

Adecuación de la ley de Gutenberg–Richter al contexto mexicano

Ana Elena Posada Sánchez, Edgar Iram Villagrán Arroyo y
Juan Pablo Hidalgo Toxqui

Resumen

En nuestro país los sismos son uno de los fenómenos naturales que despiertan mayor atención, por lo que su estudio requiere contar con un adecuado monitoreo y sistemas de alerta, entre los que el teléfono inteligente parece una buena opción. En este trabajo se presenta un estudio, soportado en la base de datos del Servicio Sismológico Nacional y en la ley de distribución de magnitudes sísmicas propuesta por Gutenberg y Richter –único modelo aceptado a nivel mundial–, para explicar la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos y sus magnitudes, de acuerdo con las regiones que presentan mayor cantidad de registros.

Palabras clave: sismo, magnitud, probabilidad de ocurrencia.

ADEQUACY OF GUTENBERG-RICHTER'S LAW TO THE MEXICAN CONTEXT

Abstract

In our country earthquakes are one of the natural phenomena that arises great interest, so their study requires adequate monitoring and alert systems, among which the smartphone seems as a good option. This work presents a study, supported by the National Seismological Service database and the seismic magnitudes distribution law proposed by Gutenberg and Richter –the only model accepted worldwide–, to explain the probability of occurrence of seismic events, as well as their magnitudes, according to the regions with the highest number of records.

Keywords: earthquake, magnitude, probability of occurrence.

Recepción: 01/07/2019. Aprobación: 30/06/2020.

doi: <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2020.21.6.1>



Ana Elena Posada Sánchez

anaelena.posada@correo.buap.mx
orcid.org/0000-0001-6328-2576

Es Ingeniero Civil y Maestra en Ingeniería Geotécnica por la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Profesora Investigadora de Tiempo Completo en la misma institución a partir de 1998. Imparte cursos de precálculo, estática, mecánica de suelos en las licenciaturas de la misma facultad, así como la asignatura de Seminario de Titulación I en la Maestría en Ingeniería, a partir 2014. Participó en el proyecto de la Red de Acelerógrafos de la Ciudad de Puebla, de forma conjunta con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) de 1998 hasta 2011, en el que intervino en la publicación de once informes técnicos de la operación, y el mantenimiento y recopilación de datos acelerográficos de la Ciudad de Puebla, con los que elaboró sus tesis tanto de licenciatura como de maestría. Fue Secretaria Académica de la Facultad de Ingeniería de la BUAP durante el período 2012-2016 e integrante del Consejo Universitario durante 2017-2019. Es autora y coautora de ocho capítulos de libro y ha publicado diferentes artículos en memorias de congresos nacionales e internacionales, además de que tiene seis artículos en revistas de circulación nacional y dos de circulación internacional.

Su principal área de investigación es la Ingeniería Sísmica, aunque también ha publicado sobre investigación en tutorías y en evaluación docente. Actualmente cuenta con el reconocimiento de perfil PRODEP por parte de la Secretaría de Educación Pública, es miembro del Cuerpo Académico BUAP-CA-222 y responsable del mismo a partir de 2018. Es miembro del Padrón de Investigadores de la BUAP desde 2020 y también de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica desde 2004.

Edgar Iram Villagrán Arroyo

iram.villagran@correo.buap.mx
orcid.org/0000-0003-0261-1721

Es Ingeniero Civil y Maestro en Ingeniería Estructural y en Ingeniería de Tránsito y Transporte por la Facultad de Ingeniería de la BUAP. Profesor Investigador de Tiempo Completo desde 1987. Imparte cursos a nivel licenciatura de todas las asignaturas del área de estructuras de Ingeniería Civil y de Análisis Matricial en la Maestría en Ingeniería de la misma facultad e institución. Ha sido jefe del área de Estructuras del Colegio de Ingeniería Civil en diferentes períodos, actualmente es decano de la academia de estructuras de este programa. Fue director de la Facultad de Ingeniería de la BUAP en el período 2012-2016. Fue evaluador del CACEI de 2002 a 2008, miembro del Comité Técnico del CENEVAL para el programa de Ingeniería Civil durante 2012 a 2016. Fue perito en Tránsito Terrestre de la Procuraduría General de Justicia del Estado de Puebla de 1990 a 1991. Cuenta con experiencia profesional de 34 años dentro del área de Ingeniería Estructural, participando en empresas como Ingeniería Estructural Síntesis Análisis y Diseño, S. A., así como Grupo de Ingeniería Estructural ovie. Actualmente cuenta con el perfil deseable PRODEP de la Secretaría de Educación Pública, es miembro del Padrón de Investigadores de la BUAP, miembro de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica y del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla. Su línea de investigación actual es la Dinámica Caótica Estructural.

Juan Pablo Hidalgo Toxqui

pablo.toxqui@correo.buap.mx
orcid.org/0000-0001-7493-3127

Es Doctor en Ingeniería con especialidad en Estructuras. Es Profesor Investigador Titular A Tiempo Completo, catedrático del Posgrado y la Licenciatura en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la BUAP. Ingeniero Civil por la Facultad de Ingeniería de la BUAP en el año 2006, posteriormente realizó estudios de Maestría en Ingeniería en la UNAM de donde se gradua con mención honorífica en 2009, y en 2016 obtuvo el título de Doctor en Filosofía en Ingeniería (PhD) por parte de la Universidad Nacional de Yokohama Japón (YNU). Además, es responsable del Laboratorio de Estructuras que forma parte del Laboratorio Integral de la FIBUAP, revisor para la *Revista Ingeniería* de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, y asesor de laboratorios privados en estructuras. Entre sus líneas de investigación se encuentran el comportamiento de elementos de concreto y mampostería en nuevos materiales en la construcción.

Introducción

Los sismos son uno de los fenómenos que más afectan a la República mexicana, particularmente porque el país se ubica en una región en la que se perciben con gran intensidad, como ocurrió con los eventos del 8 y 19 de septiembre de 2017 (SSN, 2017a, 2017b) y, más recientemente, el 23 de junio de 2020 (SSN, 2020). Aunque mucho hemos avanzado en materia de prevención, lo cierto es que, hasta este momento, nadie puede decir cuándo ni a qué hora sucederá el próximo terremoto. Esta incertidumbre nos hace temer por el bienestar de nuestras familias y el propio, lo que nos lleva a buscar cualquier medio que nos permita estar un paso adelante de la contingencia.

En el presente trabajo encontrarás una estimación matemática de la probabilidad de ocurrencia de eventos de pequeña, mediana y gran magnitud, en función de los datos estadísticos recopilados hasta la fecha, que pretende responder a la pregunta: ¿cómo responde la sismicidad de México a la ley de Gutenberg-Richter?

Antecedentes

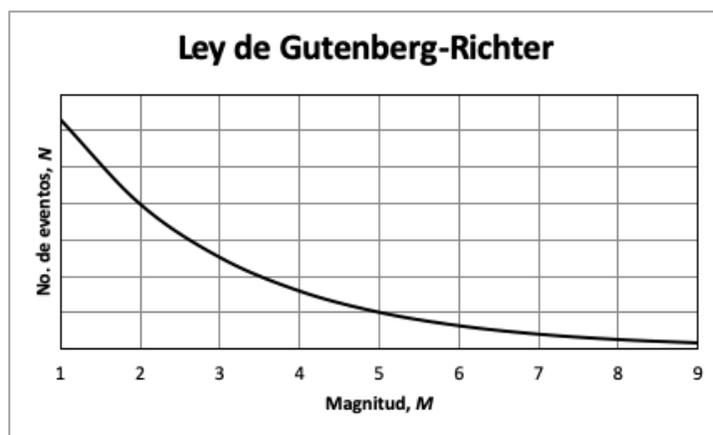
Ya desde el año 1944, los sismólogos Beno Gutenberg y Charles Francis Richter (G-R, Gutenberg y Richter, 1944) propusieron un modelo matemático que relaciona la magnitud de un evento sísmico con la ocurrencia de dicha magnitud en un intervalo de varios años –ver ecuación (1)–. A pesar de su simplicidad, el modelo ha demostrado ser muy acertado, independientemente de la región o del tiempo. Estrictamente hablando, los valores sí dependen de la región cuando ésta es relativamente pequeña, pero su variación no es muy significativa.

Ecuación (1). Modelo de Gutenberg – Richter

$$\log_{10} N = a + b * M \text{ ----- (1)}$$

Figura 1. Representación gráfica del modelo Gutenberg-Richter. . Como se puede observar, existe una cantidad mucho mayor de eventos de magnitud 1 que de magnitud 2 y mayor cantidad de eventos de magnitud 7 que de magnitud 8, pero la proporción entre una diferencia y la otra se reduce considerablemente cuando avanzamos hacia magnitudes mayores en la gráfica.

¹ Esto significa que el número de eventos de pequeña magnitud no se reduce en proporción directa al crecer la magnitud, sino que lo va haciendo cada vez en una proporción menor, de acuerdo con la base 10 del logaritmo. .



En la expresión (1), N es el número de sismos que se espera se produzcan con magnitud M . a representa la actividad sísmica de la región en estudio y b la

proporción logarítmica¹ entre sismos grandes y sismos pequeños. La figura 1 presenta cualitativamente la curva que se genera al aplicar el modelo, en donde el eje vertical representa el número de eventos N y el eje horizontal corresponde a su magnitud. De acuerdo con cada región, los valores de a y b pueden variar y son, precisamente ellos, los que caracterizan el comportamiento de cada región.

La magnitud de un sismo es, en resumidas cuentas, una medida de la energía que se libera al romperse las **placas tectónicas** (Significados, 2019), cuando chocan o rozan (ver figura 2). La forma en que este valor se mide ha variado con el tiempo, actualmente se cuenta con un procedimiento estandarizado para su cálculo y es al que nos referimos en este artículo, si estás interesado en conocer las distintas formas de cuantificar la magnitud, lo puedes hacer [aquí](#). (SSN, 2019a)

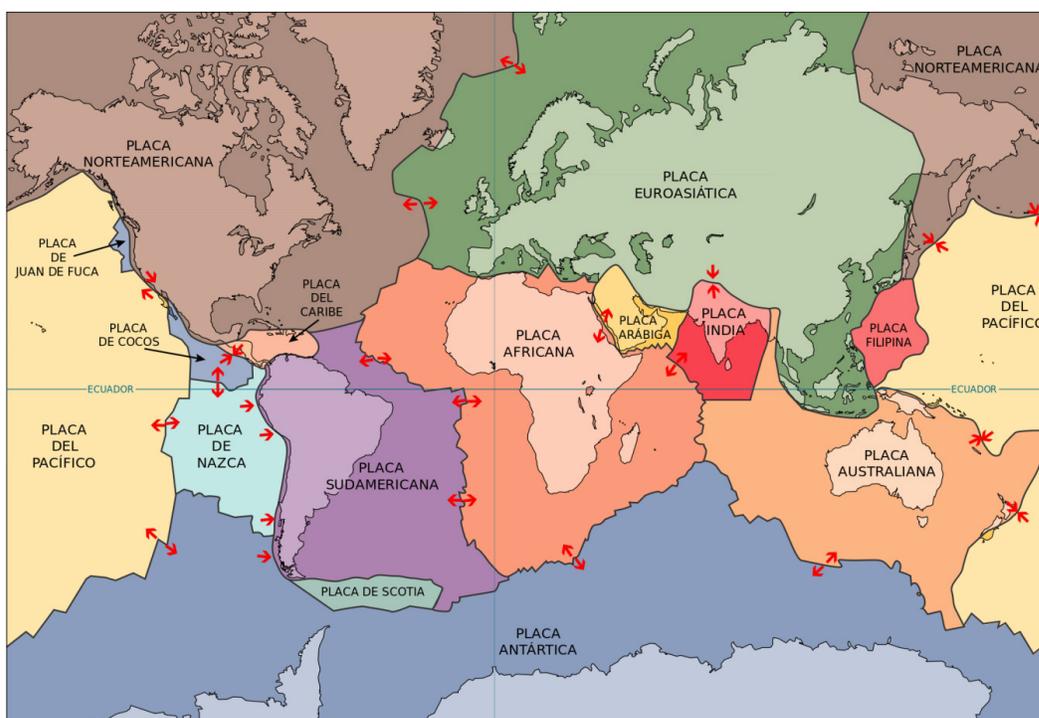


Figura 2. Placas tectónicas en el mundo (tomado de USGS, 2019). Recuperado de [Wikimedia Commons](#).

El hecho de que el término izquierdo de la ecuación (1) sea logarítmico tiene una interpretación física importante y es que el cambio de un entero en magnitud implica una energía liberada 32 veces mayor. Aclaremos esto mediante la analogía de la tabla 1. Si equiparamos la cantidad de energía necesaria para generar un sismo de magnitud 1 con el precio en pesos mexicanos, ésta equivaldría al costo de un dulce o 1 peso. La cantidad de energía para un sismo de magnitud 2 sería equiparable al precio de 6 viajes en metro, o 32 pesos, etcétera. Siguiendo esta lógica, un evento de magnitud 7 correspondería al presupuesto anual para la infraestructura de Ciudad Juárez, Chihuahua, y este no es el valor máximo de la escala.

Tabla 1. Analogía entre magnitud sísmica y unidades monetarias.

Magnitud	Producto equivalente	Precio en pesos mexicanos
1	1 dulce	1
2	6 viajes en el metro	32
3	2 pares de zapatos	1,024
4	Enganche para un auto económico	32,768
5	1 departamento sencillo	1,048,576
6	Un fraccionamiento pequeño	33,554,432
7	Presupuesto anual estimado para infraestructura en Ciudad Juárez, Chih. (Olmos, 2019)	1,073,741,824
8	Presupuesto anual estimado para infraestructura en la CDMX (Cantera, 2019)	34,359,738,368
9	7.2 veces el presupuesto original para la construcción del Tren Maya (Celis, 2019)	1,090,000,000,000

Sismos en México

En México se cuenta con bases de datos de eventos medidos por el Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2019). Seleccionamos los estados en los que se genera la mayor cantidad de sismos, más no los estados en los que son percibidos, incluso con gran intensidad. Por lo tanto, no se considera a la Ciudad de México, pues no es zona de generación de sismos de gran magnitud. Al revisar la información publicada, se pudo apreciar que los eventos con magnitud inferior a 3 son escasos en cuanto a número de registros se refiere, lo que indica que o no se registran todos o no se reportan, debido a que son prácticamente imperceptibles para nosotros.

Para este análisis, se tomaron en cuenta los eventos con magnitudes entre 3 y 8, ya que, de acuerdo con los registros del Servicio Sismológico Nacional, no se ha registrado algún evento de magnitud igual o mayor a 9 en el país.

Como lo indica Amador (2016), existe una relación lineal entre el logaritmo base diez del número de eventos y su magnitud; por lo tanto, es posible emplear el método de regresión por mínimos cuadrados² para calcular los parámetros *a* y *b* de cada región.

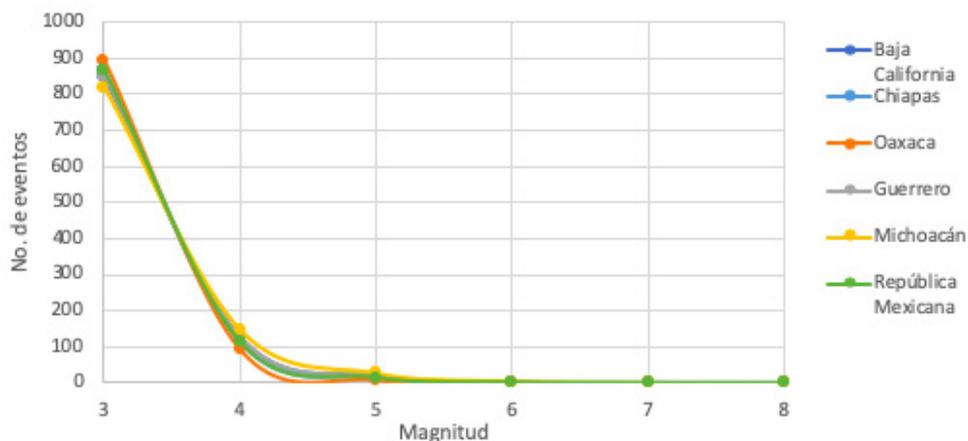


Figura 3. Distribución de magnitudes por cada 1000 eventos.

Se observa que la cantidad de eventos registrados de magnitud 3 es considerablemente superior a los de magnitud 4, la cantidad de eventos de magnitud 4 es mayor que los de magnitud 5, pero en menor proporción, y así sucesivamente. La variación no es exactamente igual para todos los estados, pero los comportamientos de las diferentes curvas son muy similares.

² Es un procedimiento para encontrar la forma general de la función que representa el comportamiento general de una combinación de puntos, sin que necesariamente toque a todos los puntos, sino que sea la que más cerca se encuentre del conjunto en general.

Una vez realizada la correlación matemática correspondiente a cada estado (cálculo de los valores de a y b), se encontró que la forma de la curva que corresponde a la ley de Gutenberg-Richter para los estados analizados es la que se presenta en la figura 3.

Como se puede observar, la ley de Gutenberg-Richter representa con gran precisión la relación entre magnitud y número de eventos para los estados seleccionados. Los parámetros a y b para cada estado oscilan entre 5.95 y 7.75 para el valor de a , mientras que van de -0.743 y -0.971 para el valor de b .

La figura 3 muestra la distribución de los eventos según estos parámetros, mismos que fueron ajustados para 1000 eventos y no de forma temporal como sugieren Gutenberg y Richter, sin embargo, y como se aprecia, este número es suficiente para observar la tendencia.

Aplicando la ley

Plantearémos una segunda pregunta, ¿cuántos sismos de magnitud menor a 3 y cuántos de magnitud 9 o superior se podrían esperar dadas las mediciones realizadas? Para resolver la pregunta se emplearon los valores de a y b del paso anterior para conocer la distribución de probabilidades, no solamente de lo registrado, sino también de lo que no, es decir, sismos “pequeños”, menores a 3, y “muy grandes”, iguales o mayores a 9. Al mismo tiempo, se ajustaron los valores de tal manera que apareciera por lo menos un evento de magnitud 9. A este procedimiento se le conoce como *extrapolación*. La tabla 2 muestra esta variación.

Magnitud	Estados				
	Baja California	Chiapas	Guerrero	Michoacán	Oaxaca
1	3,527,246	9,712,500	4,036,145	881,113	58,976,255
2	535,804	1,299,914	602,866	159,185	6,300,029
3	81,391	173,980	90,048	28,759	672,989
4	12,364	23,285	13,450	5,196	71,891
5	1,878	3,116	2,009	939	7,680
6	285	417	300	170	820
7	43	56	45	31	88
8	7	7	7	6	9
9	1	1	1	1	1
Porcentaje de eventos de la base analizada	3%	18%	16%	4%	38%

Tabla 2. Proporción entre eventos de diferentes magnitudes respecto de uno con magnitud 9 o superior.

En la tabla 2 se presentan los porcentajes por estado con respecto al total de eventos de la [base de datos](#), que es de 166,488 temblores, registrados a partir del año 1900 hasta mayo de 2019.

La última fila suma 79%, ya que no incluye los eventos registrados en los estados no considerados, ni aquellos cuya magnitud fue no calculable, por presentar una sismicidad muy pequeña.

La tabla 2 puede crear alguna confusión al hacer una comparación simple de los valores. En primer lugar, no significa que, por ejemplo, en Oaxaca por cada 59 millones de temblores de magnitud 1, sucedan 820 de magnitud 6 o 9 de magnitud 8. Tampoco significa que hay que contar 88 sismos de magnitud 7 para que suceda uno de magnitud 9. Lo que nos dice la ley de Gutenberg-Richter es que es más probable que se generen sismos de baja magnitud a lo largo del tiempo (en realidad muchos años), a que se presenten eventos muy destructivos para nosotros; sin embargo, el que sean poco probables no los convierte en imposibles.

Tampoco se debe pensar que Guerrero requiere menos sismos de magnitud 7 que Chiapas para tener una probabilidad de un evento magnitud 9. Lo que debe interpretarse es que en Guerrero se registran menos movimientos telúricos que en Chiapas para el mismo intervalo de tiempo, lo que significa que en Guerrero se requieren más años para tener la misma probabilidad.

Para aclarar lo anterior, supongamos que se lanza una moneda y se cuenta el número de águilas y de soles. La probabilidad indica que, con el suficiente número de lanzamientos, el porcentaje de unas y otros será del 50%. Esto no significa que en el proceso no puedan salir, por ejemplo, cuatro águilas seguidas. La naturaleza de los sismos es similar, sólo que su moneda tiene 9 caras (y sus fracciones), y está cargada hacia los valores menores.

Otro punto importante es que la división geopolítica de México poco tiene que ver con los mecanismos de generación de terremotos. Una división geográfica más adecuada para comprender la sismicidad consistiría en generar una gran región que abarcara todos aquellos sitios en los que la sismicidad es alta, por ejemplo, Chiapas-Michoacán. Con esto se tendría que la variación de los valores *a* y *b*, mencionados al inicio, tienen que ver más con una división arbitraria del territorio que con la sismicidad.

Consideramos ahora los últimos 10 años de reportes del ssn y los presentamos en la tabla 3 (ssn, 2019).

Año	Número de sismos reportados
2009	2301
2010	3462
2011	4272
2012	5244
2013	5361

Tabla 3. Eventos reportados cada año por el ssn en la última década.

2014	7608
2015	10946
2016	15547
2017	26363
2018	30193

Nuevamente alertamos sobre la interpretación simple de los números. La tabla 3 no indica que el número de sismos sea cada vez mayor, la verdadera razón de este incremento obedece a que hay más y mejores equipos cada año (y con ello más trabajo), lo que habla muy bien del SSN. Sin embargo, el hecho de que empecemos a medir algún fenómeno no significa que acaba de iniciar. Tratar de acoplarnos al conteo es muy complicado porque empezó hace millones de años, pero se espera que, con el tiempo, el número de sismos registrados anualmente se llegue a estabilizar alrededor de una cifra, por lo que los valores de a y b tenderán a tener menor variación.

El Sistema de Alerta Sísmica Mexicano ([sasmex](#)) y algunas aplicaciones para dispositivos móviles son hasta ahora la mejor opción que se tiene para mitigar los efectos negativos que puede generar un evento sísmico de gran magnitud sobre la población. Es conveniente conocer las restricciones con las que cuenta cada una de estas aplicaciones, por ejemplo, los segundos previos al arribo de las ondas generadas por un sismo que acaba de ocurrir en un sitio distante.

Conclusión

La apuesta “a que tiembla mañana” es casi segura, siempre y cuando no se establezca ni el epicentro ni la magnitud, puesto que, como podemos ver en la tabla 3, en 2018 se registraron casi 100 sismos por día, en promedio. El conocimiento de la probabilidad de ocurrencia sólo nos permite describir la forma en que el fenómeno se presenta estadísticamente para la república Mexicana y para algunos estados; sin embargo, sigue sin poder considerarse como una herramienta de predicción. Por lo anterior, la mejor recomendación que puede hacerse con respecto a la probable ocurrencia de sismos de gran magnitud es estar alerta y contar con planes de contingencia que incluyan el qué hacer antes, durante y después de un sismo de mediana o gran magnitud (UNAM, 2020).

Referencias

- ❖ Amador C., Z. (2016). *Terremotos como sistemas complejos: estudio de la ley de Gutenberg-Richter* [presentación] <https://ergodic.ugr.es/jmarro/fisico/pages/16Amador-Terremotos.pdf>
- ❖ Cantera, S. (2019, 28 de enero). Industria de la Construcción estima inversión por 30 mil mdp para la Ciudad de México. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/cartera/economia/industria-de-la-construccion-estima-inversion-por-30-mil-mdp-para-la-ciudad-de>

- ❖ Celis, F. (2019, 26 de junio). Gobierno no aumentará presupuesto de 150,000 mdp para el Tren Maya:Fonatur. *Forbes, México*. <https://www.forbes.com.mx/gobierno-no-aumentara-presupuesto-de-150000-mdp-para-el-tren-maya-fonatur/>
- ❖ CENAPRED. (2020). *Sistemas de Alerta Temprana* [infografía]. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Ciudad de México. www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/298-INFOGRAFASISTEMASDEALERTATEMPRANA.pdf
- ❖ Gutenberg, B. y C. F. Richter. (1944). Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 185-188, California Institute of Technology.
- ❖ Olmos, J. (2019, 6 de marzo). Plantean invertir mil mdp en obras para Juárez. *El Diario de Juárez*. <https://diario.mx/juarez/plantean-invertir-mil-mdp-en-obras-para-juarez-20190306-1486499/>
- ❖ Servicio Sismológico Nacional. (2017). *Sismo de tehuantepec (2017-09-07 23:49 MW 8.2)* [elaborado el 7 de septiembre de 2017 y actualizado el 28 de noviembre de 2017]. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/>
- ❖ Servicio Sismológico Nacional. (2017). *Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)* [elaborado el 25 de septiembre de 2017]. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/>
- ❖ Servicio Sismológico Nacional. (2019). *Magnitud de un sismo*. <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Magnitud-de-un-sismo.pdf>
- ❖ Servicio Sismológico Nacional. (2019). *Catálogo de sismos*. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- ❖ Servicio Sismológico Nacional. (2020). Sismo del 23 de junio de 2020, Costa de Oaxaca (M 7.4) [elaborado el 23 de junio de 2020 y actualizado el 24 de junio de 2020]. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/>
- ❖ Significados. (2019). *¿Qué son las placas tectónicas?* <https://www.significados.com/placas-tectonicas/>
- ❖ UNAM. (2020). *¿Qué hacer en caso de sismo?* <https://www.unam.mx/medidas-de-emergencia/sismos>
- ❖ USGS. (2014). *Las 15 placas tectónicas mayores* [versión en español Daroca90 cc BY-SA 3.0]. <http://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html>

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

- ❖ Posada Sánchez, Ana Elena, Villagrán Arroyo, Edgar Iram e Hidalgo Toxqui, Juan Pablo. (2020, noviembre-diciembre). Adecuación de la Ley de Gutenberg-Richter al contexto mexicano. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 21(6). DOI: <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2020.21.6.1>