

Mapa de isosistas de las aceleraciones sísmicas máximas del suelo, provocadas por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021 en el estado de Guerrero

Map of isosists of the maximum seismic accelerations of the ground, caused by the earthquake that occurred on September 7, 2021 in the state of Guerrero

Ricardo Flores-Martínez*✉, Roberto Arroyo-Matus*, Rocío Nayelly Ramos-Bernal*

Flores-Martínez, R., Arroyo-Matus, R., & Ramos-Bernal, R. N. (2023). Mapa de isosistas de las aceleraciones sísmicas máximas del suelo, provocadas por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021 en el estado de Guerrero. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 31(90), e4195, <https://doi.org/10.33064/iycuaa2023904195>

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados obtenidos al analizar el comportamiento de las curvas isosistas generadas por las aceleraciones sísmicas máximas horizontales del suelo por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021 en el estado de Guerrero. Para la elaboración del mapa de isosistas se utilizó información de la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM), información complementada con la estimación de datos a partir de una regresión exponencial de los datos obtenidos mediante el programa Curve Expert. Se compararon curvas teóricas de atenuación de Clemente Chavez (2010) y García et al. (2005) con la curva generada por la regresión de los datos. La elaboración del mapa de isosistas se realizó con ayuda del software de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo identificar las zonas donde se presentaron mayores aceleraciones sísmicas y la atenuación de las aceleraciones respecto a la distancia.

Palabras clave: mapa de isosistas; aceleraciones sísmicas; atenuación; acelerógrafos; SIG; datos estimados.

ABSTRACT

This paper presents the results obtained by analyzing the behavior of the isosist curves generated by the maximum horizontal seismic accelerations of the soil by the earthquake that occurred on September 7, 2021 in the state of Guerrero. Information from the

Recibido: 7 de noviembre de 2022 Aceptado: 28 de agosto de 2023 Publicado: 30 de septiembre de 2023

*Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico, Unidad Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas S/N, Ciudad Universitaria, C. P. 39070, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México. Correo electrónico: 08053762@uagro.mx; miidt@uagro.mx; rramos@uagro.mx. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2778-5162>; <https://orcid.org/0000-0002-8388-4299>; <https://orcid.org/0000-0001-6284-3263>

✉ Autor para correspondencia

Accelerographic Network of the UNAM Institute of Engineering (RAII-UNAM) was used for the development of the isosist map, which was complemented by the estimation of data based on an exponential regression of the data obtained through the curve expert program. Theoretical attenuation curves of Clemente Chavez (2010) and García et al. (2005) were compared with the curve generated by data regression. The development of the map of isosists was carried out with the help of the Geographic Information Systems (GIS) software, allowing to identify the areas where there were greater seismic accelerations and the attenuation of the accelerations regarding the distance.

Keywords: map of isosists; seismic accelerations; attenuation; accelerographs; SIG; estimated data.

INTRODUCCIÓN

México se encuentra ubicado entre la interacción de cinco placas tectónicas: Caribe, Pacífico, Norteamericana, Cocos y Rivera. Las placas tectónicas de Cocos y Rivera se encuentran por debajo de la placa Norteamericana formando zonas de subducción. Guerrero junto con otros estados forman parte de la interacción entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana, por lo que presentan un mayor peligro debido a que los eventos sísmicos se presentan con mayor frecuencia, intensidad y magnitud (Inca Cabrera, julio de 2013). Las intensidades sísmicas se miden por el efecto que causan los eventos sísmicos a los diferentes tipos de suelo y a las estructuras que se encuentran sobre ella; si se trata de un suelo blando el efecto será mayor y si se trata de un suelo duro el efecto será menor; la unidad de medida de la intensidad es el Mercalli Modificada (MM).

Por otra parte, las ondas sísmicas mueven edificios en todas direcciones y la razón del cambio en sus movimientos se conoce como aceleración (Gutenberg & Richter, julio de 1942). Los mapas de isosistas representan zonas con la misma intensidad percibida. Específicamente las líneas cerradas que separan estas zonas se denominan isosistas porque en cada línea encierra valores iguales de aceleraciones o intensidades sísmicas, los mapas de isosistas son de gran valor en estudios de sismos históricos (Cordero Castellanos & Quirós Gomez, 7 de febrero de 2014).

Los mapas de isosistas han permitido conocer diversos parámetros físicos que definen los procesos que se desarrollan alrededor de los sismos como la respuesta dinámica de los suelos y los patrones de atenuación de la intensidad (Tavera & Cuya, enero de 2019).

La importancia de los mapas de isosistas asociadas a las aceleraciones sísmicas es que ayudan a conocer la zonificación de un lugar determinado. Los sismos que presentaron aceleraciones fuertes y tuvieron grandes intensidades son de gran ayuda para conocer el comportamiento del suelo y con ello se pueden llegar a proponer nuevos coeficientes sísmicos para evitar que esas aceleraciones ocasionen grandes daños estructurales dentro de las zonas afectadas.

Los sismos que se han presentado en el estado de Guerrero y que han causado daños estructurales importantes (daños donde las estructuras necesitan reparación o refuerzo) a los inmuebles son aquellos iguales o mayores a magnitud 6 (Redacción Aristegui Noticias, 19 de abril de 2023). Algunos de los eventos sísmicos que han causado fuertes

aceleraciones y en consecuencia produjeron grandes intensidades en el estado de Guerrero se mencionan a continuación:

Sismo del 28 de julio de 1957

El 28 de julio de 1957 los sismógrafos de la estación de Tacubaya registraron un sismo de magnitud 7.5 en la escala de Richter a las 02:40:51 horas y epicentro a 358 km al sur de Tacubaya cuyas coordenadas fueron $16^{\circ}21' N$ y $99^{\circ}13' W$. En la figura 1 se muestra que el valor de intensidad máxima fue VII en la escala de Mercalli modificada. Las intensidades se calcularon a través de encuestas para medir la cantidad de daño que sufrieron las zonas más afectadas por este sismo, como se encuentra en el artículo "El macrosismo del 28 de julio de 1957" (Figueroa, 1957).

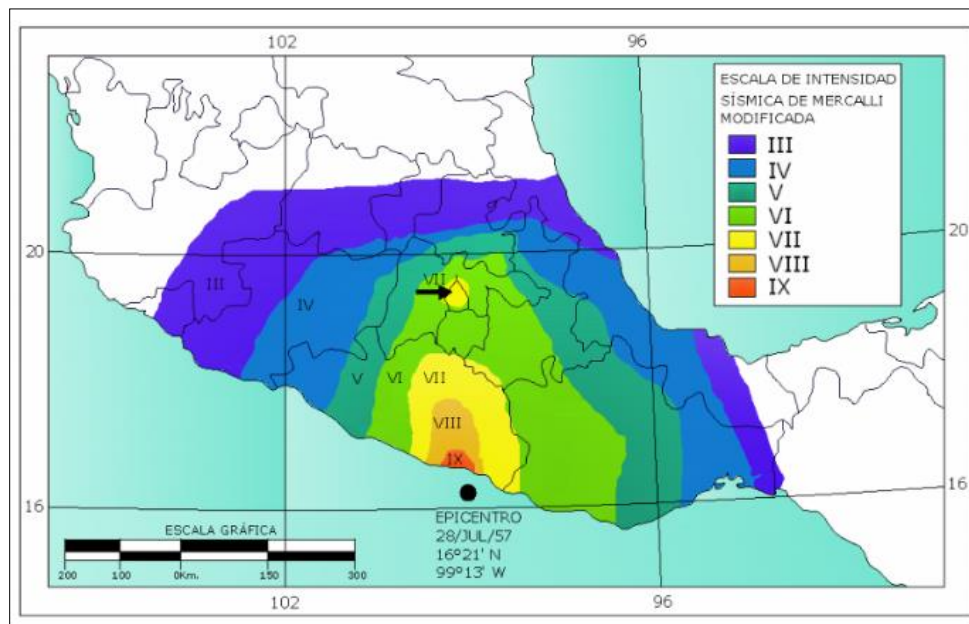


Figura 1. Curvas isosistas y epicentro del sismo del 28 de julio de 1957. Imagen tomada de Figueroa (1957).

En la figura 2 se muestran los mapas de isosistas de cuatro sismos que se han registrado en la ciudad de Chilpancingo, capital del estado de Guerrero; estos sismos presentaron grandes efectos cerca de la zona donde fue su epicentro (Gama García, diciembre de 2010).

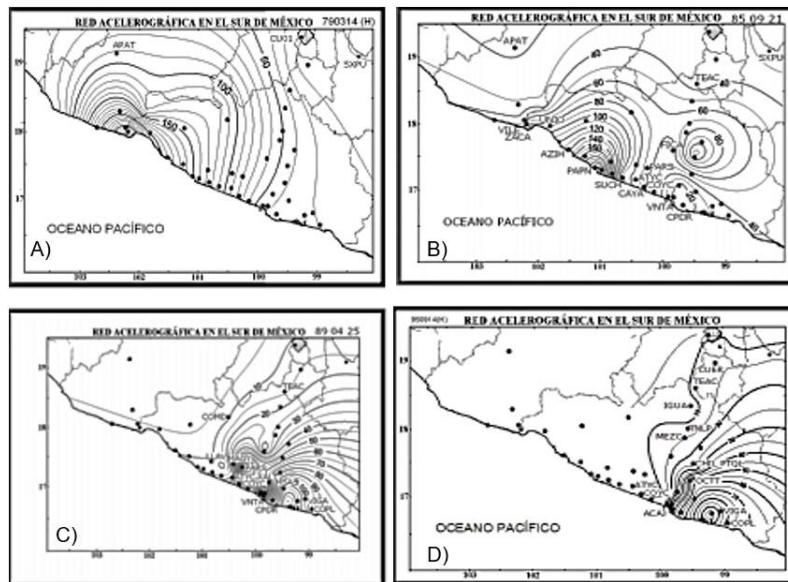


Figura 2. A) Curvas isosistas del sismo ocurrido el 14 de marzo de 1979, B) curvas isosistas del sismo ocurrido el 21 de septiembre de 1985, C) curvas isosistas del sismo ocurrido el 25 de abril de 1989 y D) curvas isosistas del sismo ocurrido el 14 de septiembre de 1995. Imágenes de Gama García (diciembre de 2010).

La dirección Norte-Sur fue donde se tuvo mayor efecto porque hubo más daños que en la dirección Este-Oeste. Por otro lado, los cuatro mapas de isosistas de las aceleraciones máximas del suelo muestran una relación y proporción en sus aceleraciones conforme se va disipando la energía liberada a través de la distancia recorrida. La elaboración de los mapas de isosistas se realizó sólo con la información de la Red Acelerográfica del Sur de México. En la figura 3 se observa el evento sísmico producido el 20 de marzo de 2012 que originó un mapa de isosistas basado en las observaciones realizadas por el equipo de reconocimiento de la UNAM, además de información recopilada tanto en medios electrónicos como de la prensa. La intensidad máxima fue de VII a VIII en escala de Mercalli Modificado. La mitad de la información recabada se obtuvo mediante la observación y la otra mitad se obtuvo por medio de comunicación. El comportamiento de las curvas manifiesta que las intensidades que se dieron por este sismo pasaron de forma proporcional de una escala a otra (Figuroa, 1974).

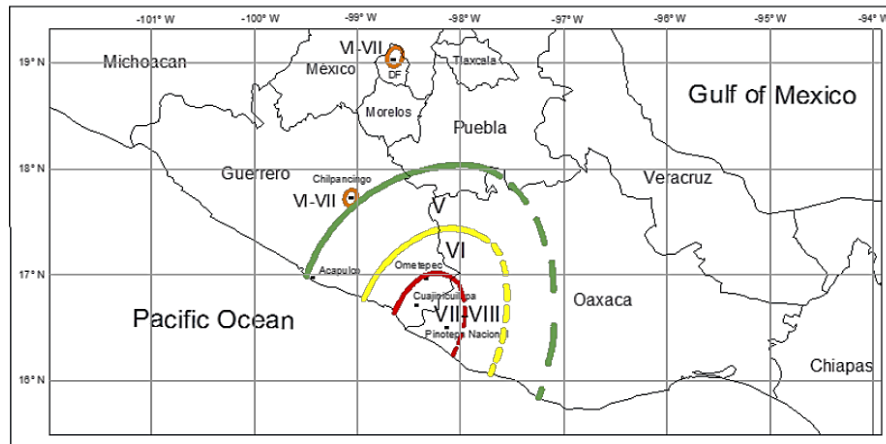


Figura 3. Mapa de isosistas del sismo de Ometepepec registrado el 20 de marzo de 2012. Las localidades visitadas están representadas en la línea continua, mientras que la línea discontinua son sitios investigados mediante medios electrónicos y la prensa. Imagen tomada de Figueroa (1974).

El evento sísmico del 13 de abril de 2007 se registró en 27 estaciones de la Red de Banda Ancha del SSN, en la costa de Guerrero y epicentro en las coordenadas 17.168° N, 100.379° W a 32.7 km de profundidad. La mayor aceleración fue de 90 gales (cm/s^2) y se registró en la zona más cercana al epicentro. El mapa de isosistas de las aceleraciones máximas del suelo se generó interpolando las aceleraciones obtenidas a partir de 27 estaciones de la Red de Banda ancha. Los valores graficados son los que corresponden a la aceleración horizontal $A_{\text{máx}}$. La figura 4 muestra el mapa de isosistas de las aceleraciones sísmicas máximas del sismo y se utilizó el método de interpolación Kriging para su elaboración, el cual consistió en una regresión lineal de los datos del evento.

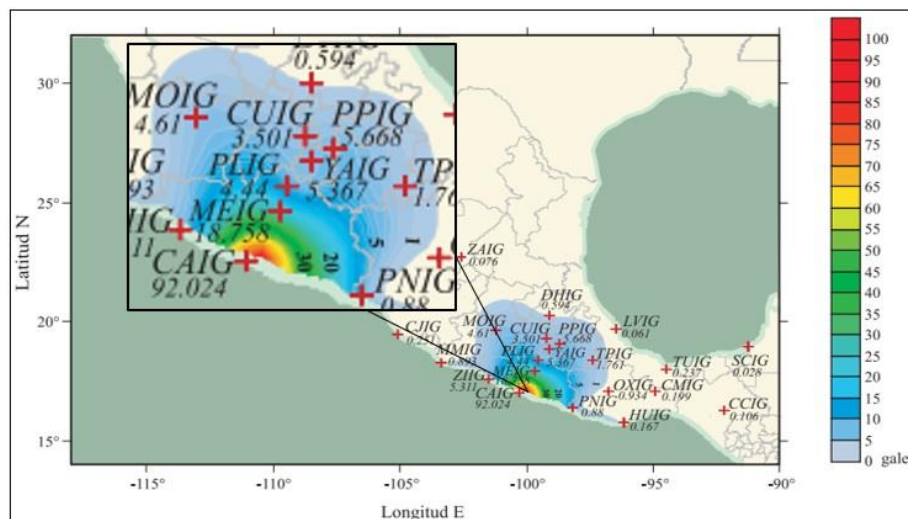


Figura 4. Mapa de isosistas de las aceleraciones máximas del sismo del 13 de abril de 2007, Guerrero, México. Imagen tomada de Servicio Sismológico Nacional (7 de septiembre de 2021).

Uno de los eventos sísmicos más recientes y que tuvo gran impacto en el estado de Guerrero fue el ocurrido el 7 de septiembre de 2021, de magnitud 7.1, ubicado a 11 km al

Sureste de Acapulco. El sismo ocurrió a las 20:47:46, hora del centro de México. Su epicentro se localizó a 10 km de profundidad, en la latitud 16.78°N y longitud 99.93°W (Servicio Sismológico Nacional, 7 de septiembre de 2021). El sismo presentó aceleraciones fuertes principalmente en las zonas cercanas al epicentro, las aceleraciones presentadas causaron daños materiales y dejaron sin servicios a varios municipios del estado de Guerrero, se presentaron aceleraciones de hasta 533 cm/s² cerca del epicentro.

El mapa preliminar de PGA (*Peak Ground Acceleration*) a nivel nacional se obtuvo empleando el programa GenMaps y los datos registrados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM) en tiempo real. El método de interpolación que utilizó el Servicio Sismológico Nacional (7 de septiembre de 2021) para generar el mapa fue el propuesto por Kitanidis (1986). La figura 5 muestra que en dirección Este-Oeste se presentaron a una mayor distancia las aceleraciones más fuertes provocados por el evento sísmico ocurrido el 7 de septiembre del 2021 en el estado de Guerrero.

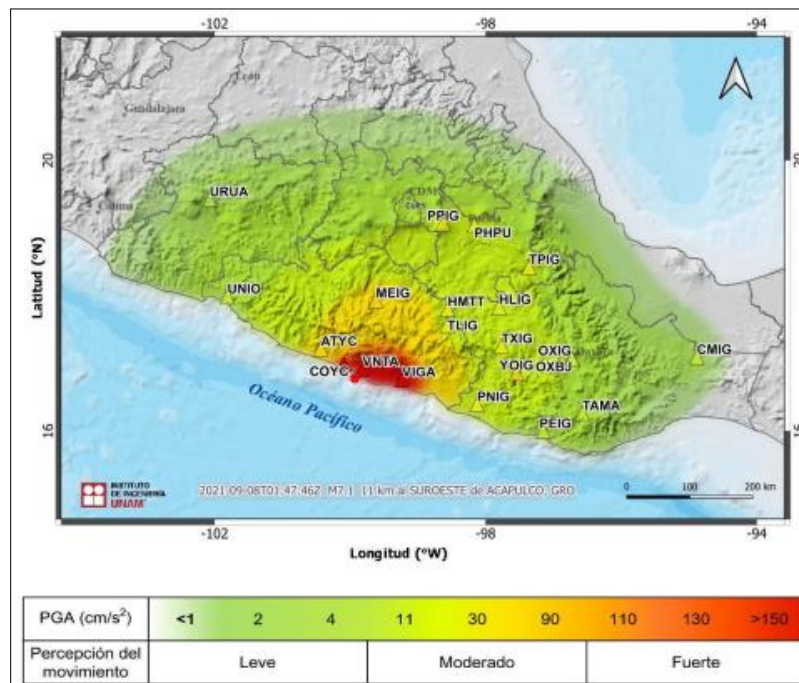


Figura 5. Mapa de intensidad de la Aceleración Máxima del Suelo (PGA).
Imagen tomada de Instituto de Ingeniería de la UNAM (2021).

El objetivo principal de este trabajo fue generar un mapa de isosistas de las aceleraciones ocasionados por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021, estimando información por medio de la regresión exponencial de los datos obtenidos de las estaciones acelerográficas, generando el mapa por medio del software SIG (ArcMap) y utilizando el método de interpolación IDW (*Inverse Distance Weighting*, por sus siglas en inglés). Ya que el sismo presentado fue de gran magnitud y como se muestra en la figura 5, presentó aceleraciones con percepciones leve, moderado y fuerte.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método utilizado es de tipo analítico, la información recabada se dio mediante la RAIL-UNAM pertenecientes a las estaciones que se encuentran en el estado de Guerrero y también a las estaciones acelerográficas de los estados vecinos para obtener una mayor precisión en la generación de los mapas de isosistas (Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2021). Las aceleraciones sísmicas fueron registradas por las estaciones de la RAIL-UNAM como se muestra en la tabla 1. La aceleración máxima del suelo registrada pertenece a la estación de la red permanente de monitoreo del IINGEN, fue de 533 cm/s² en la estación Acapulco Centro Cultural (ACAC).

Tabla 1
Datos de las estaciones acelerográficas que se utilizaron para el acopio de la información del Servicio Sismológico Nacional del sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021

Clave	Estado	Latitud N(°)	Longitud W (°)	Distancia epicentral (km)	PGA (cm/s ²)
VNTA	GRO	16.914260	- 99.818	19	206.57
COYC	GRO	16.997788	- 100.089	29	167.65
ATYC	GRO	17.213361	- 100.432	71	39.27
VIGA	GRO	16.758703	- 99.233	74	355.08
HMTT	GRO	17.798341	- 98.559	184	27.96
UNIO	GRO	17.987620	- 101.810	240	7.17
ACAC	GRO	16.84851	-99.8500	11	533
CMSG	CMX	19.255526	- 99.0482	289	29.6
CMP5	CMX	19.307133	- 99.1343	292	34.85
CUP5	CMX	19.330240	- 99.1810	293	14.51
CMMG	CMX	19.332018	- 99.1156	295	61.11
CMRC	CMX	19.355282	- 99.1212	297	47.10
SCT2	CMX	19.394694	- 99.1486	300	34.81
CMP7	CMX	19.419333	- 99.1257	304	47.67
PHPU	PUE	19.044223	- 98.1684	312	21.03
OXBJ	OAX	17.067337	- 96.7238	343	9.06
URUA	MIC	19.421758	- 102.074	370	3.95
COMA	COL	19.325266	- 103.760	493	1.70
MANZ	COL	19.054336	- 104.297	526	0.56
TON2	JAL	20.624610	-103.235	550	0.82

Nota: Elaboración propia con los datos obtenidos.

Las ecuaciones de atenuación 1 y 2 se tomaron en cuenta para la elaboración de las curvas predictivas porque cumple con las condiciones del sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021 en el estado de Guerrero. Se elaboraron gráficas de aceleración vs. distancia, donde se generaron curvas predictivas teóricas de las ecuaciones de atenuación de Clemente Chavez (2010) para sismos producidos en zonas de subducción con profundidades entre 5 y 30 km, magnitudes que oscilan de 4.3 a 6.6 (ecuación 1) y las ecuaciones de atenuación de García, Krishna Singh, Herráiz, Ordaz, & Francisco Pacheco (2005) para sismos producidos en zonas de subducción con profundidades que varían entre 40 y 75 km y magnitudes de 5.8 a 7.4, con distancias epicentrales que varía desde 50 hasta 400 km de distancia (ecuación 2).

$$\text{Log } Y = (-0.250 + 0.325 M_w - 0.00608 H - 0.0047R - 0.0109\log R) \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

Y= Aceleración máxima (cm/s²)

M_w= Magnitud de momento

R= Distancia más cercana a la superficie de falla (km)

H= Profundidad focal en km

$$\text{Log } Y = (C_1 + C_2 M_w + C_3 R - C_4 \log R + C_5 H + \sigma) \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

Y= Componente horizontal de pseudo-aceleración (cm/s²) calculado para un periodo

M_w= Magnitud de momento

C₁-C₅= Coeficientes dependientes del periodo en estudio, obtenidos de la regresión de datos, presentados en la tabla 2 (García et al., 2005).

H= Profundidad focal en km

R= Distancia más cercana a la superficie de falla en km

Tabla 2

Coeficientes de regresión para componente horizontal medio cuadrático

f(Hz)	C1	C2	C3	C4	C5	σ*	σ _r	σ _e
0.2	-4.3	0.97	-0.0007	1	0.001	0.25	0.22	0.12
0.25	-3.9	0.94	-0.0008	1	0.0009	0.25	0.22	0.12
0.33	-3.3	0.89	-0.0009	1	0.0009	0.26	0.22	0.14
0.5	-2.7	0.85	-0.0012	1	0.001	0.26	0.24	0.10
0.67	-2.3	0.81	-0.0014	1	0.002	0.28	0.26	0.10
1	-1.7	0.75	-0.0017	1	0.003	0.28	0.26	0.09
1.33	-1.3	0.71	-0.0020	1	0.004	0.27	0.26	0.09
2	-0.8	0.67	-0.0024	1	0.004	0.26	0.24	0.11
2.5	-0.6	0.64	-0.0028	1	0.005	0.27	0.24	0.13
3.33	-0.3	0.63	-0.0033	1	0.005	0.28	0.23	0.16
5	0.05	0.59	-0.0037	1	0.007	0.28	0.24	0.14
10	0.4	0.55	-0.0041	1	0.008	0.33	0.32	0.10
13.33	0.2	0.57	-0.0043	1	0.008	0.34	0.32	0.10
20	0.1	0.58	-0.0043	1	0.008	0.34	0.32	0.09
25	0.03	0.59	-0.0043	1	0.007	0.32	0.31	0.08
PGA	-0.2	0.59	-0.0039	1	0.008	0.28	0.27	0.10
PGV	-2.4	0.71	-0.0023	1	0.004	0.26	0.24	0.09

Nota: Elaboración propia.

Para la elaboración de las gráficas de atenuación se estimaron datos a partir de una regresión exponencial de la información obtenida con ayuda del programa CurveExpert. Es una solución multiplataforma para el ajuste de curvas y el análisis de datos. Los datos se pueden modelar utilizando una caja de herramientas de modelos de regresión

lineal, modelos de regresión no lineal, métodos de suavizado o varios tipos de splines. Este programa fue diseñado por Daniel Hyams para ajustar modelos matemáticos a un conjunto de datos. Hay más de 60 modelos incorporados, pero el usuario también puede definir modelos de regresión personalizados (Contreras Quiñones, marzo de 2005).

El proceso de encontrar el mejor ajuste se puede automatizar al permitir que CurveExpert compare sus datos con cada modelo para elegir la mejor curva. El programa está diseñado con el propósito de generar resultados de alta calidad mientras ahorra tiempo en el proceso. Se puede crear y guardar un número arbitrario de gráficos. La representación de los gráficos tiene calidad de publicación, con la capacidad de personalizar ampliamente cada gráfico. Los resultados se clasifican automáticamente según su elección de puntaje, coeficiente de correlación, error estándar o coeficiente de determinación, validado contra el Proyecto de Conjuntos de Datos de Referencia Estadística del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (G. Hyams, 17 de octubre de 2020).

Se utilizó la ecuación 3 de Gutenberg & Richter (julio de 1942) para el cálculo de las intensidades a partir de las aceleraciones máximas, relacionando las aceleraciones máximas del suelo que se dieron en el lugar con las intensidades a escala de Mercalli Modificada (MM). Con esta ecuación se definieron los rangos de aceleraciones para las curvas isosistas del mapa como se muestra en la tabla 3.

$$I = 3 \log (a) + 1.5$$



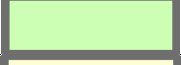




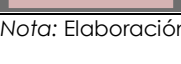
(Ecuación 3)

donde:

a= aceleración sísmica

I= Intensidad de Mercalli Modificada (MM)

Tabla 3
*Relación de intensidad y aceleración sísmica
máxima del suelo (Gutenberg & Richter, julio de
1942)*

Simbología	Intensidad (MM)	Aceleraciones (cm/s ²)
	I-III	< 6
	IV	6 - 14
	V	14 - 31
	VI	31 - 68
	VII	68 - 146
	VIII	146 - 316
	IX	316 - 681
	X	> 681

Nota: Elaboración propia.

La generación del mapa de isosistas se realizó por medio de software SIG utilizando el método de interpolación IDW. Este método toma a cada punto medido con una influencia local que disminuye con la distancia. Les asigna una ponderación mayor a los puntos más cercanos a la posición por predecir que a aquellos que se encuentran más alejados (Fallas, 2007). Los SIG son sistemas de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, administración, manipulación, análisis, modelamiento y graficación de datos u objetos referenciados espacialmente para resolver problemas complejos de planeación y administración. Un SIG es una herramienta de análisis de información que debe tener una referencia espacial y debe conservar una inteligencia propia sobre la topología y representación (Carmona & Monsalve, 1999).

El funcionamiento de los SIG permite almacenar información del mundo como una colección de capas temáticas que pueden relacionarse geográficamente. Los dos tipos de información que existen son el modelo vectorial y el modelo ráster. En el modelo vectorial los datos se pueden representar mediante puntos, líneas o polígonos contenidos en un sistema de coordenadas que al asignarle otros atributos recibe el nombre de SHAPE. El modelo ráster representa que mapas están conformados por una rejilla y los elementos dentro de la cuadrícula son las celdas; cada celda tiene asignado un valor particular del mapa, por lo que un área delimitada será interpretada por los valores particulares de cada una de las celdas contenidas dentro de la misma (Alonso Sarría, 2016). La figura 6 resume en un esquema la metodología seguida para la elaboración de los mapas de isosistas.

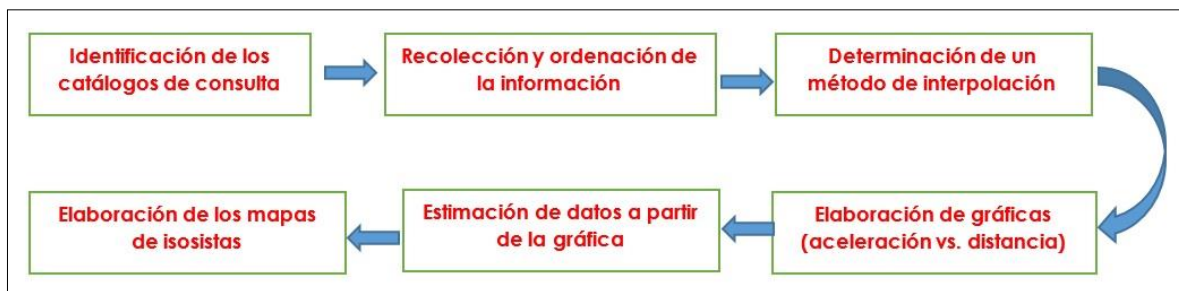


Figura 6. Esquema del proceso metodológico.
Elaboración propia.

RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos de la RAI-UNAM se obtuvo una curva generada por una regresión exponencial y se agregó la curva teórica de Clemente Chavez (2010) y la curva teórica de García et al. (2005). Como se muestra en la figura 7, la curva teórica de Clemente Chavez (2010) es la que se adapta mejor con la curva generada por la regresión de los datos del sismo de estudio; por otro lado, la curva teórica de García et al. (2005) no aplica para la predicción de este evento porque hay una gran diferencia entre las aceleraciones que predice la curva y las aceleraciones que se presentaron en el lugar durante el evento sísmico.

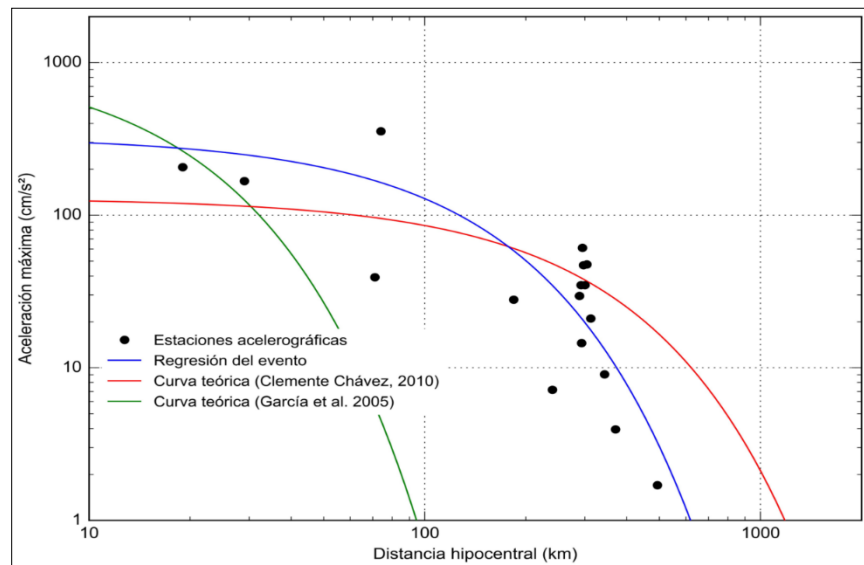


Figura 7. Curvas de atenuación del sismo ocurrido el 7 de septiembre del 2021.
Elaboración propia.

La curva teórica de Clemente Chavez (2010) presenta estimaciones de aceleraciones menores a los que se originaron durante el evento sísmico en un rango de distancia de 0 a 180 km, esta diferencia de aceleraciones puede ser causada porque las profundidades que toma la curva teórica varían de acuerdo con la profundidad que se dio en el evento principal; además, las magnitudes sísmicas que se toman en cuenta en la curva teórica son menores a la magnitud que presentó el sismo de estudio. Las estaciones que se encuentran a una distancia epicentral mayor a 180 km registran aceleraciones menores que las aceleraciones obtenidas por la estimación de la curva teórica, para este caso se observa que esa diferencia hace que los sismos que generan la curva teórica presenten una liberación de energía mayor debido a que sus aceleraciones son superiores a las aceleraciones presentadas por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021 en el estado de Guerrero.

El evento sísmico fue registrado por 20 estaciones acelerográficas del catálogo de la RAI-UNAM: 16 de Guerrero, 7 de la Ciudad de México, 1 de Jalisco, 1 de Michoacán y 2 de Colima. La aceleración máxima la registró la estación "Acapulco Centro Cultural (ACAC)" fue de 533 cm/s^2 y la aceleración mínima fue registrada por la estación "MANZ" y fue de 0.56 cm/s^2 . Se estimaron aceleraciones con la curva generada por la regresión de los datos como se muestra en la tabla 4. Los datos estimados se sumaron a la información acelerográfica obtenida en la tabla 1, en total se estimaron 17 datos de aceleraciones a diferentes distancias del epicentro.

Tabla 4
Datos estimados a partir de la curva generada por la regresión exponencial de los datos obtenidos de la figura 7

Clave	Latitud N(°)	Longitud W (°)	Distancia epicentral (km)	PGA (cm/s ²)
44	16.26	-96.58	19	290
63	17.99	-94.54	290	22
24	16.71	-92.63	71	180
25	20.04	-100.72	29	275
31	19.93	-99.83	35	245
34	19.39	-99.15	240	36
61	17.97	-97.87	11	300
43	16.45	-95.44	289	23
62	19.33	-98.26	292	21
65	18.86	-97.09	293	20.5
66	19.53	-96.9	325	17
64	19.04	-96.41	337	15
26	20.63	-105.22	300	20
33	19.33	-99.18	40	210
34	19.39	-99.15	38	240
41	16.57	-94.62	343	13
208	18.736	-98.29	270	27

Nota: Elaboración propia.

La figura 8 muestra el comportamiento de la línea de tendencia de una interpolación lineal y de una interpolación no lineal de los datos observados y de los datos estimados. Dentro de los datos observados los puntos más cercanos tienen una mayor separación a la línea de tendencia y los puntos más alejados presentan un mejor comportamiento porque se ajustan de manera más precisa a la línea. Se observa que los datos estimados presentan un menor error porque la línea de tendencia, tanto en la interpolación lineal como en la interpolación no lineal, se ajusta mejor a los datos.

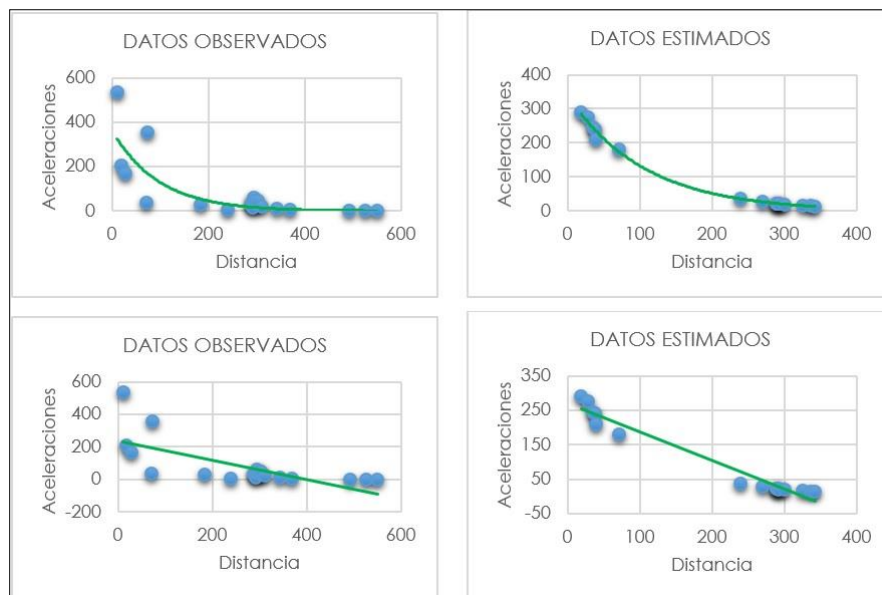


Figura 8. Gráficas de valores obtenidos por las estaciones acelerográficas y valores estimados por el programa CurveExpert. Elaboración propia.

La figura 9 muestra el mapa de isosistas resultante de las aceleraciones sísmicas máximas del suelo ocasionado por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021 en el estado de Guerrero, el mapa se generó interpolando aceleraciones obtenidas de las estaciones y aceleraciones estimadas por la curva generada de la regresión de los datos.

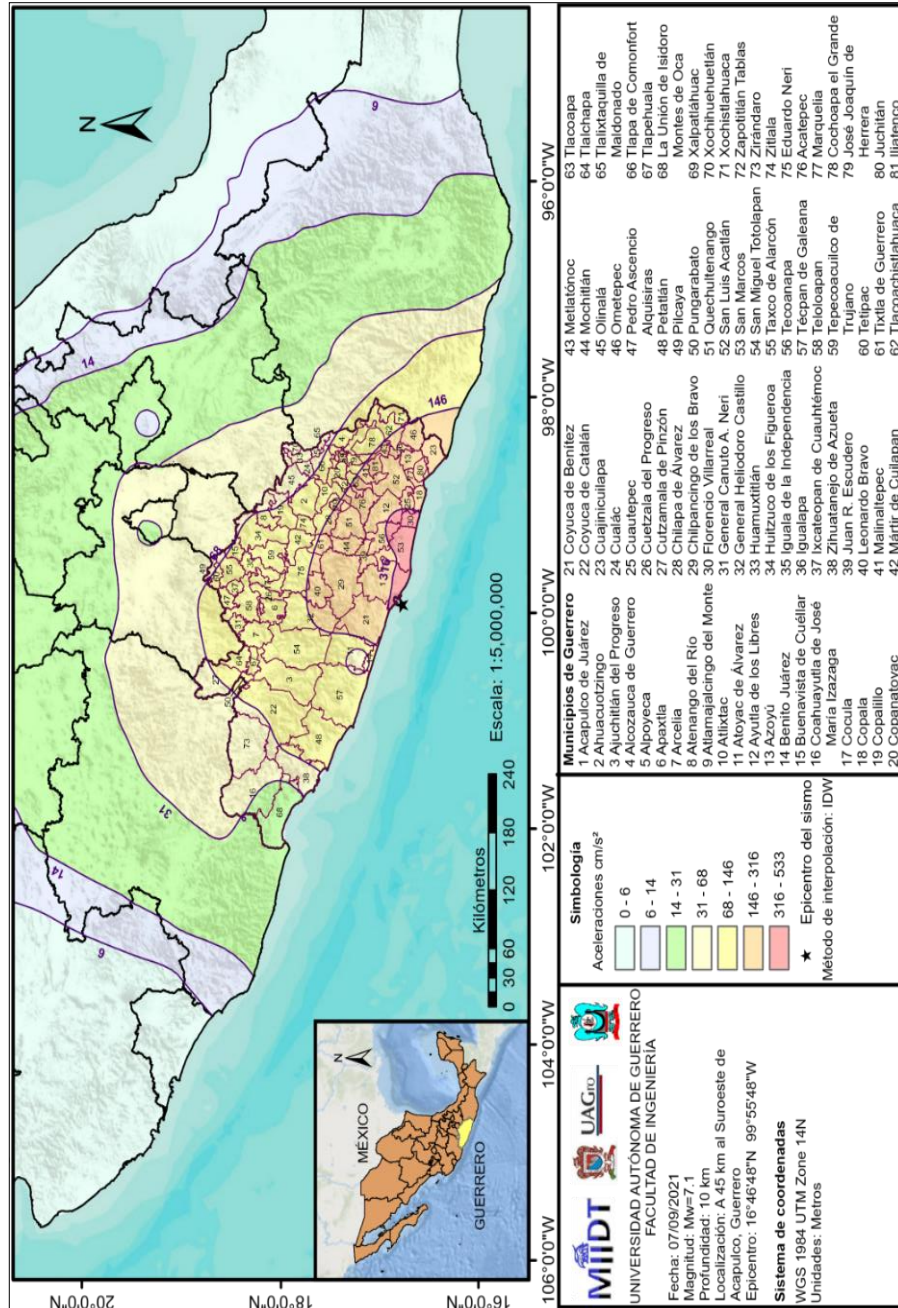


Figura 9. Mapa de isosistas del sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021. Elaboración propia.

El epicentro fue localizado a 45 km al Suroeste de Acapulco Guerrero, como se puede observar en la figura 7 las aceleraciones sísmicas mayores a 316 cm/s^2 se presentaron en los municipios de Acapulco, San Marcos y Florencio Villareal. En la dirección Noreste la

atenuación de las aceleraciones se produjo lento; es decir, el área de las zonas que presentaron aceleraciones fuertes fueron superiores que el área de las zonas en la dirección Noroeste debido a que la atenuación de las aceleraciones fue más rápido. En la dirección Oeste los municipios de Atoyac de Álvarez, Técpan de Galeana y Petatlán se encuentran ubicados entre los isosistas de aceleraciones que van de 146 cm/s^2 a 68 cm/s^2 . De los tres municipios Atoyac de Álvarez es el que se encuentra más cercano al epicentro; sin embargo, parte de este municipio presentó aceleraciones menores a 68 cm/s^2 , una de las razones de que esta zona presenta aceleraciones menores puede ser que su suelo tiene una mayor estabilidad que el de las otras zonas. Y así como se presentaron variaciones de aceleraciones en zonas pequeñas de los municipios en el estado de Guerrero, ocurrió lo mismo con las aceleraciones presentadas en los estados cercanos. Las aceleraciones que presentó este evento sísmico fueron muy fuertes y se llegaron a sentir en los estados colindantes con Guerrero.

DISCUSIÓN

El mapa de intensidades de la figura 5 fue elaborado con datos del sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021, este mapa se obtuvo a partir de los datos de las 20 estaciones acelerográficas que registraron el evento tomando en cuenta la percepción del movimiento (leve, moderado y fuerte) en relación con las aceleraciones alcanzadas (Servicio Sismológico Nacional, 7 de septiembre de 2021). Sin embargo, no se alcanzan a definir las aceleraciones obtenidas en zonas específicas; por ejemplo, de las aceleraciones que se obtuvieron en cada municipio del estado de Guerrero, el método de interpolación utilizado en dicho mapa fue el kriging.

Por otro lado, el mapa de isosistas de la figura 7 que es el resultado de este trabajo se basa en que las curvas obtenidas tienen una mayor precisión debido a que se estimaron más puntos en zonas donde no se contaba con estaciones acelerográficas, además se manejaron rangos de aceleraciones limitadas por isosistas que definen las zonas donde se presentaron dichas aceleraciones confieren a este un mapa mayor facilidad en su interpretación y el método de interpolación utilizado fue el IDW. El método de interpolación IDW da más peso a los valores cercanos a un punto permitiendo definir zonas de valores similares o iguales, tanto en áreas grandes como en áreas pequeñas de una zona de estudio.

CONCLUSIONES

Con el mapa de isosistas se pueden conocer las aceleraciones que se presentaron en las zonas del estado de Guerrero ocasionadas por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021. El mapa de isosistas obtenido presenta una mayor facilidad para su interpretación, debido a que la metodología utilizada en su elaboración permitió contar con más datos, porque se tomaron en cuenta los datos de las estaciones acelerográficas y los datos estimados en zonas donde no se contaban con estaciones acelerográficas. El método utilizado para la elaboración del mapa de isosistas ayuda al usuario a tener una mejor interpretación porque define zonas específicas donde se presentaron diferentes aceleraciones y puede ser usado para sismos que causaron gran efecto durante su desarrollo.

La RAI-UNAM tiene a su disposición 23 estaciones acelerográficas activas para el estado de Guerrero; sin embargo, no todas las estaciones acelerográficas registraron el evento sísmico, fueron 6 estaciones que obtuvieron registro del sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2021 en el estado de Guerrero. Las otras estaciones pertenecen a los estados vecinos; por tanto, se llega a la conclusión de que se necesitan más estaciones acelerográficas para la obtención de mapas de isosistas que presenten curvas y zonas de aceleraciones con mayor precisión.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo brindado a través de la beca asignada durante el posgrado.

El agradecimiento también se dirige a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro) por la oportunidad de formación profesional, mediante la disposición las instalaciones adecuadas; además al núcleo académico básico de la Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico por todo el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- Alonso Sarría, F. (2016). *Sistemas de Información Geográfica* (pp. 35-37). Universidad de Murcia.
- Carmona, A., & Monsalve, J. (1999). *Sistemas de información geográfica* (pp. 8-10). Recuperado de [dds.cepal.org/infancia/guide-to-estimating-childpoverty/bibliografia/capituloIV/CarmonaAlvaroMonsalveJhon\(1999\)Sistemasinformaciongeografica.pdf](https://dds.cepal.org/infancia/guide-to-estimating-childpoverty/bibliografia/capituloIV/CarmonaAlvaroMonsalveJhon(1999)Sistemasinformaciongeografica.pdf).
- Clemente Chavez, A. (2010). *Ley de atenuación de aceleración (PGA) y escalamiento de forma espectral sísmica para Querétaro, deducidos por análisis de trayectorias: aplicada a Guerrero-Querétaro* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro). Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Querétaro. Recuperada de <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/892>
- Contreras Quiñones, H. (marzo de 2005). *Uso básico del programa CurveExpert*. Recuperado de <https://docplayer.es/6692806-Uso-basico-del-programa-curve-expert.html>
- Cordero Castellanos, J. C., & Quirós Gomez, M. F. (7 de febrero de 2014). *Manual guía para la construcción de un mapa de isosistas referenciando el sismo con epicentro en la Mesa de los Santos, Santander, Colombia, del 7 de febrero del 2014* (Trabajo de grado-especialización, Universidad de Santander). Repositorio de la Universidad de Santander. Recuperado de <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/2902>
- Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. Recuperado de <https://docplayer.es/30692518-Modelos-digitales-de-elevacion-teoria-metodos-de-interpolacion-y-aplicaciones-jorge-fallas.html>
- Figueroa, J. (1957). El macrosismo del 28 de julio de 1957. *Anales del Instituto de Geofísica, UNAM*, 55-125.
- Figueroa, J. (1974). *Isosistas de macrosismos mexicanos* (33, 1, pp. 45-67). México: UNAM.
- G. Hyams, D. (17 de octubre de 2020). *Machine Translated by Google*. Obtenido de Documentación profesional de CurveExpert versión 2.7.3. Recuperado de <file:///C:/Users/hp/Downloads/CurveExpertProfessional.pdf>
- Gama García, A. (diciembre de 2010). *Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Chilpancingo Guerrero* (Tesis de posgrado, Universidad Autónoma Metropolitana)

- unidad Azcapotzalco). Repositorio Institucional Zaloamati. Recuperada de <http://hdl.handle.net/11191/5745>
- García, D., Krishna Singh, S., Herráiz, M., Ordaz, M., & Francisco Pacheco, J. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2272-2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>
 - Gutenberg, B., & Richter, C. (julio de 1942). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the Seismological society of America*, 32(3), 163-191. <https://doi.org/10.1785/BSSA0320030163>
 - Inca Cabrera, E. (julio de 2013). *Estudio de peligro sísmico para la ciudad de Ometepec y otras ciudades aledañas del estado de Guerrero* (Tesis de posgrado, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco). Repositorio Institucional Zaloamati. Recuperada de <http://hdl.handle.net/11191/6159>
 - Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. (2021). *Base de datos de registros acelerográficos de la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM)* [Base de datos]. Recuperada de <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/RedAcelerografica.aspx>
 - Kitaniadis, P. K. (1986). Parameter uncertainty in estimation of spatial functions: Bayesian analysis. *Water Resources Research*, 22(4), 499-507. <https://doi.org/10.1029/WR022i004p00499>
 - Redacción Aristegui Noticias. (19 de abril de 2023). Sin daños tras sismo magnitud 5.1 con epicentro en Guerrero. *Aristegui Noticias* [Portal electrónico]. Recuperado de <https://aristeguinoticias.com/1904/mexico/sin-danos-tras-sismo-magnitud-5-1-con-epicentro-en-guerrero/>
 - Servicio Sismológico Nacional. (7 de septiembre de 2021). *Catálogo de sismos* (Página electrónica). Recuperada de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/#>
 - Tavera, H., & Cuya, A. (enero de 2019). *Estimación del riesgo por exposición a partir de mapas de isositas en Perú (Actualización Censo 2017)*. Instituto Geofísico del Perú. Recuperado de https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/6271_estimacion-del-riesgo-por-exposicion-a-partir-de-mapas-de-isisitas-en-peru-actualizacion-censo-2017.pdf



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.