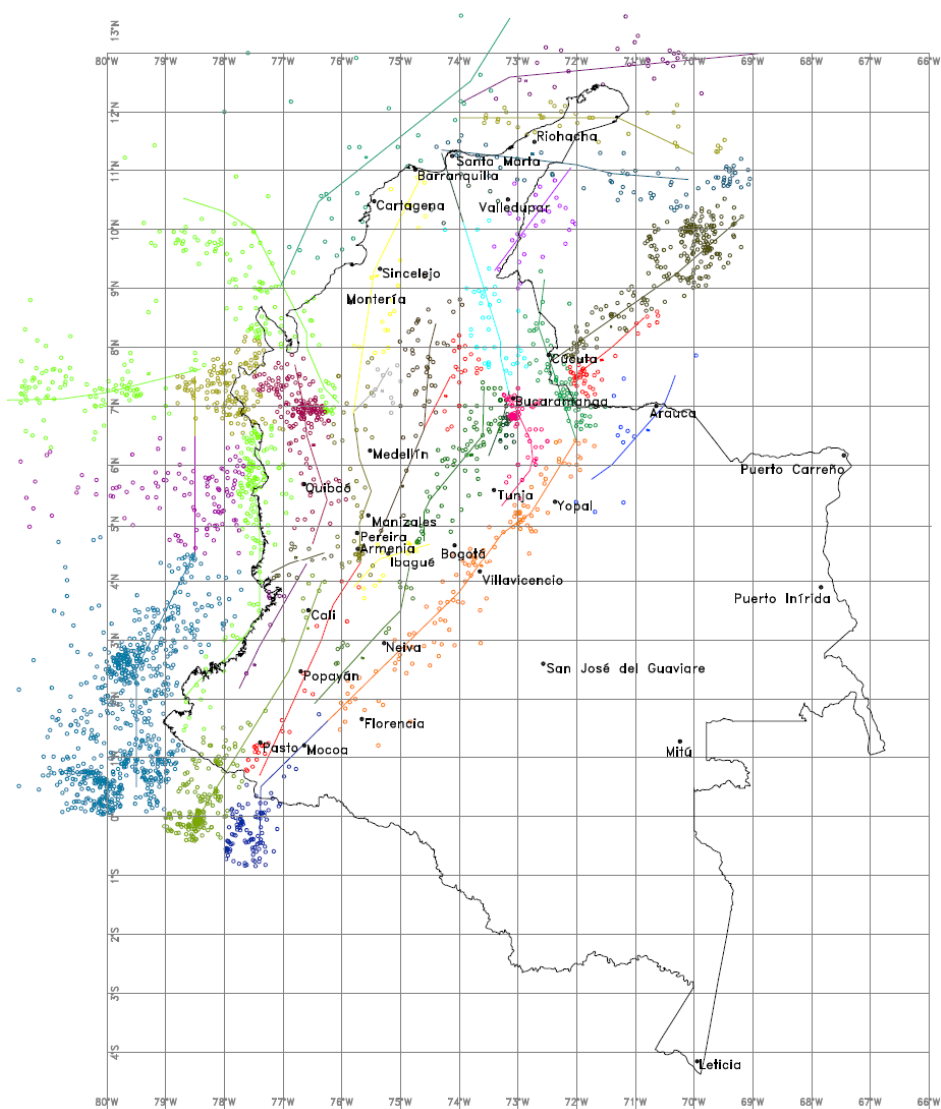


Ilustración 53: Asignación de Sismos a Fuentes Corticales [Fuente: (AIS, 1984)]

De manera análoga para las fuentes sismogénicas profundas, de las cuales se modelaron las siguientes, se realizó la asignación de sismos correspondiente, la cual se muestra en la **Ilustración 54**.

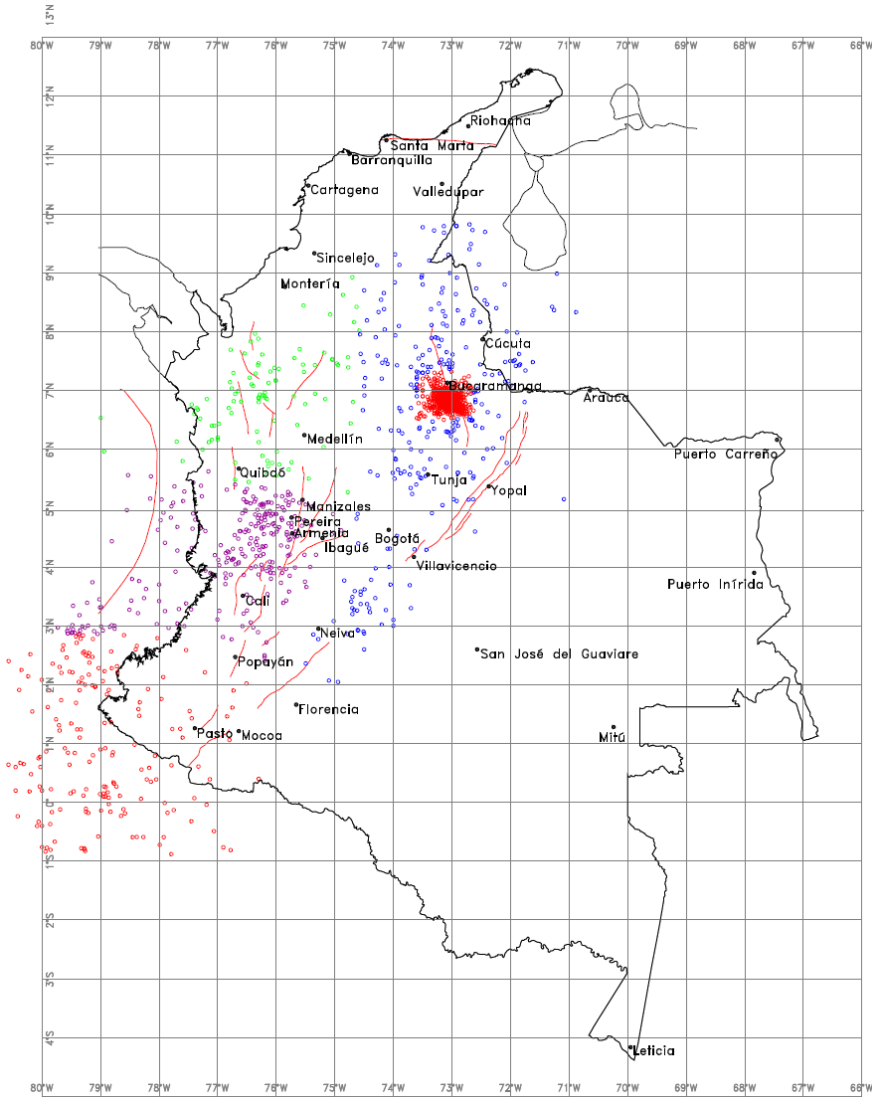


Ilustración 54: Asignación de Sismos a Fuentes Sismogénicas Profundas
[Fuente: (AIS, 1984)]

Cálculo de la Ley Gutenberg-Richter o Regresión de Magnitudes.

Con los sismos asignados a cada fuente se calcularon los parámetros de las relaciones de regresión G-R y se parametrizaron todas las fuentes, se utilizó como año base para la ventana de tiempo 1962.

En la Ilustración 38, se presentan las gráficas de tasas de excedencia G-R, para todas las fuentes consideradas en el estudio.

Como aspecto importante de estas regresiones podemos mencionar que acorde a las gráficas GR, las fuentes con mayor potencial corresponden a las fuentes de subducción con magnitudes máximas cercanas a 7.8.



Ilustración 55: Regresión de Magnitudes Gutenberg-Richter para todas las fuentes.

[Fuente: Adaptado de (AIS, 1984)]

Cálculo de la Probabilidad de Excedencia:

Utilizando el programa Crisis 2007 (Ordaz et. Al 2007), en el estudio se calcularon las probabilidades de excedencia de aceleración, velocidad y desplazamiento, resolviendo la integral de probabilidad total:

$$\lambda[X \geq x] \approx \sum_{\text{fuentes } i} \int_{M_0}^{M_{Mx}} \int_{R|M} P[X \geq x|M, R] f_M(m) f_{R|M}(r|m) dr dm$$

Para la solución de las integrales de probabilidad se usaron los siguientes parámetros, según la fuente que correspondiera.

La magnitud mínima para la integración se adoptó como $M_0=4$, lo cual permitió además la eliminación de eventos réplicas de eventos mayores. La magnitud máxima M_{Mx} , fue calculada a según cada fuente a partir de las regresiones del catálogo sísmico o usando las longitudes de ruptura máximas de las fuentes o información neotectónica adicional disponible, que permitiera fijar la magnitud máxima esperable para cada fuente.

Respecto a las ecuaciones de atenuación el estudio uso las ecuaciones disponibles en ese momento a nivel mundial y algunas desarrolladas con datos colombianos, en la **Ilustración 56** se presentan algunas de las ecuaciones de atenuación utilizadas.

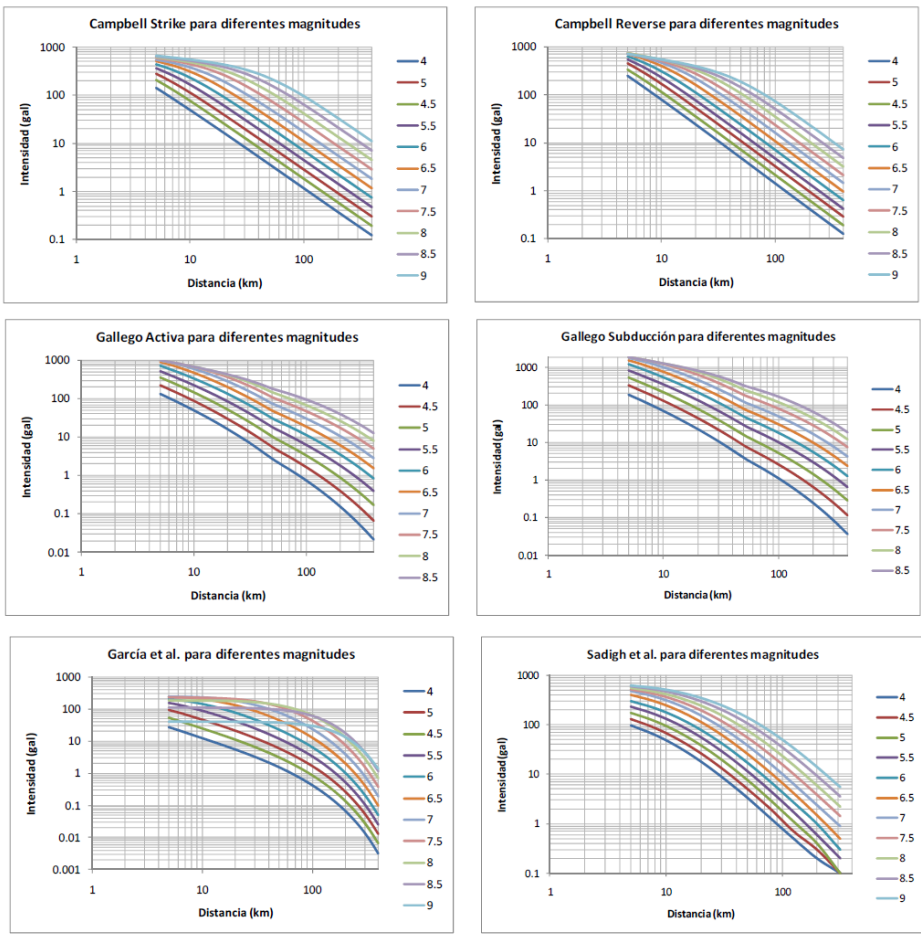


Ilustración 56: Gráficas de Ecuaciones de Atenuación.
[Fuente: (AIS, 1984)]

En la **Ilustración 57**, tomada del estudio referido se presentan las comparaciones del comportamiento de las ecuaciones de atenuación para magnitudes de 6 y 7.

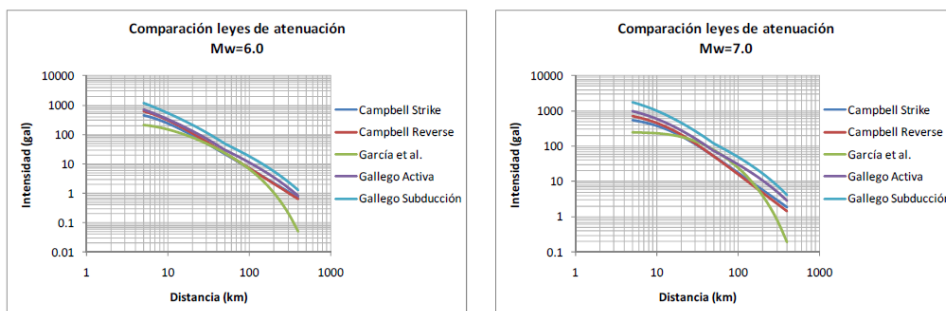


Ilustración 57: Comparación del Comportamiento de las Ecuaciones de Atenuación.

[Fuente: (AIS, 1984)]

Finalmente, se estudió el comportamiento de las siguientes ecuaciones de atenuación, entre las cuales se resaltan las de menor sesgo y mejor comportamiento en cada caso:

Para fallas de tipo cortical se usaron:

- Campbell Strike (Menor sesgo y mejor comportamiento)
- Gallego Activa
- Sadigh

Para la fuente de subducción se usaron:

- Campbell Reverse (Menor sesgo y mejor comportamiento)
- Gallego Subduccion
- García et. Al.
- Youngs
- Para la fuente de Benioff
- Campbell Reverse
- Gallego Subducción
- García et. Al (Menor sesgo y mejor comportamiento)
- Youngs

Finalmente, para cada período de retorno de interés se calculó la amenaza sísmica en cada uno de los municipios del país y los resultados de aceleración y velocidad fueron llevados tanto a tablas como a los mapas consignados en la NSR-10.

Por ejemplo, tomando la ciudad de Armenia (Q), en la *Ilustración 58*, se puede leer la aceleración pico efectiva a nivel de basamento rocoso para el sismo normativo, esto es una probabilidad de excedencia del 10% en 50años, lo que equivale a un sismo con un período de retorno de 475 años. En dicha ilustración podemos observar además de la Aceleración normativa para la ciudad ($A_a=250\text{ cm/seg}^2 = 0.25g$), la contribución general de cada una de las fuentes sismogénicas a la amenaza sísmica en la ciudad, siendo evidente que la falla de Romeral es dominante en la amenaza sísmica generada por fallas corticales y Benioff Intermedia II juega un rol definitivo en la amenaza sísmica de fuentes sismogénicas profundas.

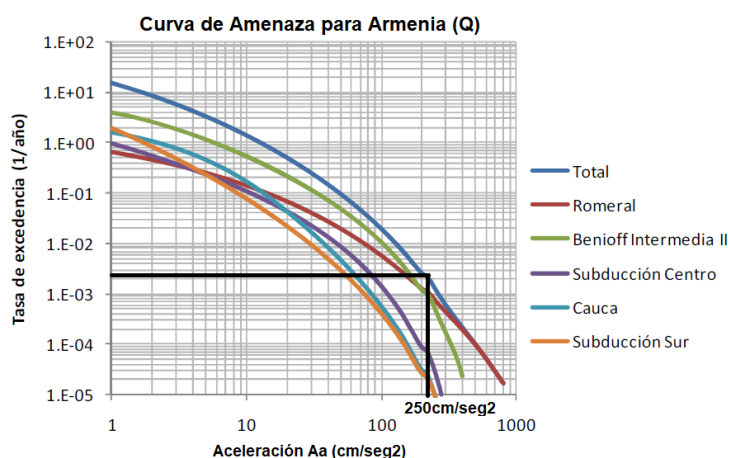


Ilustración 58: Curva de Excedencia (Amenaza Sísmica) para Armenia (Q).
[Fuente: Adaptado de (AIS, 1984)]

En la *Tabla 6*. Valores de Aceleración Pico Efectiva (A_a) en las capitales de departamento, calculados para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años ($Tr=475$ años) se puede observar el valor de Aceleración Pico Efectiva (A_a) consignados en la NSR-10 y los cuales se han calculado para las capitales de departamento, siguiendo el mismo procedimiento ilustrado anteriormente y utilizando para cada ciudad las curvas de probabilidad de excedencia de las Ilustraciones 42, 43 y 44.

Tabla 6. Valores de Aceleración Pico Efectiva (A_a) en las capitales de departamento, calculados para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años ($Tr=475$ años)

Ciudad	A_a	A_v	Zona de Amenaza Sísmica
Arauca	0.15	0.15	Intermedia
Armenia	0.25	0.25	Alta
Barranquilla	0.10	0.10	Baja
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta
Cali	0.25	0.25	Alta
Cartagena	0.10	0.10	Baja
Cúcuta	0.35	0.30	Alta
Florencia	0.20	0.15	Intermedia
Ibagué	0.20	0.20	Intermedia
Leticia	0.05	0.05	Baja
Manizales	0.25	0.25	Alta
Medellín	0.15	0.20	Intermedia
Mitú	0.05	0.05	Baja
Mocoa	0.30	0.25	Alta
Montería	0.10	0.15	Intermedia
Neiva	0.25	0.25	Alta
Pasto	0.25	0.25	Alta
Pereira	0.25	0.25	Alta
Popayán	0.25	0.20	Alta
Puerto Carreño	0.05	0.05	Baja
Puerto Inírida	0.05	0.05	Baja
Quibdó	0.35	0.35	Alta
Riohacha	0.10	0.15	Intermedia
San Andrés, Isla	0.10	0.10	Baja
Santa Marta	0.15	0.10	Intermedia
San José del Guaviare	0.05	0.05	Baja
Sincelejo	0.10	0.15	Intermedia
Tunja	0.20	0.20	Intermedia
Valledupar	0.10	0.10	Baja
Villavicencio	0.35	0.30	Alta
Yopal	0.30	0.20	Alta

* [Fuente: (AIS, 1984)]

En las Ilustraciones 59, 60 y 61 se presentan las mismas curvas para las ciudades capitales de departamento, con el fin de que el tomador de decisiones en gestión del riesgo, pueda visualizar acorde a su zona de trabajo cuales son los sistemas de fallamiento dominantes en el cálculo de la amenaza sísmica.

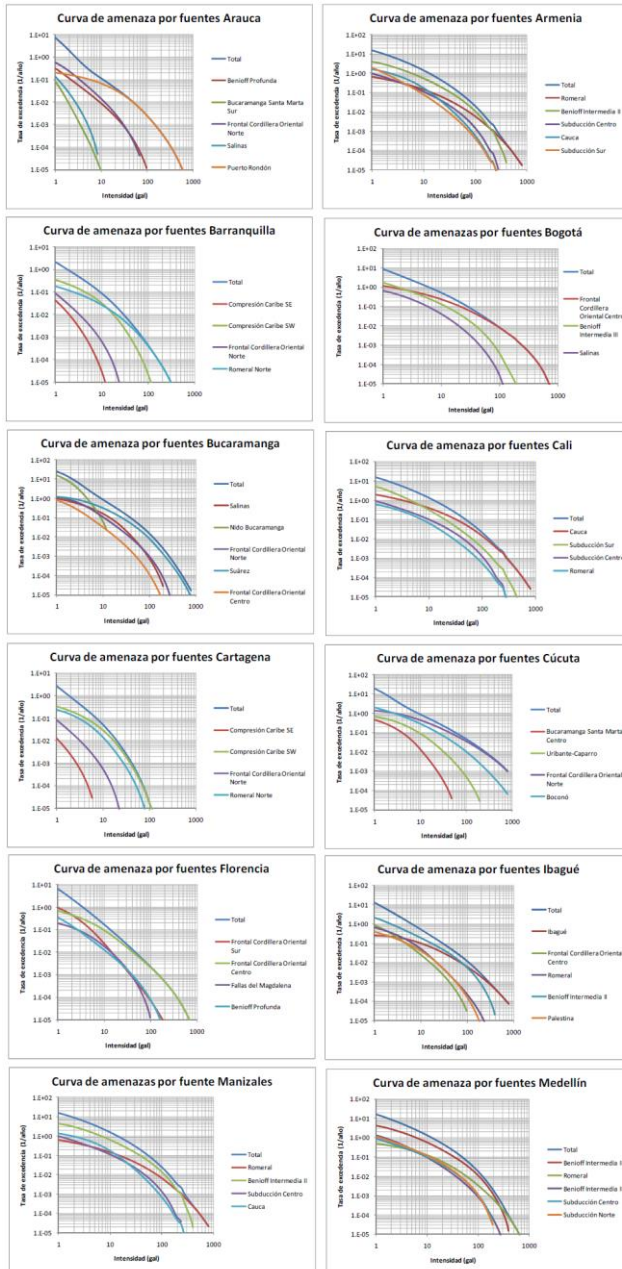


Ilustración 59: Curva de Excedencia (Amenaza Sísmica) para ciudades capitales de departamento – Parte A. [Fuente Adaptado de: (AIS, 1984)]

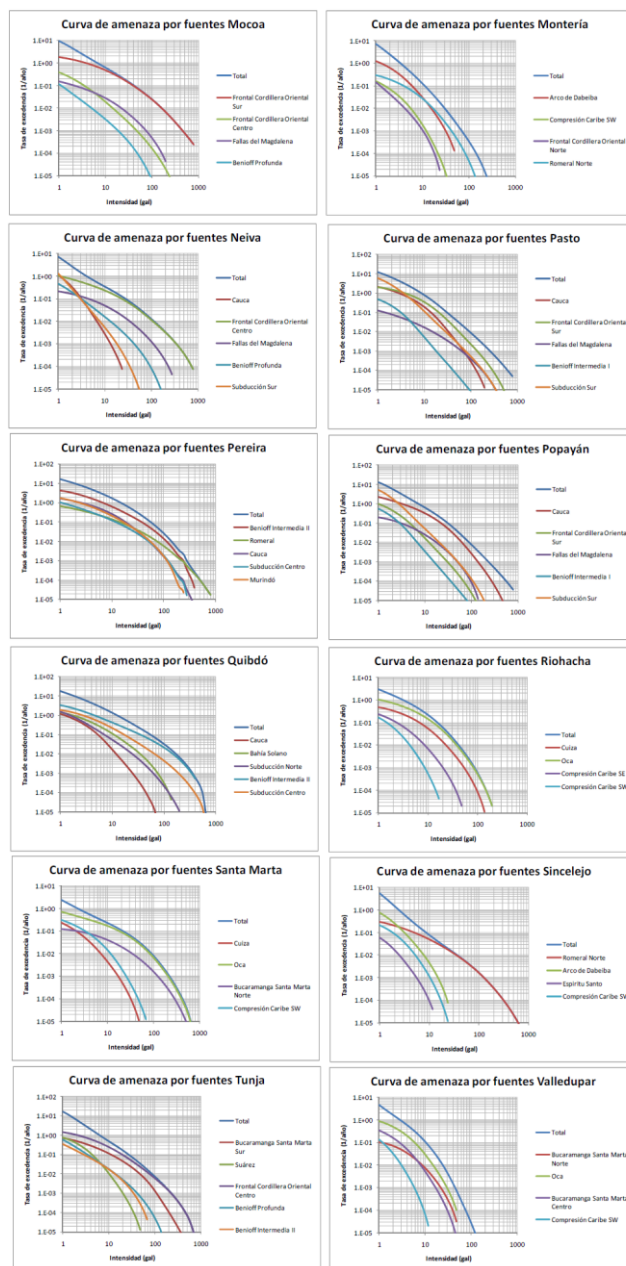


Ilustración 60: Curva de Excedencia (Amenaza Sísmica) para ciudades capitales de departamento – Parte B.
[Fuente: (AIS, 1984)]

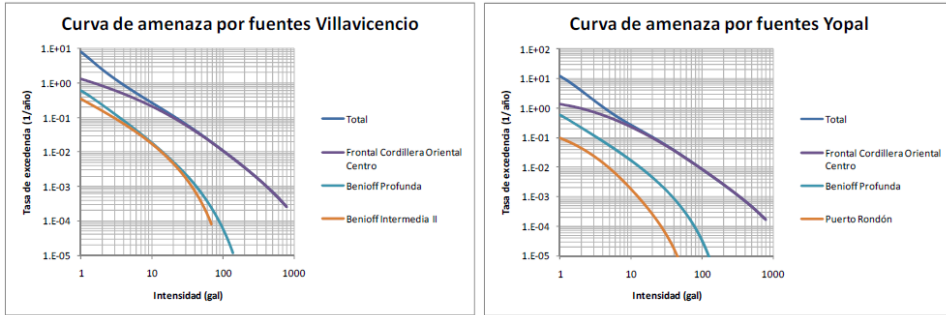


Ilustración 61: Curva de Excedencia (Amenaza Sísmica) para ciudades capitales de departamento – Parte C
[Fuente: adaptado de (AIS, 1984)]

De especial interés puede ser el notar que para la ciudad de Bucaramanga (**Ilustración 39**), no es el Nido de Bucaramanga la fuente que más controla o aporta a la amenaza sísmica, sino que son la falla de Suarez, Frontal Cordillera Oriental y Salinas las que controlan la amenaza sísmica, esto se debe a que, aunque el Nido de Bucaramanga tiene muchos eventos, casi todos son menores y verticalizan la ecuación de peligrosidad. Como se mencionó el corte período de registro instrumental aún no ha permitido registrar sismos de gran magnitud que nos muestren el verdadero potencial de tener sismos grandes que puede tener el Nido de Bucaramanga

Finalmente, los valores máximos esperables de aceleración, velocidad o desplazamiento se llevan a los mapas que se reportan en la NSR-10, como se puede apreciar para la velocidad pico efectiva A_v (**Ilustración 62**) y aceleración pico efectiva A_a (**Ilustración 63**).

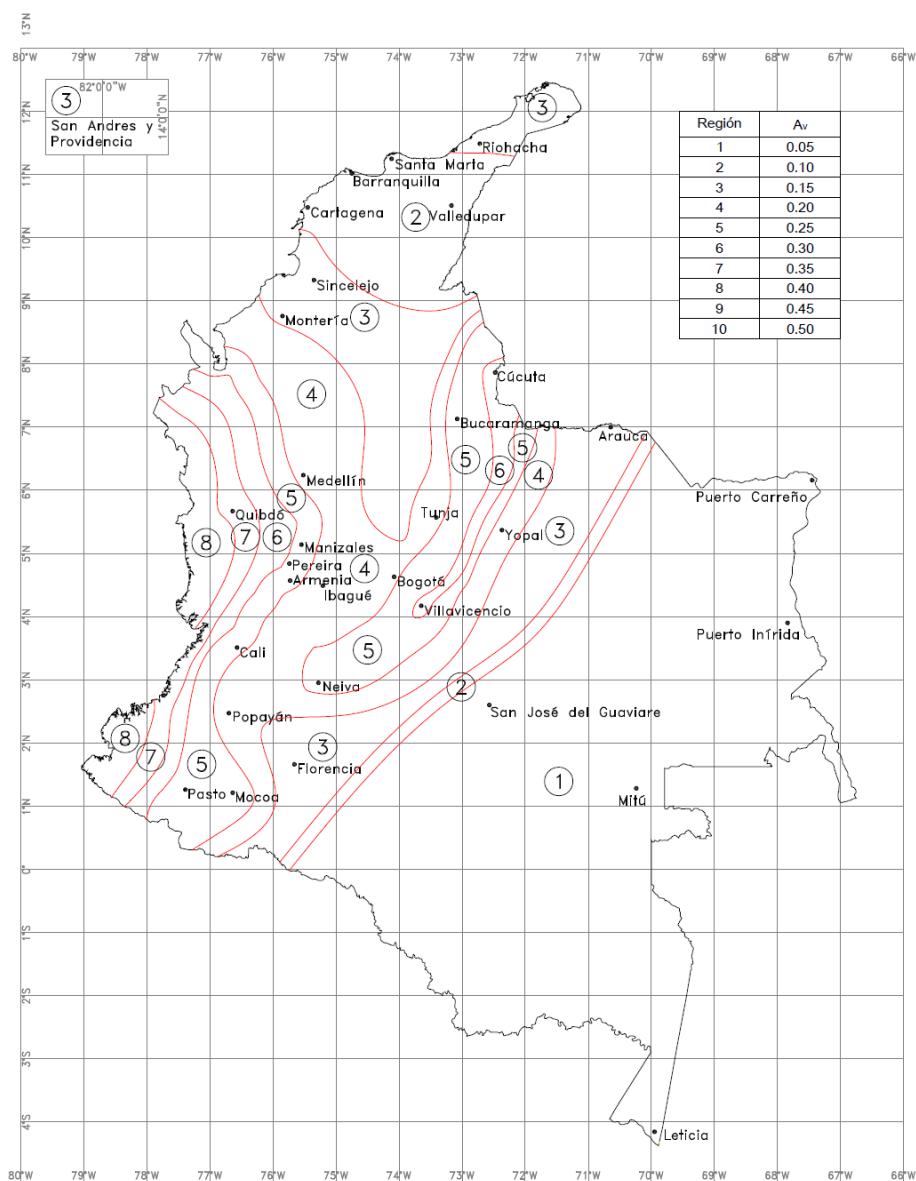
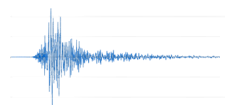


Ilustración 62: Mapa de Velocidad Pico Efectiva (Av) para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (Período de Retorno de 50 años)
[Fuente: (MINVIVIENDA. Comisión Asesora de la NSR, AIS, 2010)]



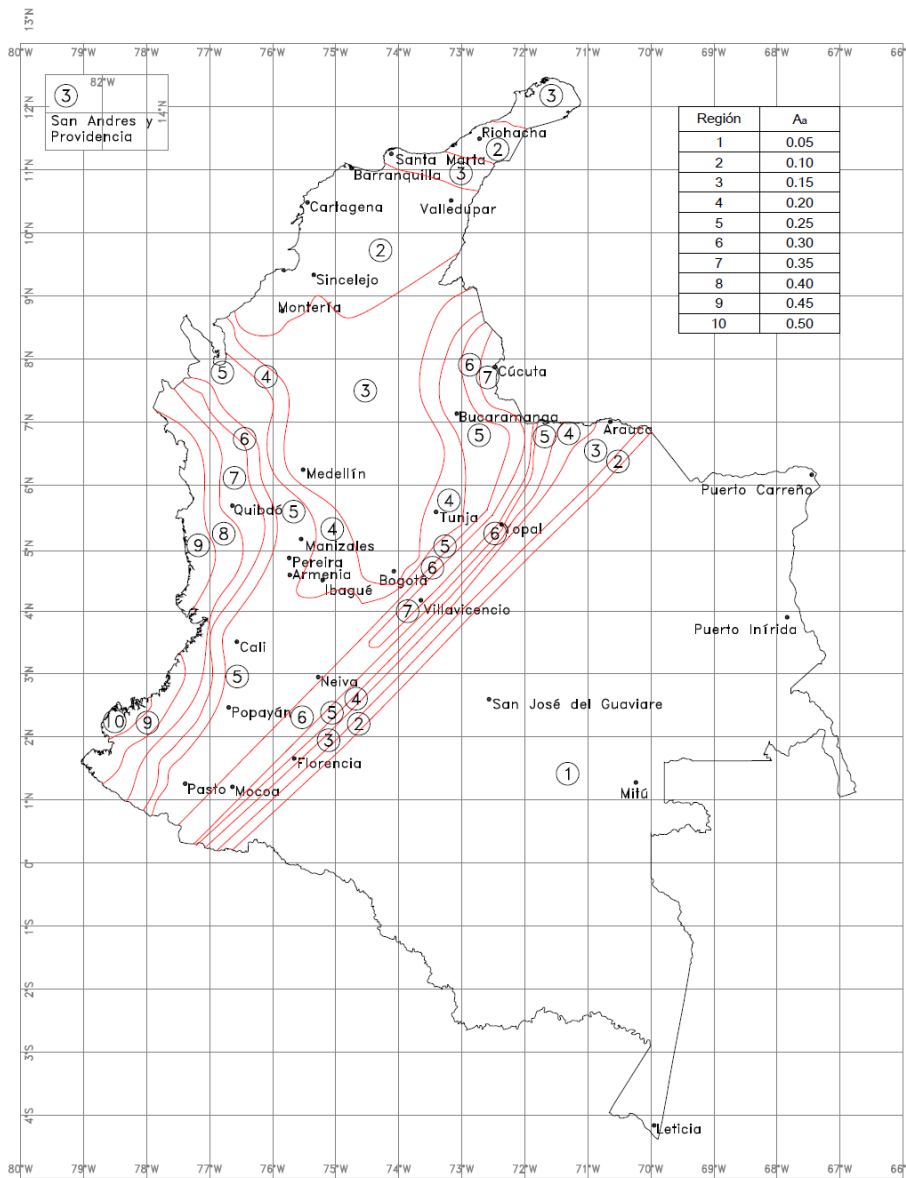


Ilustración 63: Mapa de Velocidad Pico Efectiva (A_a) para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años (Período de Retorno de 50 años)
[Fuente: (MINVIVIENDA. Comisión Asesora de la NSR, AIS, 2010)]

Zonas de Amenaza Sísmica:

Una forma práctica y útil para visualizar la amenaza sísmica, es correlacionar los valores de aceleración pico efectiva con la peligrosidad de la zona, para lo cual se establece de manera general que zonas con aceleraciones entre 0 y 0.15g se catalogan como de amenaza sísmica baja, zonas con aceleraciones mayores a 0.15g y menores a 0.2g son de amenaza sísmica intermedia y zonas con aceleraciones mayores a 0.2g se consideran de alta amenaza sísmica, para zonas limítrofes es necesario revisar también los valores de velocidad pico efectiva.

En la *Ilustración 64* se muestra la comparación entre el mapa de aceleración pico efectiva (Aa) y la zonificación sísmica de la NSR-10.

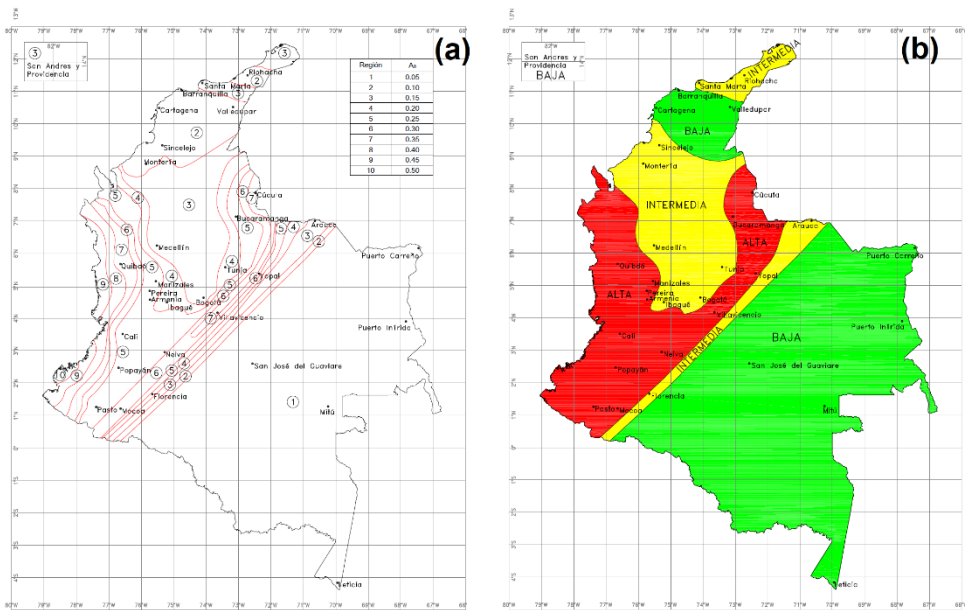


Ilustración 64: Relación entre Aceleración Pico Efectiva (Aa) y la Zonificación Sísmica
[Fuente: (AIS, 1984)]

Espectros de Amenaza Sísmica Uniforme:

Como se explicó anteriormente, una forma más racional de involucrar la amenaza sísmica en el diseño sismorresistente consiste en el cálculo de los espectros de amenaza sísmica uniforme, los cuales se evalúan para los diferentes períodos estructurales usando la misma probabilidad de

excedencia. Para el caso de Colombia, estos espectros fueron evaluados en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia que hemos discutido en esta sección. Para cada ciudad capital se evaluaron dichos espectros utilizando periodos de retorno de 31 años, 225 años, 475 años, 1000 años y 2500 años. En la *Ilustración 65* se presentan los espectros de amenaza sísmica uniforme para las 3 ciudades más grandes del país, calculados para la misma probabilidad de excedencia (En este caso 10% en 50 años, lo que equivale a un período de retorno de 475 años).

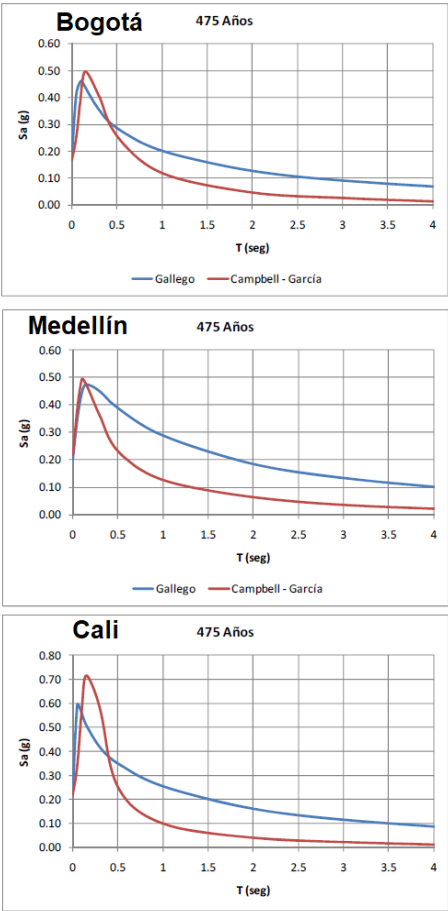


Ilustración 65: Espectros de Amenaza Sísmica Uniforme - Período de Retorno de 475 años
[Fuente: (AIS, 1984)]

Comprendiendo la Sismología para Gestores del Riesgo

Aspectos Generales de Amenaza Sísmica, que debe tener en Cuenta el Tomador de Decisiones en Gestión del Riesgo de Desastres

[1] Cuando se produce un sismo y llega a la estructura, la fuerza que le impone el sismo a la estructura es proporcional a la masa del edificio multiplicada por la aceleración del terreno (Léase aceleración del sismo).

[2] La masa es una propiedad de la estructura y es relativamente fácil de calcular, pues está compuesta por la masa propia de la estructura (vigas, columnas, muros estructurales etc) y los elementos que contiene la estructura (pisos, muros no estructurales etc).

[3] Por lo tanto, para que una estructura pueda resistir un sismo necesitamos calcular la fuerza sísmica de diseño, la cual es proporcional a la masa por la aceleración producida por el sismo. En últimas requerimos establecer cuál es la aceleración que le producirán los sismos a dicha estructura a este cálculo de aceleración lo denominamos evaluación de la amenaza sísmica.

[4] Para calcular la amenaza sísmica (aceleración, velocidad o desplazamiento) que pueden generar los sismos en un sitio, se pueden usar métodos deterministas y métodos probabilistas.

[5] En las normas de diseño y construcción sismorresistente en Colombia, siempre se ha usado tradicionalmente el método probabilista y los cálculos de amenaza sísmica se circunscriben a la evaluación de dicha amenaza a nivel de basamento rocoso (Aa o Av en la NSR-10).

[6] La evaluación de la amenaza por métodos probabilistas involucra 5 pasos: 1) Selección del Catálogo y Fuentes Sismogénicas de la Zona 2) Caracterización de las Fuentes y Calculo de los Parámetro G-R. 3) Selección de Ecuaciones de Atenuación 4) Calculo de la Probabilidad de Excedencia para todas las fuentes. 5) Calculo de las probabilidades de excedencia para cada período de retorno.

[7] Un aspecto adicional dentro de los estudios de Amenaza Sísmica es la determinación de los espectros de amenaza sísmica uniforme, los cuales permiten para cada período estructural obtener la amenaza sísmica esperable para una probabilidad de excedencia común.

[8] Los mapas de amenaza sísmica consignados en la NSR-10 provienen del Estudio de Amenaza Sísmica General de Colombia 2009 (AIS-2000).

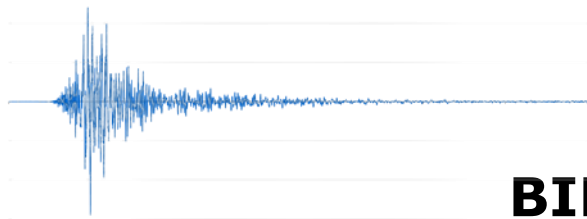
[9] Para una ciudad capital de departamento, podemos calcular con precisión, la aceleración esperable para cualquier período de retorno (probabilidad de excedencia), usando el procedimiento descrito en la Ilustración 58 y apoyándonos en las ilustraciones 59, 60 y 61.

Comprendiendo la Sismología para Gestores del Riesgo

Aspectos Generales de Amenaza Sísmica, que debe tener en Cuenta el Tomador de Decisiones en Gestión del Riesgo de Desastres

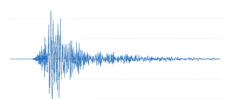
^[10] Mediante el uso de las ilustraciones 59, 60 y 61 podemos determinar la importancia de cada una de las fuentes sísmicas que pueden afectar cada ciudad en cuanto al cálculo de la amenaza sísmica se refiere.

^[11] Para proyectos especiales como represas, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), plantas industriales con manejo de elementos peligrosos, plantas nucleares o que manejen alto riesgo biológico, puentes y en general proyectos especiales, es necesario realizar estudios puntuales de amenaza sísmica, utilizando los métodos estudiados en este capítulo).



BIBLIOGRAFÍA

- AIS. (1984). *Estudio General de Riesgo Sísmico*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS.
- Alfaro, A. (enero-junio 2013). Alfaro A., Evaluación probabilista y determinista de la amenaza sísmica de Neiva (Colombia) utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación. *Revista épsilon* (Nº 20).
- BBC News. (21 de 09 de 2017). Los 10 terremotos más potentes y mortíferos de la historia en América Latina. (R. B. Mundo, Ed.) Recuperado el 08 de 08 de 2019, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41343606>
- Brinker, R. C., & Minnick, R. (1987). *The Surveying Handbook*. New York: SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC.
- British Geological Survey. (2018). *Earthquakes, Seismic waves*. (BGS, Editor) Recuperado el 12 de 12 de 2018, de <https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/earthquakes/seismicWaves.html>
- Carpetapedagogica.com. (s.f.). *Curso de sismología*. Recuperado el 08 de 08 de 2019, de <https://carpetapedagogica.com/escalassismicas>
- CCN - U. de Chile. (s.f.). *Preguntas Frecuentes de Sismología*. (C. -U. Chile, Editor) Recuperado el 01 de 12 de 2019, de <https://www.csn.uchile.cl/sismologia/preguntas-frecuentes/#>
- CENAPRED. (2015). *Serie Fascículos. Sismos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, México D. F.
- Congreso de la Republica. (1984). Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes CCCSR-84.. *Ley 1400 de 1984*.
- Congreso de la República. (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente – NSR-98,. *Decreto 033 de 1998*. Bogotá.
- Cornell, C. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of Seismological Society of America*, 58, (5).



- Crampin, S., & Gau, Y. (Febrero de 2015). The Physics Underlying Gutenberg-Richter in the Earth and in the Moon. *Journal of Earth Science*, 26, No. 1, 134-139. doi:10.1007/s12583-015-0513-3
- CSN: Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile. (2002). *Glorario (términos habituales en sismología)*. Recuperado el 08 de 08 de 2019, de <http://www.sismologia.cl/seismo.html>
- Der-Kiureghian A., A. A. (1977). A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis-. *Bulletin of the Seismological Society of America.*, 64(4).
- Diario Oficial - Ley 1523 GRD. (s.f.). Ley 1523 de 2012. Por el cual se adopta la política nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema nacional para la Gestion del Riesgo de Deastres y se dictan otras disposiciones. Bogotá, Colombia.
- Duggal, S. K. (2013). *Earthquake-Resistant* (2da Edición ed.). Oxford: Oxford University Pres.
- Duncan Carr, A. (2020). *History of seismology»*. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*.
- EIRD. (2007). El terremoto de Lisboa del 1° de noviembre de 1755: ¿El primer desastre "moberno"? *Contribuciones. EIRD Informa - Las Américas*, 14-16.
- El Espectador. (30 de Agosto de 2017). Se cumplen 100 años del mayor sismo en Bogotá. (L. Fog Corradine, Ed.) *DEJÓ UN SALDO DE 13 VÍCTIMAS*.
- El Mundo. (02 de 11 de 2005). Los científicos buscan el epicentro del seísmo de Lisboa del año 1755. (S. Dominguez, Ed.) *El Mundo - Ciencia*. Obtenido de <http://www.elmundo.es/papel/2005/11/02/ciencia/1882416.html>
- El Objetivo. (15 de 12 de 2019). *El Objetivo. ¿Qué es el Cinturón de Fuego del Pacífico?* Obtenido de <https://elobjetivo.com.ar/contenido/15397/que-es-el-cinturon-de-fuego-del-pacifico>
- epoch-times, T. (16 de 11 de 2016). *EXPLORANDO ENIGMAS*. Obtenido de Sismógrafo chino de 2.000 años de antigüedad funciona con precisión: https://es.theepochtimes.com/sismografo-chino-de-2-000-anos-de-antiguedad-funciona-con-precision_82667.html

- Espinosa B., A. (2004). *A. E. Historia sísmica de Colombia. 1580-1830*. Armenia: Uniquindío, Asociación Colombiana de Ciencias Exactas.
- Espinosa Baquero, A. (2012). *Eciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia*. Bogotá: Universidad de Quindío - Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Fabio, C. (2019-2). South America: Cordilleran-Type. Orogens. Taphrogenic Tectonics. The Maracaibo Orogenic Float. The Chocó-Panamá Indenter. En C. Fabio, *Geology and Tectonics of Northwestern South America. The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. Switzerland, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG 2019. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9>
- Garzón, P. (2011). *Evaluación de la Amenaza Sísmica de Colombia mediante análisis de valores extremos históricos*. Tesis Magister en Ingeniería - Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia., Bogotá.
- Gobierno de Canarias. (01 de 03 de 2015). *Anatomía de un terremoto*. Recuperado el 12 de 12 de 2019, de <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoescuela/recursosdigitales/2015/03/01/anatomia-de-un-terremoto/>
- Gobierno de México. (15 de 01 de 2017). *Museo virtual. Escalas de los sismos*. (SGM, Productor) Recuperado el 01 de 12 de 2019, de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html#:~:text=de%20los%20sismos-,Escalas%20de%20los%20sismos,al%20f%C3%ADsico%20italiano%20Giuseppe%20Mercalli.&text=Consta%20de%2012%20grados%20de,romanos%20del%20I%20al%20X
- Gupta N., G. V. (2019). Open Source Seismic Hazard. *OpenSHA*. United States Geological Survey.
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1956). Magnitude and Energy of Earthquakes. *Annali di Geofisica*, 9, No. 1.
- IGAC. (2005). *Resolucion 068 de enero 28 de 2005*.
- IPGH. (2013). *Guía de normas* (segunda ed.). Mexico, D.F.: Comité ISO/TC 211. Información Geográfica / Geomática .

- IRIS. (20 de 08 de 2019). *Animaciones de movimiento de fallas*. Obtenido de IRIS, Educación: <http://www.iris.washington.edu/gifs/animations/faults.htm>
- João O.S. Santos, C. J. (2019). Large geographic and temporal extensions of the Río de la Plata Craton, South America, and its. En C. J. João O.S. Santos, *Geology and Tectonics of Northwestern South America*. Switzerland, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG 2019.
doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9>
- LePan, N. (29 de 05 de 2019). *Visual Capitalist*. Recuperado el 08 de 08 de 2019, de Visualizing the Power and Frequency of Earthquakes:
<https://www.visualcapitalist.com/visualizing-the-power-and-frequency-of-earthquakes/>
- Méndez, R. (2015). Diplomado virtual. Módulo de principales escenarios de riesgo. *Módulo de principales escenarios de riesgo*. Bogotá: ESAP.
- Michigan Tech. UPSeis. (01 de 05 de 2017). *UPSeis, an educational site for budding seismologists*. (D. W. Pennington, Productor) Recuperado el 01 de 12 de 2019, de The Questions We'll Answer:
<http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/index.html>
- Ministerio de Comunicaciones. (1982). *Decreto 2707 de 1982*. Bogotá.
- Ministerio de Transporte. (Enero 26 de 2015). Norma Colombiana de Diseño de Puentes – CCP-2014. *Resolución 108*,.
- MINVIVIENDA. Comisión Asesora de la NSR, AIS. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Bogotá: Diario Oficial.
- Monsalve, H., Valencia, W., Cano, L., & Vargas, C. (2018). Modeling subduction earthquake sources in the central-western region of Colombia using waveform inversion of body waves. (Elsevier, Ed.) *Journal of Geodynamics*, 116.
- Monsalve, J., & Cano, L. (2019). Selección de Sismos para Análisis No Lineal de Estructuras. Armenia: CEIFI, Uniquindío.
- Mordaz, M. (1991). Program for Computing Seismic Hazard. *Internal Report, Institute of Solid Earth Physics*. University of Bergen, Norway.
- NEHRP Recommended Provisions: Instructional Materials (FEMA 451B), N. E. (2010).

- Netxplica. (2016). Sismología, Slides de Geología. Brasil. Recuperado el 08 de 08 de 2019, de http://www.netxplica.com/loja/slides/geologia.10/PPT_GEO10_11/index.html
- NPTEL. (05 de 04 de 2013). *Introducción a la Ingeniería Sísmica*. (NPTEL, Editor) Recuperado el 12 de 12 de 2018, de <https://nptel.ac.in/courses/105101004/chapters/chapter1/1.5.html>
- Ordaz, e. a. (2017). R-CRISIS. Program and platform for computing seismic hazard. *ERN Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos SA de CV (ERN)*. Obtenido de www.r.crisis.com
- Pagani, M. M. (08 de 2014). The OpenQuake-engine Book: Hazard. *Global Earthquake Model (GEM) Technical Report*. doi:10.13117/-GEM.OPENQUAKE.TR2014.08.
- Pedraza, J., Carrasco, R. M., Díez Herrero, A., Marín Duque, J. F., Martín Ridauro, A., & Sanz Santos, M. A. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid: Rueda.
- R., M. (1976). Compute Program for Seismic Risk Analysis, . United States Department of Interior Geological Survey.
- Ramírez, J. E. (2004). *Ramírez, J. E. (). Actualización de la historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rescate de Occidente. (s.f.). *Conceptos básicos*. Recuperado el 08 de 08 de 2019, de <https://rescateoccidente.org/>
- Royal Academy of Berlin. (s.f.). *The History and Philosophy of Earthquakes Accompanied by John Michell's 'conjectures Concerning the Cause, and Observations upon the Ph'nomena of Earthquakes'*. Cambridge: Cambridge Univ Pr.
- RSN - Universidad de Costa Rica. (20 de 10 de 2015). *RSN - Sismología*. Recuperado el 08 de 08 de 2019, de Tabla de Intensidad de Mercalli: <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2504-cual-es-la-diferencia-entre-magnitud-e-intensidad#:~:text=La%20magnitud%20es%20utilizada%20para,material es%20y%20econ%C3%B3micos%20sufridos%20a>

- Servicio Geológico Colombiano. (1999). *Sismo de 1999/01/25*. (SGC) Recuperado el 01 de 12 de 2019, de <https://sish.sgc.gov.co/visor/sesionServlet?metodo=irAInfoDetallada&idSismo=62>
- SGC. (2018). *Glorario de Términos*. (S. G. Colombiano, Editor) Recuperado el 15 de 12 de 2018, de <https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx>
- SGC, Servicio Geológico Colombiano. (01 de 08 de 2019). *Sismicidad Histórica de Colombia*. Obtenido de Sismos por Magnitud: <http://sish.sgc.gov.co/visor/sesionServlet?metodo=irAPaginaAnterior>
- SSN México | Geofísica UNAM. (2016). *Preguntas Frecuentes Servicio Sismológico Nacional*. (S. México, Editor) Recuperado el 01 de 12 de 2019, de <http://www.ssn.unam.mx/divulgacion/preguntas/>
- UNISDR. (2015). *Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction - UNISDR, Sendai. Recuperado el 20 de Noviembre de 2018, de http://www.eird.org/americas/docs/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf
- Universidad de Tulane. (02 de 06 de 2018). *Desastres Naturales*. (S. A. Nelson, Productor) Recuperado el 12 de 12 de 2018, de http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/struct&materials.htm
- UPSeis - Michigan Tech University. (01 de 05 de 2017). *UPSeis an educational site for seismologist*. (M. M. Wood, & W. Pennington, Productores) Recuperado el 12 de 12 de 2018, de <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/index.html>
- USGS. (23 de 10 de 1997). *Tectonic Plate Boundaries*. (USGS, Editor, J. F. USGS, Productor, & USGS) Obtenido de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tectonic_plate_boundaries.png
- USGS. (05 de 05 de 1999). *This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics*. (USGS, Editor, W. J. Kious, R. I. Tilling, Productores, & USGS) Recuperado el 25 de 11 de 2018, de <https://www.usgs.gov/>

- Wikipedia Commons. (06 de 01 de 2014). *Cuatro tipos de fallas*. (W. Commons, Editor, & J. Gómez F., Productor) Recuperado el 12 de 12 de 2019, de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Four_types_of_faults.svg
- Wikipedia_EC. (23 de 09 de 2019). *Terremoto del Eje Cafetero*. Recuperado el 24 de 09 de 2019, de https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_del_eje_cafetero_de_1999
- Wikipedia_P. (18 de 09 de 2019). *Terremoto de Popayán de 1983*. Recuperado el 18 de 09 de 2019, de https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Popay%C3%A1n_de_1983
- Yela, Y. (2019). Evaluación de la Amenaza Sísmica en Colombia Basado en Una Distribución de Probabilidad Diferente a la Exponencial. *Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad del Quindío*. Armania.
- Zarifi Z., H. J. (2007). An insight Into the Bucaramanga Nest. *Tectonophysics, Volume 443*. doi:doi:10.1016/j.tecto.2007.06.004

Este libro se terminó de imprimir
En los talleres de Elizcom SAS
En el mes de septiembre 2019