

EVALUACIÓN DE DAÑOS EN ESCUELAS Y HOSPITALES DEBIDOS AL SISMO DE AQUILA DE 2022

Hugo Hernández-Barrios⁽¹⁾, Manuel Jara Díaz⁽¹⁾ y José L. Moreno Torres⁽¹⁾

RESUMEN

El sismo del 19 de septiembre de 2022, con epicentro próximo al municipio de Aquila, Michoacán, y magnitud de momento Mw7.6, provocó daños importantes en los municipios vecinos a la zona epicentral. Un equipo de reconocimiento de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, visitó la zona afectada con el objetivo de identificar los daños más comunes, las causas que les dieron origen y evaluar las condiciones de uso de las escuelas y clínicas de salud (estructuras del grupo A). El tipo de construcción que se encuentra en la zona afectada, es similar al que se observa en varios municipios de los estados de la costa del Pacífico, por lo que es importante conocer las afectaciones provocadas por el sismo, como parte de la información que pueda contribuir a prevenir daños futuros en las regiones del país que tienen condiciones similares de construcción y posición respecto a los epicentros de los sismos que se producen en la costa. Al final se incluyen recomendaciones sobre las medidas que pueden adoptarse para reducir los daños, considerando las condiciones socioeconómicas de la región.

Palabras clave: Sismo de Aquila; evaluación de daños; evaluación estructural; daños en escuelas y hospitales

DAMAGE ASSESSMENT OF SCHOOLS AND HOSPITALS AFTER THE 2022 AQUILA EARTHQUAKE

ABSTRACT

The Aquila Earthquake, Mw7.7, caused significant damage in several counties near the epicenter area on September 19th, 2022. A reconnaissance team of the Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, visited the affected area aiming to identify the most common type of damage, their underlying causes, and to assess the accessibility and functionality of school and hospital buildings. The information gathered and further research can help prevent future damage in earthquake prone counties located along the Pacific Coast of Mexico. Finally, some recommendations are given in order to reduce damages in locations with similar types of construction and seismicity conditions to the one's existent in the area.

Keywords: Aquila earthquake; damage evaluation; structural assessment; damage in schools and hospitals

Artículo recibido el 01 de agosto de 2023 y aprobado para su publicación el 26 de noviembre de 2025. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Múgica S/N, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México, C.P. 58040. hugo.hernandez@umich.mx

INTRODUCCIÓN

El día 19 de septiembre del año 2022 a las 13:05h ocurrió un evento sísmico en la costa del Pacífico Mexicano, en una zona cercana a los municipios de Aquila y Coalcomán en el Estado de Michoacán, México. Este fenómeno tuvo lugar en la llamada zona de subducción entre la placa tectónica de Cocos y la placa Continental Norteamericana. El Servicio Sismológico Nacional, SSN, reportó que el sismo tuvo una magnitud Mw7.7 con epicentro en las coordenadas 18.22° latitud Norte y -103.29° longitud Oeste (Figura 1); el hipocentro se ubicó a una profundidad de 15 km y según la información desplegada por el SSN (2022) hasta las 20:00h del 31 de diciembre de 2022 se registraron 13,140 réplicas del sismo, siendo la más grande de Mw6.9. Según el comunicado emitido el 19 de septiembre del 2022 por la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, el evento sísmico fue percibido por aproximadamente 48 millones de personas. El día 03 de octubre de 2022 se estimó que el monto de los daños provocados por los sismos de septiembre en Michoacán fue de 400 millones de pesos, y en las que casi 3,300 viviendas resultaron afectadas con daño severo; 863 escuelas fueron afectadas, de las cuales 294 son de nivel prescolar y 274 de primaria; el reporte preliminar menciona que 41 edificios de salud también fueron afectados (Pacheco, 2022).

El sismo del 19 de septiembre de 2022, dejó una gran cantidad de estructuras dañadas en diversas comunidades de Michoacán, principalmente en las comunidades que forman la Sierra Costa. La Región IX Sierra Costa del Estado de Michoacán está formada por los municipios urbanos de: Aquila, Arteaga, Coahuayana, Coalcomán de Vázquez Pallares, Chinicuila, Lázaro Cárdenas y Tumbiscatío, que además del Municipio de Apatzingán, fueron las zonas con más fuerte daño estructural (Figura 1). Cabe resaltar que los estados vecinos también sufrieron daños, en especial los estados de Colima y Jalisco. En la Ciudad de México, la mayor parte de la población sintió el movimiento y causó alarma entre sus habitantes.

En este trabajo se reportan los resultados de la inspección y evaluación de los daños estructurales en diversas comunidades, en particular en los municipios de Aquila, Coahuayana y Coalcomán, cuyas cabeceras municipales se encuentran a una distancia comprendida entre 42 y 65 km del epicentro.

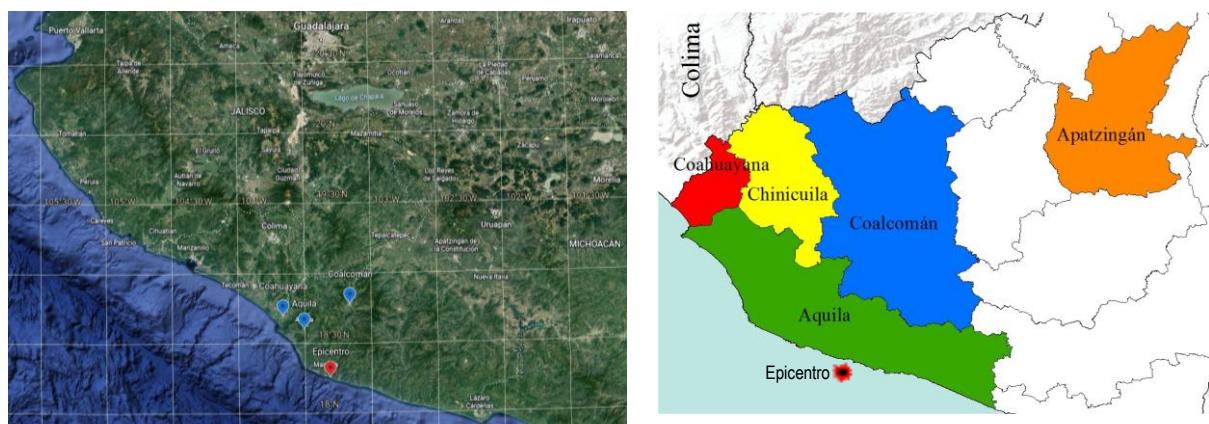


Figura 1 Localización del epicentro y de las comunidades de Michoacán con mayor daño (elaboración propia).

En los municipios más afectados se reportaron daños en casas, escuelas, clínicas, hospitales, hoteles, iglesias, oficinas administrativas y comercios, puentes y deslizamiento de taludes en las carreteras de la región. En varias poblaciones se interrumpieron las actividades económicas, comerciales y administrativas, sobre todo, debe resaltarse el hecho de que algunos centros de salud y un gran número de escuelas, ambos tipos de estructuras pertenecientes al grupo A (estructuras importantes), suspendieron sus actividades por más de diez semanas después de ocurrido el sismo.

ENTORNO SOCIOECONÓMICO DE LA REGIÓN SIERRA-COSTA

La región Sierra-Costa de Michoacán es la zona orgánica más grande del país, considerada por los agricultores como excepcional; está habitada principalmente por la comunidad nahua. El hábitat de la sierra lo enmarca una zona montañosa de clima cálido subhúmedo, con lluvias en verano y con una temperatura media anual de 26°C, la presencia de neblina es característica de la zona; la existencia de ríos y ojos de agua favorece la siembra y facilita la vida cotidiana, pero también la complica, debido a la escasez de una adecuada infraestructura carretera. El hábitat costeño lo enmarca el Océano Pacífico con temperatura media anual de 29°C. Muchas playas de la costa Michoacana son importantes a nivel mundial por la reproducción y anidación de las especies de tortugas: negra, golfinha y laúd (Figura 2).

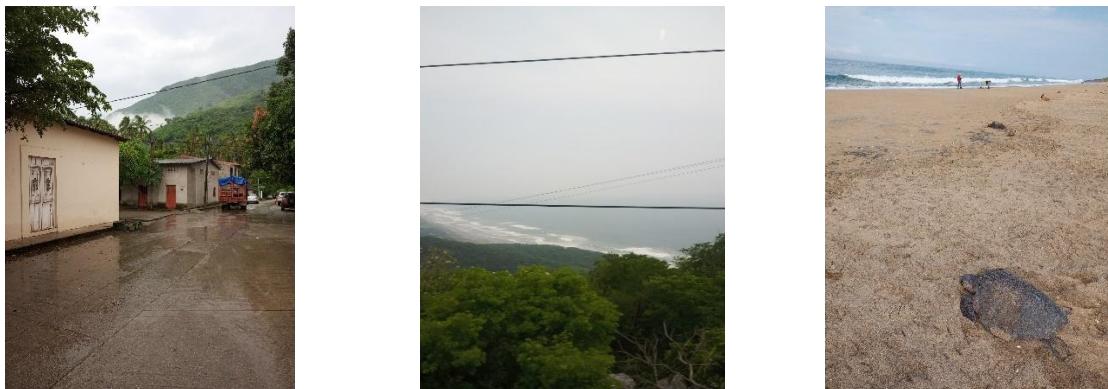


Figura 2. Vista general de las dos zonas, Sierra y Costa, en el Municipio de Aquila.

En la actualidad, la gran mayoría de las comunidades de la Sierra Costa de Michoacán, no cuentan con una cobertura eficiente de telecomunicaciones. El día 04 de octubre de 2017, la Secretaría de Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Territorial, inició las gestiones con las empresas de telefonía privada, para instalar antenas en las comunidades de la Sierra-Costa (Abril, 2022); sin embargo, a la fecha no existe cobertura en la mayoría de las comunidades afectadas por los sismos de septiembre de 2022. En la Figura 3 (Bautista, 2020) se observa la cobertura de telefonía e internet por zonas geográficas del país, en donde se aprecia que en Michoacán existe un gran número de comunidades que carecen de comunicación de telefonía. De acuerdo con Estrictamente Digital (2020), Michoacán cuenta con más de 4,478 comunidades sin cobertura telefónica y de internet; al comparar la ubicación de estas comunidades con la zona con mayor actividad sísmica en México, resulta que hay una gran coincidencia entre ambas regiones. Estas condiciones afectan negativamente los trabajos de evaluación estructural después de un escenario de desastre, por lo que se está trabajando en crear una aplicación telefónica que permita trabajar sin conexión en lugares sin señal, para poder realizar las evaluaciones post-sismo sin contratiempos.

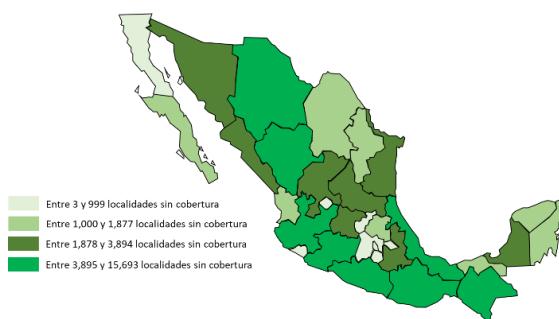


Figura 3 Cobertura telefónica en México (Bautista, 2020)

En cuanto a los Indicadores del Rezago, Precariedad Habitacional y de la Exposición ante amenazas climáticas, existe un alto rezago habitacional en los municipios ubicados en la zona afectada por el sismo. En la Tabla 1 se observa que en el Municipio de Aquila existe un rezago habitacional del 73%, y en Chinicuila del 87%.

Tabla 1 Rezago habitacional municipal, métrica: vivienda (INEGI, 2017)

Municipio	Con rezago	Sin rezago	Total	Porcentaje		Porcentaje de viviendas con respecto a la zona
				Con rezago	Sin rezago	
Apatzingán	16,283.0	18,145.0	34,428.0	47.30	52.70	30.26
Aquila	4,258.0	1,571.0	5,829.0	73.05	26.95	5.12
Arteaga	3,485.0	2,310.0	5,795.0	60.14	39.86	5.09
Chinicuila	1,160.0	172.0	1,332.0	87.09	12.91	1.17
Coahuayana	2,716.0	1,986.0	4,702.0	57.76	42.24	4.13
Coalcomán	3,336.0	2,248.0	5,584.0	59.74	40.26	4.91
Lázaro Cárdenas	13,690.0	40,721.0	54,411.0	25.16	74.84	47.82
Tumbiscatío	1,304.0	402.0	1,706.0	76.44	23.56	1.50
				113,787		

En los Municipios que se agrupan en la zona Sierra Costa de Michoacán, se encuentran 1,330 edificaciones del subsector educativo de diferentes niveles (Tabla 2). Una gran cantidad de escuelas suspendieron actividades desde el día en que ocurrió el evento y muchas de ellas continuaron cerradas o sin actividades presenciales durante varias semanas, o incluso meses.

Tabla 2 Número de escuelas y de alumnos en los Municipios de la Sierra Costa de Michoacán (SEP, 2022)

Municipio	Escuelas	Alumnos
Apatzingán	330	25,138
Aquila	272	7,469
Arteaga	146	5,067
Chinicuila	68	1,062
Coahuayana	58	3,631
Coalcomán	98	4,099
Lázaro Cárdenas	321	38,615

INTENSIDAD Y PARÁMETROS SÍSMICOS

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) adscrito al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (<http://www.ssn.unam.mx/>), opera exitosamente una red de banda ancha distribuida en toda la República Mexicana, para el monitoreo continuo de los eventos sísmicos que se registran en el país. El SSN proporcionó a los autores de este trabajo los registros de aceleraciones obtenidos el 19 de septiembre en tres estaciones ubicadas en el estado de Michoacán: 1) estación MMIG, ubicada en la comunidad de Maruata, municipio de Aquila, latitud 18.288528°, longitud -103.345565°, próxima al sitio en el que se reportó el epicentro del evento sísmico; 2) estación TMIG, localizada en Tancítaro, latitud 19.348953°, longitud -102.311172° y 3) estación MOIG, localizada en la ciudad de Morelia, latitud 19.646812°, longitud -101.2271135°; ubicada en las instalaciones de la UNAM, campus Morelia. En la Figura 4 se muestran los registros de aceleraciones de las tres estaciones antes descritas y en la Figura 5 se comparan los registros de aceleraciones para las componentes horizontales E-O y N-S, de los registros obtenidos en las tres estaciones.

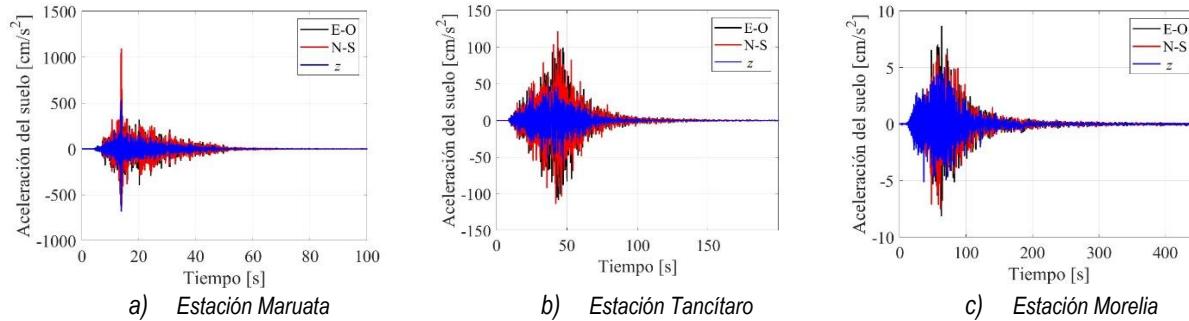


Figura 4. Registros sísmicos de estudio: 19 de septiembre de 2022 (SSN,2022)

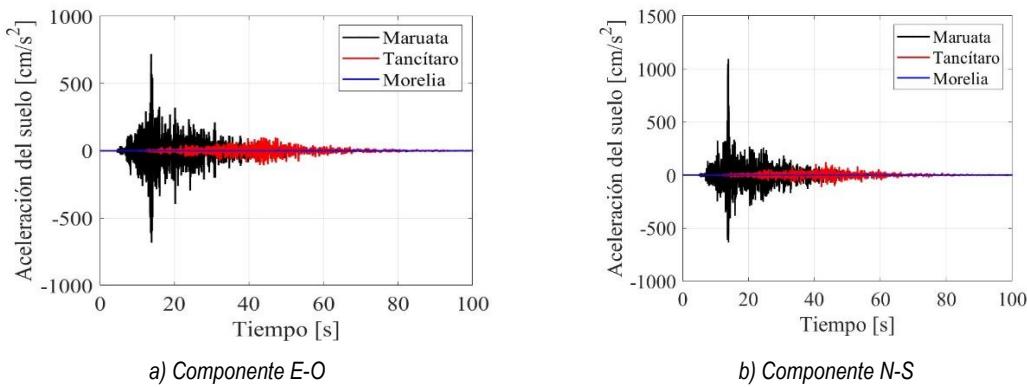


Figura 5. Registros sísmicos horizontales en las estaciones Maruata, Tancítaro y Morelia

En la Figura 6 se muestran los espectros de respuesta de aceleraciones de las tres componentes ortogonales para las tres estaciones antes descritas, considerando un amortiguamiento estructural de 5 %.

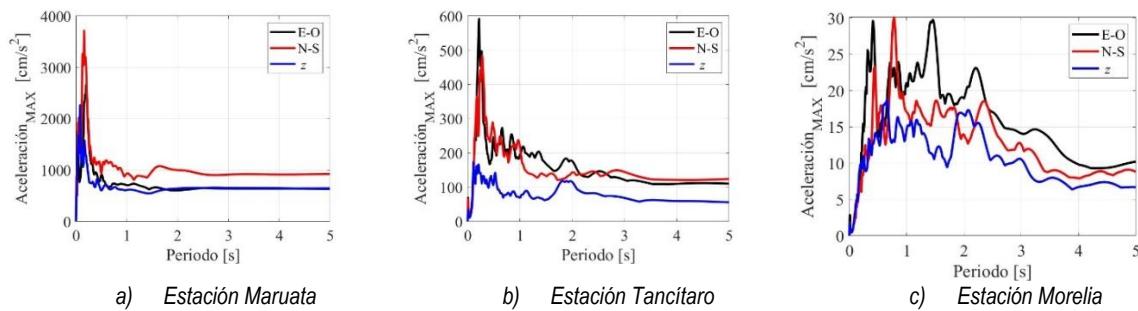


Figura 6. Espectros de respuesta de aceleraciones relativas para un amortiguamiento de 5 %

En la ingeniería estructural es de vital importancia caracterizar los registros sísmicos, para ello es necesario definir una serie de parámetros que proporcionen un indicio del posible daño que puede causar un sismo en una determinada localidad, entre ellos se puede mencionar: la aceleración máxima del suelo, PGA; la intensidad de Arias, IA, (1970); la intensidad espectral de Housner, IH, (1952); la intensidad de la Agencia Meteorológica de Japón, JMA; la velocidad absoluta acumulada, CAV y el potencial destructivo, PD.

En la Tabla 3 se puede ver que la aceleración máxima que se presentó durante el sismo del 19 de septiembre en la estación Maruata en la componente N-S es de 1,094.80 cm/s², en la estación Tancítaro de 121.55 cm/s²

y en la estación Morelia de 8.73 cm/s^2 . En la Figura 7 se muestra la ubicación y la variación de las aceleraciones horizontales de las tres estaciones.



Figura 7. Ubicación de las estaciones sísmicas y sus registros de aceleraciones horizontales

Con base en la escala de intensidad sísmica JMA, el sismo en Morelia probablemente fue percibido por la población ($I_{JMA}=2$ Shindo) pero sin generar problemas estructurales; caso contrario para las comunidades de Maruata y Tancítaro donde el valor de I_{JMA} varía aproximadamente entre 4 y 5 Shindo. Lo anterior también se corrobora revisando la intensidad de Arias (IA) y potencial de daño (PD) en las tres estaciones, donde claramente dichos valores en Maruata y Tancítaro resultaron ser cientos de veces mayores que los que se presentaron en la estación ubicada en Morelia.

Tabla 3. Parámetros sísmicos para el evento del 19 de septiembre de 2022 en Michoacán.

Parámetro	Estación Maruata			Estación Tancítaro			Estación Morelia		
	E-O	N-S	z	E-O	N-S	z	E-O	N-S	z
PGA	[cm/s ²]	719.27	1,094.80	678.95	108.30	121.55	58.08	8.73	7.55
	[g]	0.7332	1.1160	0.6921	0.1104	0.1239	0.0592	0.0089	0.0077
	[%g]	73.32	111.60	69.21	11.04	12.40	5.92	0.89	0.77
IA	[cm/s]	509.83	652.62	172.04	59.55	51.34	12.47	0.5552	0.4472
l _H	[cm]	53.23	83.62	35.84	25.67	26.91	15.21	4.90	3.54
I _{JMA}	[Shindo]	4.87	4.87	4.87	3.87	3.87	3.87	2.09	2.09
v ₀	[1/s]	14.52	14.28	16.93	6.72	7.36	7.68	21.54	20.70
CAV	[cm/s]	2421.47	2657.48	1282.12	959.26	876.12	328.95	0	0
PD	[cm s]	2.42	3.20	0.60	1.32	0.95	0.21	0.0012	0.0010
									0.0006

En la página electrónica del Geological Survey, Earthquake Hazards Program, se muestra el mapa de Intensidades sísmicas del movimiento sísmico Mw7.6-35 km de Aquila, México. En la Tabla 4 se resumen las 36 estaciones sísmicas ubicadas en Michoacán y reportadas en dicha referencia; además se indica la denominación de la estación sísmica, las coordenadas UTM y la intensidad sísmica reportada en el sitio.

Tabla 4. Estaciones sísmicas en Michoacán e Intensidades sísmicas reportadas en USGS (2022a), Geological Survey.

No	Estación	UTM	I	No	Estación	UTM	I
1	Coalcomán	13Q 069 201 10000	IX	19	Santa Clara de Valladares	13Q 076 216 1000	V
2	Coahuayana	13Q 068 202 10000	IX	20	Santa Clara de Valladares*	13Q 076 217 1000	IX
3	Coahuayana	13Q 064 204 10000	IX	21	Cotija	13Q 074 219 1000	VII
4	Coalcomán	13Q 068 203 1000	VII	22	Zacapu	14Q 020 219 1000	IV
5	Coalcomán	13Q 069 204 1000	VIII	23	Jacona	13Q 078 220 1000	V
6	Coalcomán	13Q 067 207 1000	VII	24	Zamora	13Q 078 221 1000	VI
7	Aguililla	13Q 073 207 1000	VIII	25	Ario	13Q 077 221 1000	IV

Tabla 4. Estaciones sísmicas en Michoacán e Intensidades sísmicas reportadas en USGS (2022a), Geological Survey (continuación)

No	Estación	UTM	I	No	Estación	UTM	I
8	Las Guacamayas	13Q 078 199 1000	V	26	Rincón de San Nicolás Romero	13Q 075 221 1000	III
9	Las Guacamayas	13Q 079 199 1000	V	27	La Piedad	13Q 081 225 1000	III
10	Lázaro Cárdenas	13Q 079 198 1000	V	28	Puruándiro	14Q 023 222 1000	III
11	Lázaro Cárdenas	13Q 080 198 1000	VI	29	Morelia	14Q 026 218 1000	V
12	Tacámbaro	14Q 023 212 1000	IV	30	Morelia	14Q 026 217 1000	IV
13	Uruapan	13Q 080 214 1000	V	31	Morelia	14Q 027 217 1000	IV
14	Uruapan	13Q 081 214 1000	VII	32	Morelia	14Q 027 218 1000	IV
15	Uruapan	13Q 080 215 1000	VIII	33	Hidalgo	14Q 033 217 1000	II
16	Uruapan	13Q 081 215 1000	IV	34	Tungareo	14Q 035 220 1000	IV
17	Pátzcuaro	14Q 022 215 1000	IV	35	Zinapécuaro	14Q 032 220 1000	IV
18	Santa Clara del Cobre	14Q 021 215 1000	VII	36	Tanguato	13Q 077 224 1000	III

En la Figura 8a se muestra el mapa del estado de Michoacán con la ubicación según el número de cada estación de la Tabla 4 y en la Figura 8b se muestran la intensidad sísmica en cada estación.

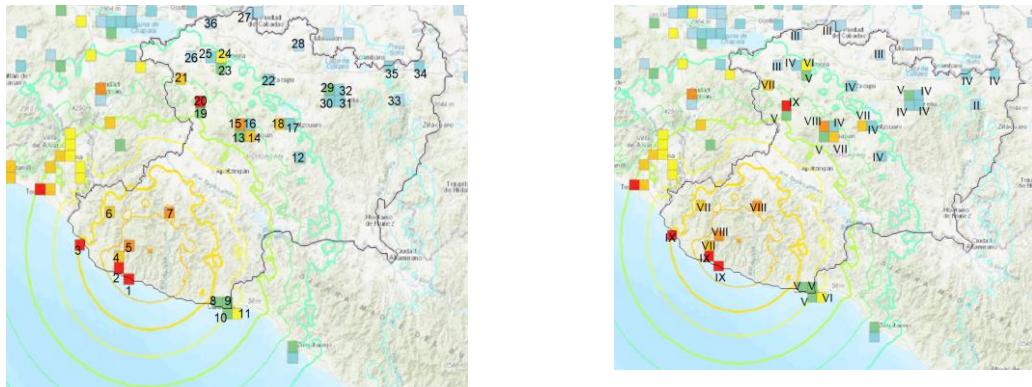


Figura 8. Ubicación de las estaciones sísmicas ubicadas en Michoacán y la intensidad sísmica del evento del 19 de septiembre de 2022 (adaptada de USGS, 2022b)

De la Figura 8 se observa que las comunidades ubicadas en la Sierra Costa de Michoacán, estaciones números 1, 2 y 3, tuvieron una intensidad sísmica de IX. No es clara la razón de que la estación 20, ubicada en la comunidad de Santa Clara de Valladares, también tenga una intensidad sísmica de IX. En las estaciones 29, 30, 31 y 32, ubicadas en Morelia, capital del estado, se presentó una Intensidad sísmica de IV-V.

CORRELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD SÍSMICA Y EL DAÑO

A pesar de la elevada magnitud del sismo y a la extensión del daño, resalta el hecho de que la mayor parte de las edificaciones sufrieron daño moderado o ligero, con un número reducido de colapsos. Los registros de aceleración proporcionados por el SSN indican aceleraciones mayores en dirección N-S, con $PGA = 1094 \text{ cm/s}^2$ en la estación ubicada en Maruata, muy cerca del epicentro. A pesar del elevado valor de PGA, el registro es del tipo de un solo ciclo (por su cercanía al epicentro), con valores bastante menores para los siguientes ciclos. Esta condición, sumada al hecho de que gran parte de la energía sísmica se dirigió a zonas donde las poblaciones están dispersas y no son muy pobladas, explican el bajo número de colapsos. Otra explicación sobre los pocos derrumbes es que muchas construcciones en el área son de un solo nivel, con techumbre ligera, que no da origen a fuerzas iniciales de consideración en los elementos verticales de soporte, aunque sí la caída de los elementos que forman el techo.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN Y EQUIPO UTILIZADO

Con el fin de coadyuvar a establecer el nivel de seguridad post-sísmica de la infraestructura existente en las comunidades dañadas, y sobre todo, contribuir con la protección de vida de los usuarios, apoyar a las autoridades en la toma de decisiones y el manejo óptimo de los recursos para reparar los daños; un grupo de 50 alumnos de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, dirigidos por los autores de este trabajo, formaron brigadas para realizar la evaluación estructural rápida (Rodríguez y Castrillón, 1995), en algunas comunidades afectadas.

Algunas instituciones nacionales han desarrollado metodologías y los formatos necesarios para realizar una evaluación estructural post-sísmica (Rodríguez y Castrillón, 1995; CICM, 2011; García et al., 2012; ISC-CDMX, 2019; INIFED, 2021; CENAPRED, 2021). La Metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2021) se elaboró con la finalidad de evaluar el nivel de daño estructural de manera rápida, eficiente y segura, después de la incidencia de un sismo. Para realizar las evaluaciones estructurales en este trabajo se empleó la metodología planteada por CENAPRED (2021), que consiste en recopilar la información mínima del inmueble, para que después se realice una evaluación de su seguridad con un procedimiento sistematizado y uniforme. La metodología tiene como desventaja el no ser precisa, ya que se basa en una evaluación subjetiva de las deficiencias típicas de la seguridad sísmica de la edificación, pero es muy útil para identificar las estructuras en las que es necesario realizar una segunda evaluación más detallada por medio de un análisis numérico. Después de realizada la inspección de cada inmueble, se utiliza un código de colores que tiene el siguiente significado:

- 1) Verde, uso permitido: esta clasificación corresponde a estructuras en las que no existe daño en el sistema de soporte estructural; ni riesgo proveniente de elementos no estructurales que puedan desprenderse y afectar a los ocupantes; ni afectaciones posibles debidas a la presencia de estructuras adyacentes en condiciones que afecten la integridad de los ocupantes del inmueble. En este caso, la estructura puede ocuparse inmediatamente.
- 2) Amarillo, acceso y uso restringidos: se clasifica con este color a las estructuras que presenta daños ligeros o moderados que requieren una evaluación más precisa antes de tomar una decisión sobre el tipo de rehabilitación y la posibilidad de ocupación del inmueble. También puede asignarse esta clasificación a las estructuras que puedan verse afectadas por el desprendimiento de materiales de un inmueble adyacente. Se permite el ingreso a la estructura para recuperar documentos y bienes necesarios para los usuarios del edificio, bajo el propio riesgo de los interesados. Si existen lugares que puedan verse afectados por la caída de materiales provenientes del propio edificio, o de una construcción adyacente, debe acordonarse la zona para protección de las personas que tengan que ingresar.
- 3) Rojo, acceso prohibido: se asigna el color rojo a las estructuras con daños graves o severos que ponen en peligro la estabilidad de la construcción. Debe clasificarse con este mismo color a las estructuras que puedan sufrir la caída de una estructura adyacente en condiciones inadecuadas de seguridad. En este caso se prohíbe la entrada al inmueble en tanto no se tomen las medidas pertinentes, derivadas de un análisis más detallado del inmueble.

Antes de la visita se impartieron tres cursos a los alumnos con el fin de explicar el llenado de las cédulas de evaluación y comentar sobre las disposiciones sociales de respeto que deben adoptar los integrantes de las brigadas y definir la forma en la que se formarían dichas brigadas en el sitio. El formato utilizado por las brigadas de evaluación para todas las estructuras dañadas: vivienda, hospitales, edificios públicos, centros religiosos y comercios, fue el mismo. El equipo necesario para realizar las evaluaciones se muestra en la Figura 9, que incluye:

- 1) Equipo de seguridad: casco, chaleco antirreflejante, identificación con fotografía, botas de uso rudo

- 2) Formato de evaluación impreso y fichas de color
- 3) Grietómetro
- 4) Bloc de notas
- 5) Nivel de mano
- 6) Flexómetro
- 7) Distanciómetro laser
- 8) Cámara fotográfica o teléfono celular



Figura 9. Equipo necesario para realizar las evaluaciones estructurales

En la Figura 10 se muestra algunos formatos que resumen los dictámenes con el nivel de daño y que fueron colocados en las fachadas o puertas principales de las estructuras.



Figura 10. Dictámenes de uso, colocados en las fachadas o puertas principales de las estructuras

EVALUACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA

Las brigadas de evaluación estructural recorrieron las escuelas ubicadas en varias poblaciones cerca de la zona epicentral (Figura 11), en particular, se visitaron las poblaciones del municipio que se muestran en la Tabla 5. Las instalaciones que se visitaron corresponden a todos los niveles de educación, desde el nivel de guardería (escuelas iniciales), hasta escuelas de educación superior.



*Figura 11. Ubicación de las poblaciones en las que se visitaron las escuelas que se inspeccionaron**Tabla 5. Poblaciones que fueron visitadas para evaluar la seguridad sísmica de escuelas.*

Población	Población	Población
Aquila	Colola	El Coire
Faro de Bucerías	La Placita de Morelos	La Ticla
Maquilí	Maruata	Motín del Oro
Pomaro	Santa María Ostula	San Telmo

Los edificios escolares en la zona visitada tienen en su mayoría uno o dos niveles y están construidos con los siguientes materiales: tabique rojo, tabicón, concreto, acero y madera. En algunas estructuras de un nivel y en las azoteas de los edificios de dos niveles, los sistemas de piso son losas de concreto reforzado, pero en su gran mayoría las escuelas evaluadas tienen techos de lámina acanalada soportada por vigas o armaduras de acero, apoyadas, a su vez, sobre los muros de carga o sobre los elementos que forman los marcos. Los techos de lámina acanalada no constituyen un diafragma rígido, y como consecuencia, la demanda sísmica no se distribuye en función de la rigidez de los elementos verticales. Algunas estructuras escolares tienen una configuración deficiente, con irregularidades en planta y/o elevación, detalles deficientes en conexiones y un detallado inadecuado de la distribución y cuantía de acero en los elementos de concreto. También se observaron problemas de mantenimiento que, en un número importante de casos, merecen una atención inmediata.

DAÑOS ESTRUCTURALES

La mayor parte de los daños que se observaron corresponden a las formas de falla típicas en estructuras de mampostería. El caso de falla más frecuente fue el agrietamiento diagonal de los muros debido a la tensión diagonal que producen las cargas laterales (Figura 12). Este tipo de falla se produjo principalmente en las estructuras de dos niveles y en las de un nivel con losa de azotea de concreto reforzado. El problema se agudizó en aquellos casos en los que no existían elementos de confinamiento en los extremos de los muros ni en las zonas donde existían aberturas para ventanas o puertas (Figura 13).

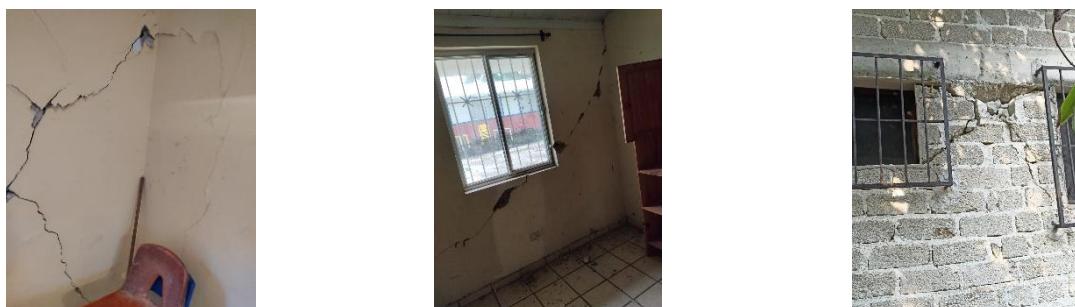
*Figura 12. Daños típicos por tensión diagonal en estructuras con muros de carga de tabique o tabicón*

Figura 13. Daños en muros sin elementos de confinamiento en sus extremos, ni en las aberturas

Los problemas de columna corta dieron origen a agrietamientos como los que se observan en la Figura 14. A pesar de que esta deficiencia estructural se observó en numerosas escuelas a base de marcos, en muchos de estos inmuebles los muros de altura parcial coexistían con muros diafragma o muros de relleno de mampostería, que cubrían toda la altura del entrepiso y contribuyeron a soportar una fracción importante de la demanda lateral y redujeron la fuerza cortante sobre las columnas cortas inhibiendo las fallas por este concepto. Las conexiones excéntricas y la mala distribución del armado en las vigas y columnas en la región de los nudos, dieron origen a fallas como las que se observan en la Figura 15.



Figura 14. Daños en columnas cortas debidos a la presencia de muros que restringen su desplazamiento



Figura 15. Deficiencias en el armado en la región de la conexión viga-columna

Los muros tipo diafragma que se colocan entre los marcos de concreto contribuyeron a incrementar la resistencia y rigidez de las estructuras, reduciendo la demanda y posible falla de los elementos de concreto. En la Figura 16 se observa que los muros de mampostería integrados al sistema de soporte de cargas laterales tomaron parte importante de la fuerza de inercia, misma que provocó el agrietamiento diagonal.



Figura 16. Agrietamiento diagonal en muros diafragma de mampostería

ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

Los elementos no estructurales son aquellos que no contribuyen con la resistencia ni rigidez de la estructura; sin embargo, es frecuente que los muros divisorios que no se consideran parte de la estructura, interfieran en el desplazamiento lateral del sistema, ya sea porque están ligados a los elementos estructurales (columnas, vigas y/o losas), o porque la separación que se deja entre ellos y el muro divisorio es menor que el desplazamiento que experimenta la construcción durante un movimiento sísmico. Esta interacción provoca la participación del supuesto elemento no estructural en la respuesta del edificio. En el caso de las escuelas del municipio de Aquila, se observaron muchas edificaciones en las que las columnas y los muros de media altura están ligados dando origen al problema de columnas corta, es por tanto conveniente que dichos muros se desliguen para evitar este problema. Se observaron fallas en algunos de los elementos que realmente no contribuyen con la respuesta del edificio y que efectivamente funcionan como elementos no estructurales, algunos de los cuales eran potencialmente riesgosos para la integridad física de los ocupantes de los inmuebles. Los dos casos más comunes de daños en los elementos no estructurales que se identificaron en las escuelas del municipio de Aquila son la caída fuera de su plano de pretils y de muros.

Pretils

Los pretils, construidos generalmente de mampostería, y que se ubican en el perímetro del nivel superior de los edificios, deben contar con elementos verticales que les confieran confinamiento y resistencia fuera del plano y eviten su derrumbe. Ejemplos de falla de pretils en las instalaciones educativas de Aquila se muestran en las Figura 17. Los pretils pueden constituir un riesgo importante para la integridad de los ocupantes de las escuelas, particularmente si un pretil se localiza encima de las puertas de salida de las oficinas o aulas de la escuela, al colapsar durante el movimiento, parte de él puede golpear a las personas que intentan desalojar el edificio; además de que pueden bloquear la salida de los estudiantes del edificio. Esta situación se observó en varias de las escuelas que se visitaron.



Figura 17. Caída de elementos no estructurales durante el evento sísmico

Muros

Los muros de colindancia o bardas, al igual que los pretils, deben contar con elementos verticales que les confieran resistencia lateral fuera del plano y evitar su colapso (Figura 18). Un problema semejante se presenta cuando los muros que sirven de apoyo a los tanques de almacenamiento de agua que se colocan en la azotea, se colapsan debido a las fuerzas laterales que se generan por el funcionamiento como apéndice del tanque.



a) Caída de bardas.



b) Caída de apéndices (tanque de agua)

Figura 18. Colapso de muros de mampostería de elementos no estructurales

Vidrios, cancelas y pisos

En numerosos casos las escuelas tuvieron problemas con los cancelas y los vidrios debido a la falta de una holgura suficiente para evitar la interacción de estos elementos con la estructura. En una gran cantidad de escuelas se presentó agrietamiento en las losas de piso y en los acabados como la loseta y los mosaicos (Figura 19).



Figura 19. Agrietamiento en pisos de patios y salones de clase

PROBLEMAS ASOCIADOS A LA FALTA DE MANTENIMIENTO

Un problema adicional que debe identificarse durante un proceso de evaluación post-sismo es el deterioro de la estructura y su cimentación, que se produce como resultado de los efectos del tiempo y del medio ambiente, tales como las variaciones de temperatura, la humedad relativa, la contracción y el flujo plástico de los materiales, la presencia de ambientes agresivos, hundimientos del terreno, entre otros. En la inspección realizada a las escuelas se encontraron problemas asociados a la corrosión en estructuras metálicas, a la humedad en elementos de concreto y mampostería, y a la pérdida del recubrimiento del concreto. Se observaron problemas de corrosión de consideración en las varillas del acero de refuerzo de losas de concreto, vigas y columnas, como las que se observan en la Figura 20.



Figura 20. Problemas de humedad y corrosión en elementos de concreto reforzado por falta de un mantenimiento adecuado

EVALUACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HOSPITALARIA

Dada la importancia de los hospitales y clínicas de salud para la recuperación de una comunidad que ha sufrido las consecuencias de un sismo, su diseño debe ser estricto. A pesar de eso, un gran número de hospitales han sufrido daños graves o han dejado de prestar servicio médico, privando a las comunidades de su atención a víctimas. Según la Secretaría de Salud, en Michoacán se reportaron 23 unidades médicas afectadas en los municipios de Pátzcuaro, Zacapu, Apatzingán, Uruapan, Boca de Apiza, Puruándiro, Cherán, Coalcomán y Aquila, pero con afectaciones mayores en el Hospital de Maruata, el cual fue desalojado (Gobierno de México, 2022) y finalmente demolido. A continuación, se describen los daños ocurridos en los centros de salud que se visitaron en distintas localidades, resaltando los problemas y sus causas para cada hospital o clínica en particular, con el propósito de conservar la memoria de las afectaciones derivadas de este sismo en cada estructura.

MUNICIPIO DE AQUILA

La infraestructura que fue evaluada por las brigadas estuvo compuesta por: el Centro de Salud de Aquila, de la Secretaría de Salud (SS); la Unidad Médico Rural del IMSS, población El Coire; la Unidad Médico Rural del IMSS-PROSPERA, población Pomaro; el Centro de Salud Tizupan, Secretaría de Salud (SS) y el Hospital Integral Comunitario de Maruata, Secretaría de Salud (SS). A continuación, se describen los principales daños observados.

El Centro de Salud de Aquila, ubicado en la cabecera municipal, es una construcción de un solo nivel, estructurado a base de marcos de concreto, muros de mampostería de tabique rojo no confinada y dos columnas circulares de ornato en su fachada principal (Figura 21). Se observaron daños severos en los muros de mampostería en ambos lados de la fachada principal, consistente en agrietamiento a 45 grados, con un ancho promedio de grieta entre 8.0 y 10.0 cm, debido a la falta de elementos confinantes en los huecos de las ventanas. La falta de castillos en los extremos de los muros fueron la causa de la separación de los muros perpendiculares que forman las esquinas del inmueble (Figura 22). Debido a la proximidad de las ventanas, también se observaron grietas horizontales de paño superior a paño superior que parten de las esquinas no confinadas de las ventanas (Figura 22). Debido a la extensión y magnitud de los daños, el centro tuvo que ser desalojado y no fue posible ocupar las camas existentes.



Figura 21. Fachada principal del Centro de Salud de Aquila.



Figura 22. Daño en los muros de mampostería de la fachada del Centro de Salud de Aquila

Las unidades médicas rurales del IMSS, ubicadas en las comunidades El Coire y Pomaro, tienen estructuración “tipo” y debido a la cercanía entre ambas comunidades, los daños estructurales en dichas unidades fueron similares. El daño presentado es reparable y puede considerarse que no compromete la seguridad estructural de los inmuebles. Se trata de estructuras de un nivel con marcos de concreto formados por columnas y trabes de 25 x 25 cm, losa maciza de concreto perimetralmente apoyada de 10 cm de espesor y pendiente a dos aguas. En la dirección corta del edificio las fachadas laterales tienen muros diafragma, por lo que sólo hubo daños menores que dieron origen a pequeñas grietas reparables. Los huecos de las ventanas están bien confinados, por lo que únicamente en un caso se presentó agrietamiento diagonal de un ancho pequeño.

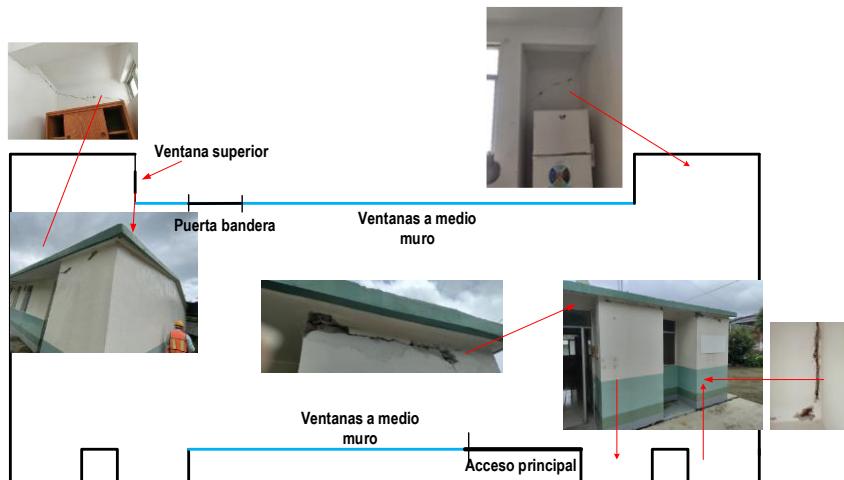


Figura 23. Daños en la unidad médica en El Coire

Los muros cabeceros de la unidad médica El Coire, sufrieron daño moderado reparable, consistente en agrietamiento horizontal entre la parte superior del muro y la losa, debido al desplazamiento relativo entre ambos elementos y a la falta de una dala de cerramiento (Figura 23). En el interior de la unidad médica se observa el agrietamiento en los muros de mampostería, con un ancho promedio de 1.5 cm, siguiendo una línea de la parte inferior de las trabes a la esquina de la ventana superior. Las fachadas laterales se comportaron adecuadamente.

El Centro de Salud Tizupan, de la Secretaría de Salud es una estructura de un nivel de pequeñas dimensiones con muros de carga y losa de concreto de poco espesor, por lo que las fuerzas iniciales no parecen haber sido de consideración y los daños observados son menores.

Mención especial merece el Hospital Integral Comunitario de Maruata, ya que es la estructura de mayores dimensiones entre los centros de salud visitados y el que presentó los daños más importantes. La estructura consiste en un cuerpo principal de dos niveles y que forma parte de la fachada principal, y varios cuerpos de un solo nivel. En la fachada posterior se encuentra el acceso al área de urgencias, cuya estructura es de un nivel con columnas cuadradas de concreto, las cuales no presentaron daño estructural. En la base de estas columnas y en el arranque de la escalera se observa desprendimiento de los zoclos debido a las altas aceleraciones verticales del movimiento sísmico.

La sección frontal es un edificio de dos niveles con columnas circulares y losa aligerada apoyada directamente sobre las columnas, sin una zona maciza alrededor de las columnas como se exige en las normas actuales de construcción. En la Figura 24 se muestran los daños estructurales en la fachada principal y la denominación de las columnas en este estudio.

Los daños se deben principalmente a la falta de un sistema de fijación de los muros de mampostería a las columnas o a la losa, por lo que los muros fallaron fuera de su plano. Las columnas de fachada C2A y C3A, no presentan daño estructural, sin embargo, las columnas de los extremos C1A y C4A, presentaron daños por compresión en el extremo superior del segundo nivel (Figuras 25 y 26), debido al efecto de la aceleración vertical que se presentó en el sitio por su cercanía a la zona epicentral (Jara, Hernández y Álvarez, 2022). Además, la columna C1A, presentó un ligero desplome. Es evidente, que la colocación de columnas con sección circular cuando se ubican en las esquinas, dificulta la continuidad del armado de los elementos horizontales y por ende, no se propicia un adecuado confinamiento en el nodo. Debido a la aceleración vertical, los pisos de la entrada se desprendieron del firme, ocasionando su rotura.

En las fachadas laterales los muros no estructurales de mampostería se desprendieron fuera de su plano, ocasionando su colapso en algunos ejes, fallas que contribuyeron a dar la imagen de daños severos. Se observaron traslapos inadecuados del refuerzo de los castillos, el cual consistía de tres varillas del número 3. En la Figura 27 se muestran los daños en la zona central del edificio principal, que se concentraron en los sistemas no estructurales: muros divisorios, plafones, pisos y vidrios; en la zona de escaleras, agrietamiento en la losa de arranque por la falta de una separación adecuada con el sistema de apoyo de la escalera.

En una columna localizada en la junta entre los dos cuerpos, se presentó daño por cortante debido al golpeteo entre ambos cuerpos, ya que la junta estaba obstruida con material de desperdicio de construcción que impedía el libre desplazamiento (Figura 28).

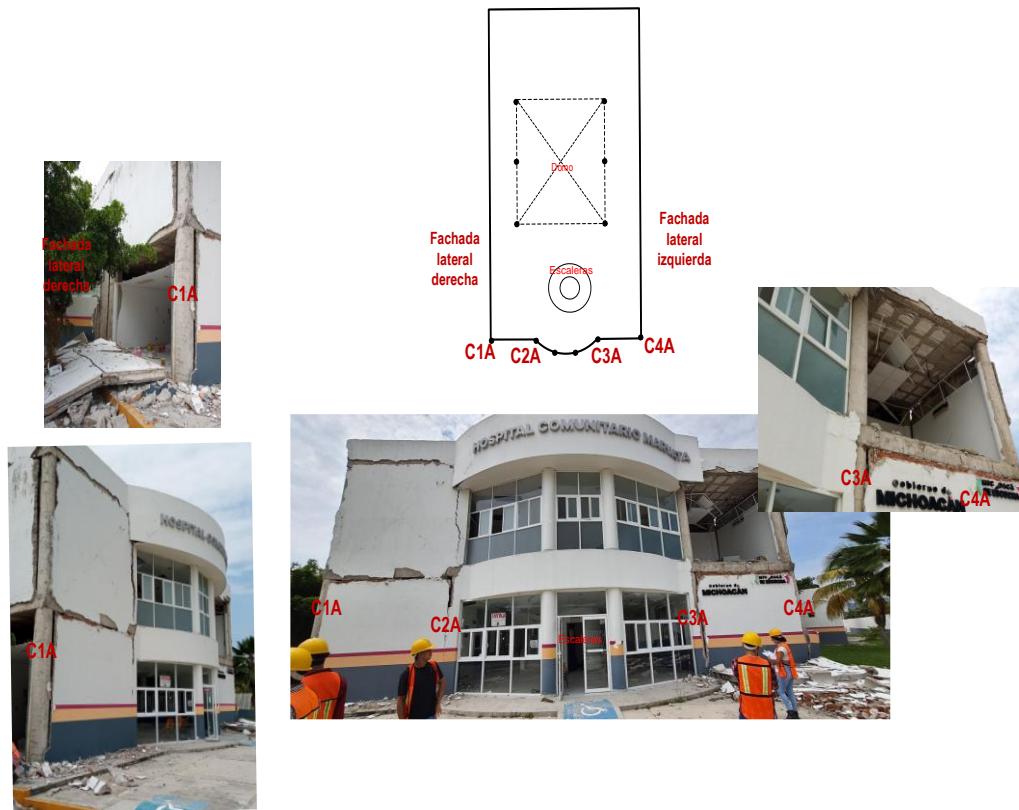


Figura 24. Daños estructurales en la fachada principal del Hospital Comunitario de Maruata



Figura 25. Daño por aplastamiento en la cabeza superior de las columnas el Nivel 2.



Figura 26. Daño en la columna C1A, en la fachada principal.



Figura 27. Daños observables en la zona central del edificio principal.



Figura 28. Daño por cortante en la columna por el golpeteo en la junta sísmica entre los dos cuerpos.

MUNICIPIO DE COALCOMÁN

El Hospital Regional 46 del IMSS, se encuentra ubicado en la calle Francisco J. Mujica S/N, municipio de Coalcomán. Durante la visita al sitio no fue posible ingresar, excepto a las oficinas de la dirección, en donde se identificó un sistema de marcos formados por tráves y columnas circulares de un solo nivel. Una de las vigas presentaba grietas por flexión, que fueron reparadas mediante resina epóxica (Figura 29). En el resto de las vigas y columnas no era evidente el daño estructural. No obstante, se observó una grieta horizontal en la parte baja de las tráves en la unión con los muros divisorios, la fijación entre ambos elementos impidió la falla fuera del plano de los muros.



Figura 30. Entrada principal del Hospital Regional 46, IMSS y vista del sistema estructural.

MUNICIPIO DE APATZINGÁN

El Hospital Regional de Apatzingán fue inaugurado el 18 de agosto de 2015 (Figura 30) y se ubica en la Av. Constitución de 1814 No. 122, Norte. El hospital provee de atención médica a casi 175 mil habitantes de nueve municipios. Durante el recorrido dentro de las instalaciones, el personal de mantenimiento refirió que sólo en la zona de escaleras los muros se desligaron de las columnas, separándose de ellas, razón por la cual el personal de mantenimiento por indicaciones de un comité de seguridad del hospital, colocó cinta adhesiva para evitar que los muros se colapsaran (Figura 31).



Figura 30. Fachada principal del Hospital Regional de Apatzingán y placa de inauguración.



Figura 31. Separación vertical entre muros y columna en el Hospital Regional de Apatzingán

Los muros no tenían sistemas de fijación en la dirección perpendicular a su plano, por lo que se sugirió al personal que labora en la institución apuntalar de manera urgente todos los muros de la zona de escalera, ya que, por su altura y número, representan un peligro para los usuarios. En la zona del cuarto de máquinas (Figura 32), también se formó una grieta horizontal entre trábes y muros, y columnas y muros, como evidencia de una separación entre ambos. Aunque los muros son no estructurales, este tipo de error constructivo no debe existir, mucho menos en estructuras de esta importancia.



Figura 32. Daño ligero en los muros no estructurales del cuarto de máquinas (Hospital Regional de Apatzingán)

La Clínica Hospital Apatzingán de la Constitución del ISSSTE, se localiza en la Av. Francisco I. Madero esquina con Matías Romero S/N, colonia Buenos Aires, se diseñó antes de 1985, y se inauguró en julio de 1987. La clínica está formada por dos cuerpos, uno de un nivel en su parte posterior y otro de dos niveles, en su parte frontal. Al efectuar la visita se encontró que los daños ocasionados por el sismo del 19 de septiembre ya se habían ocultado, por lo que no se realizó por lo que se intuye que no se realizó una evaluación detallada efectiva por ingenieros particulares. La técnica de “reparación” de los daños en algunos elementos, consistió básicamente en retirar el material suelto de los acabados o de las grietas, y repellar con una mezcla agua-arena-cemento. En algunos casos se colocó malla de gallinero sin anclar al muro, y en general, no se siguió ninguna técnica de reparación sugerida en la bibliografía especializada, como por ejemplo en Gómez, *et al.* (2019). La mayoría de los daños que se presentaron dentro de las instalaciones,

fueron en elementos no estructurales como: rotura de pisos, caída de plafones, agrietamiento en muros divisorios, rotura de vidrios, etc.

En las columnas del segundo nivel y en el último marco superior se observó un escaso recubrimiento de las columnas, al grado que los estribos estaban al descubierto. Esta situación permitió observar que los estribos se encuentran uniformemente distribuidos en toda su longitud a cada 20 cm (Figuras 33 y 34).



Figura 33. Distribución de estribos uniforme con la altura a cada 20 cm, armado expuesto.

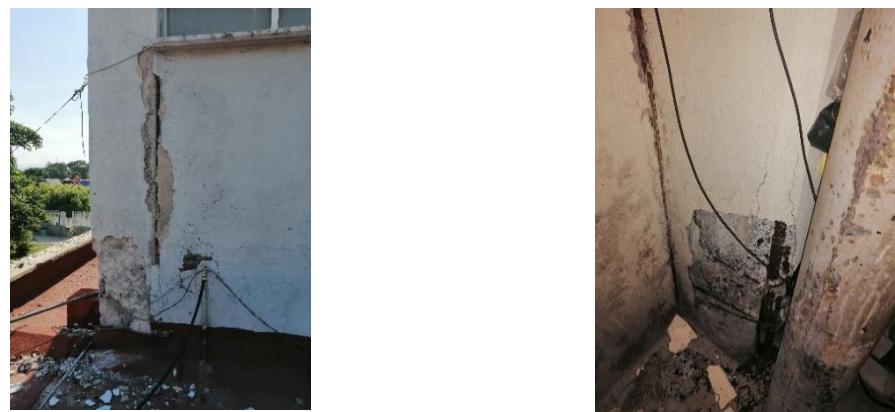


Figura 34. Columna de la esquina superior izquierda de la fachada, vista exterior y vista interior.

La columna en la puerta de acceso al segundo nivel (Figura 35), aparentemente sufrió daño, ya que se retiró el recubrimiento dejando el acero expuesto, para posteriormente repellarla con una mezcla agua-cemento-arena. Se observa que la distribución del armado por cortante no es el que se utiliza actualmente. A un lado de la columna se une una mocheta de mampostería no desligada, que genera un problema de columna corta.

En la Figura 36 se muestra un problema de columna corta en la fachada lateral derecha del hospital, la cual únicamente fue resanada por el personal de mantenimiento. En la misma figura se observa la base de una columna rectangular de uno de los cuerpos de un nivel, donde es posible observar una grieta vertical, típica de una falla debida a la componente vertical del movimiento.



Figura 35. Columna del nivel 2, justo en la entrada-salida al patio.

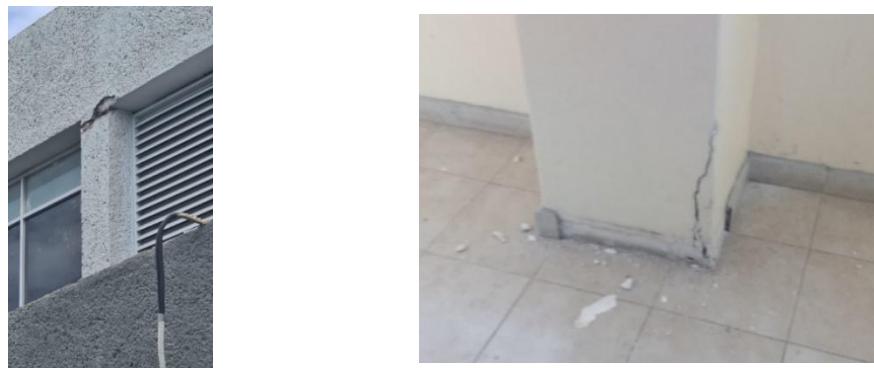


Figura 36. Falla de columna corta en la planta baja y agrietamiento vertical en una columna del primer nivel.

RECOMENDACIONES

Los daños observados en los municipios afectados por el temblor de Aquila del 19 de septiembre de 2022, son el resultado de las deficiencias típicas de escuelas y hospitales que existen en regiones con condiciones socioeconómicas similares, por lo que es conveniente resaltar algunos problemas y hacer algunas recomendaciones. El tipo de construcción que se encuentra en la zona afectada, se observa en algunos municipios de los estados comprendidos desde Nayarit hasta Chiapas, por lo que es importante conocer las causas principales de los daños que ocurrieron durante el temblor de Aquila, como parte de la información que pueda contribuir a prevenir daños futuros en las regiones de mayor sismicidad del país.

Ya que existen organismos federales y estatales que regulan el diseño y construcción de los centros educativos y los centros de salud, es cuestionable que se presentaran fallas debido a la falta de confinamiento de los muros, o de conexiones adecuadas que impidan las fallas fuera del plano de los muros. La presencia de muros diafragmas que existen en estructuras escolares construidas recientemente, limitó los daños a grietas menores en muros y/o elementos verticales de concreto. En numerosas escuelas se derrumbaron los pretiles, bloqueando en varios casos las salidas de salones y oficinas; aunque no se reportaron lesionados por esta causa, esta deficiencia puede provocar serias lesiones a los ocupantes de las escuelas al tratar de abandonar las instalaciones en forma apresurada. La ausencia de mantenimiento adecuado fue evidente en varias instalaciones escolares, las grietas y humedades son comunes, llegando en varios casos a la pérdida de área y rotura del acero de refuerzo.

En las estructuras de concreto se hizo evidente el mal detallado del acero de refuerzo que da origen a estructuras con baja capacidad de disipar energía. En general, este problema se identificó en clínicas de salud, debido a la fecha de construcción, en la que se tenía menor exigencia sobre estos aspectos. Las escuelas mostraron en menor medida este tipo de deficiencia, pero si se identificaron problemas de columnas cortas, aunque los muros diafragmas contribuyeron a inhibir las fallas por este concepto.

Durante la inspección rápida realizada a las escuelas se encontraron problemas asociados a la corrosión en estructuras metálicas, humedad en elementos de concreto y mampostería, y pérdida del recubrimiento del concreto. Se observaron problemas de corrosión de consideración en varillas del acero de refuerzo de losas, vigas y columnas que, en un número importante de casos, merecen una atención inmediata.

En algunas clínicas de salud la evaluación post-sísmica detallada, realizadas por particulares, se realizó sin el conocimiento técnico adecuado. Lo anterior condujo a dos casos extremos: 1) el cierre de instalaciones que pudieron ser ocupadas sin riesgo para los ocupantes y, 2) el reforzamiento y rehabilitación realizado de forma apresurada y sin conocimiento técnico de una clínica que debió ser inhabilitada. Por otra parte, no se proveyó de un acordonamiento adecuado en zonas de posibles derrumbes, ni se impidió el acceso en zonas de posible inestabilidad estructural, lo cual representa un serio problema de seguridad. Estos casos ponen en evidencia la importancia de homologar criterios de evaluación estructural post-sísmica (Archundia, 2024).

Otro problema que debe identificarse durante la evaluación post-sismo es el deterioro de la estructura y su cimentación, que se produce como resultado de los efectos del tiempo y medio ambiente, tales como variaciones de temperatura, humedad relativa, contracción y flujo plástico, la presencia de ambientes agresivos, hundimientos del terreno, entre otros.

A partir de la información anterior, se considera que los problemas principales que deben vigilarse en la región y municipios similares en el país, que contribuirían a mejorar la respuesta sísmica de la infraestructura escolar y hospitalaria se concentra en los siguientes puntos:

- Proporcionar confinamiento adecuado a muros de mampostería en la intersección entre muros, y en huecos de puertas y ventanas.
- Fijar adecuadamente los muros no estructurales para evitar su caída fuera del plano.
- Fijar convenientemente los pretilés, especialmente los que se ubican sobre puertas de entrada a salones y oficinas.
- Contar con programas de inspección para identificar problemas de deterioro y dar mantenimiento adecuado a las instalaciones en función de los problemas detectados.
- Mejorar la capacitación de los ingenieros y técnicos responsables de las evaluaciones detalladas post-sismo, para identificar adecuadamente los riesgos, acordonar zonas de riesgo y evitar el acceso a estructuras peligrosas o con fines de rehabilitación o demolición, para evitar que estructuras con daños estructurales moderados, sean demolidas.

CONCLUSIONES

El sismo del 19 de septiembre de 2022, con magnitud Mw7.7 y epicentro próximo al municipio de Aquila, frente a la costa de Michoacán, provocó un extenso daño en las poblaciones cercanas al epicentro, con afectaciones en prácticamente toda la infraestructura construida en la región. Se reportaron daños en casas, escuelas, clínicas, hospitalares, hoteles, iglesias, oficinas administrativas, comercios, puentes, carreteras y se produjeron deslaves que bloquearon los caminos y la comunicación entre las distintas poblaciones del área siniestrada. Se interrumpieron las actividades económicas, comerciales y administrativas, pero, sobre todo,

debe resaltarse el hecho de que algunos centros de salud y un gran número de escuelas, pertenecientes a estructuras especialmente importantes (grupo A), suspendieron sus actividades por más de diez semanas después de ocurrido el sismo.

A pesar de la elevada magnitud del sismo y a la extensión del daño, resalta el hecho de que la mayor parte de las edificaciones sufrieron daño moderado o ligero, con un número reducido de colapsos. Los registros de aceleración cerca del epicentro muestran una aceleración elevada en un solo ciclo (por su cercanía al epicentro), con valores bastante menores para los siguientes ciclos. Esta condición, sumada al hecho de que gran parte de la energía sísmica se dirigió a zonas despobladas explican el bajo número de colapsos; además, muchas construcciones en el área son de un solo nivel, con techumbre ligera, que no da origen a fuerzas iniciales de consideración en los elementos verticales de soporte.

Las afectaciones a las estructuras del grupo A (escuelas y centros de salud), tuvieron el comportamiento que se describe a continuación. Por tratarse de estructuras de distinta configuración y sistema estructural, se tratan por separado ambos casos.

A) Escuelas

Los edificios escolares son, en su mayoría, de uno o dos niveles y están construidos con mampostería, concreto, acero y madera. La mayor parte de los daños en los sistemas formados por muros de carga corresponden a las fallas típicas en estructuras de mampostería. El caso más frecuente fue el agrietamiento diagonal de los muros debido a la tensión diagonal que producen las cargas laterales; este tipo de falla se produjo principalmente en las estructuras de dos niveles y en las de un nivel con losa de azotea de concreto reforzado. El problema se agudizó en los casos en los que no existían elementos de confinamiento en los extremos de los muros, ni en aberturas para ventanas o puertas.

Los casos más comunes de daño en elementos no estructurales, consistieron en la caída fuera del plano de pretilles y muros debido a la falta de elementos verticales y/o a una conexión inadecuada al sistema de piso, que les proporcionaron resistencia fuera del plano. En varios casos se observó el derrumbe de pretilles colocados encima de las puertas de oficinas o aulas, bloqueando las puertas de salida y generando un peligro potencial para los niños y maestros que intentan salir apresuradamente durante el movimiento sísmico. En varias escuelas, los muros de colindancia, al igual que los pretilles, no contaban con elementos verticales que les confirieran resistencia lateral fuera del plano para evitar su caída.

La ausencia de mantenimiento adecuado fue evidente en varias instalaciones escolares, las grietas y humedades son comunes, llegando en varios casos a la pérdida de área y rotura del acero de refuerzo que, en un número importante de casos, merecen una atención inmediata. El deterioro de la estructura y su cimentación es un problema que debe identificarse durante la evaluación post-sismo.

B) Centros de salud

El sistema estructural de los centros de salud es principalmente a base de marcos de concreto y/o de muros de mampostería. Se observaron daños severos en los muros de mampostería consistente en agrietamiento a 45 grados, con ancho de grieta variables, que llegaron en algunos casos a 10 mm. La falta de castillos en los extremos de los muros fueron la causa de la separación de los muros perpendiculares que forman las esquinas de las estructuras. Un gran número de muros carecían de sistemas de fijación en la dirección perpendicular a su plano que impidiera su vuelco; aunque no se trata de muros estructurales, su caída representa un peligro potencial para los usuarios y limita el funcionamiento posterior de las instalaciones. En algunos casos, como medida de refuerzo, se colocó malla de gallinero sin anclar al muro; en general, no se siguió ninguna técnica de reparación sugerida en la bibliografía especializada. La mayoría de los daños

no estructurales se concentraron en la rotura de pisos, caída de plafones, agrietamiento en muros divisorios y rotura de vidrios.

Mención especial merece el Hospital Integral Comunitario de Maruata, ya que es la estructura de mayores dimensiones entre los centros de salud que se visitaron y el que presentó los problemas más severos. Los daños se deben principalmente a deficiencias constructivas, ya que los muros de mampostería no estaban sujetos a las columnas ni a la losa ocasionando su colapso fuera de su plano y dando la apariencia de una estructura gravemente dañada. Las columnas presentaron daños por compresión debido al efecto de la aceleración vertical que se presentó en el sitio por su cercanía a la zona epicentral. Se observaron deficiencias en traslapos y distribución del acero de refuerzo en los elementos de concreto. Debido a la extensión y magnitud de los daños, el centro tuvo que ser desalojado y no fue posible ocuparlo después del siniestro. Finalmente se decidió demoler el hospital, a pesar de que una evaluación adecuada podía haber llegado a la conclusión de que la estructura podía ser rehabilitada. Esto indica la necesidad de llevar a cabo una evaluación con fines de rehabilitación con personal técnico con experiencia en el tema.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH, al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán, quienes por medio del Proyecto PICIR-027 proporcionaron los medios para el desarrollo de este trabajo. Así mismo, se agradece al Servicio Sismológico Nacional, adscrito al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, por proporcionar la información de las estaciones sísmicas. También se agradece la contribución y el interés de los alumnos de las secciones 6 y 3, del noveno semestre (2022-02) y de los alumnos de la maestría en Estructuras de la FIC UMSNH que participaron en la dirección de algunas brigadas de evaluación. Especial agradecimiento al Gobierno del Estado de Michoacán, quién por medio del Lic. Carlos Torres Piña, Secretario de Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, y con el apoyo de SEDATU, con el Arq. Miguel Ángel Sandoval Rodríguez, Delegado Estatal de Michoacán, fue posible la participación de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH en las actividades de apoyo social. De igual manera se agradece a los señores Presidentes Municipales de Coahuayana: Ing. Gildardo Ruiz Velázquez; del Municipio de Aquila: C. José María Valencia Guillén; del Municipio de Coalcomán: C. Mary Esquivel. Al encargado de Protección Civil del Municipio de Aquila: C. Vladimir, al Director Regional del ISSTE Apatzingán: C. José Carlos Torres Chávez.

Se agradecen los invaluables comentarios y sugerencias de los revisores anónimos de este trabajo, lo que fortalece la calidad del contenido.

REFERENCIAS

Abril, (2017). Buscan llevar telecomunicaciones a la Sierra-Costa Michoacana, primera plana.mx, recuperado el 04 de noviembre de 2022 de <https://primeraplana.mx/archivos/459377>.

Archundia, A H I. (2024). La necesidad de homologar la caracterización del daño estructural por sismo, Ingeniería Civil, Vol. 74, No. 651, pp 30-34.

Arias, A. (1970). *A measure of earthquake intensity*. HANSEN, R. (Editor). Seismic design for nuclear power plant. Cambridge, MA, The M.I.T. Press. pp. 438-483.

Bautista, M. (2020). 14,601 Cobertura Telecom en el Días de la Sociedad de la Información, Blog de Octavio Islas, recuperado el 05 de noviembre de 2022 de <https://octavioislas.com/2020/05/18/14601-cobertura-telecom-en-el-dia-de-la-sociedad-de-la-informacion-samuel-bautista-mora/>.

CENAPRED, (2021). Manual del Formato Breve de Captura de Datos para Evaluación Estructural, Centro Nacional de Prevención de Desastres Dirección de Investigación, Sistema Nacional de Protección Civil, Secretaría de Seguridad

y Protección Ciudadana, Gobierno de México, <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/484-MANUAL FORMATO BREVE CAPTURA DE DATOS N1.PDF>.

CICM, (2011). Formato de Inspección post-sísmica evaluación rápida, Colegio de Ingenieros Civiles de México México.

Estrictamente Digital. (2020). Internet para Todos incrementó meta mensual de cobertura, Eje Central, Redacción eje central, recuperado de <https://www.ejecentral.com.mx/internet-para-todos-incremento-meta-mensual-de-cobertura/>.

Jara, D. M., Hernández, B. H., Álvarez, M. O., (2022). Efecto del componente sísmico vertical en puentes, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, ISSN-e 2395-8251.No, 108, 79-107, [DOI: 10.18867/RIS.105.602](https://doi.org/10.18867/RIS.105.602).

García, J., Bernal, A. G., Contreras, C. G., Gama, A. (2012). Método de evaluación simplificada de la capacidad sísmica de estructuras típicas de la ciudad de México, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, UAM-A, México.

Gobierno de México (2022). 478. Secretaría de Salud activa operativo en Michoacán y Colima para atender a población afectada por sismos, Secretaría de Salud, rescatado de <https://www.gob.mx/salud/prensa/478-secretaria-de-salud-activa-operativo-en-michoacan-y-colima-para-atender-a-poblacion-afectada-por-sismos?idiom=es>.

Gómez, B., Jean, P., Pérez, G., Treviño, T., (2019), Edificaciones de Mampostería, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Ed. Limusa, México, ISBN: 978-607-05-0861-5.

Housner, G., W. (1952). *Intensity of ground motions during strong earthquakes*. Earthquake Research Laboratory. California Institute of Technology. California, USA.

INEGI, (2017). Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo, 2017, Instituto Nacional de Estadística y Geografía y Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, México.

INIFED, (2021). Evaluación postsísmica de la infraestructura Física Educativa de México, Volumen 1: Metodología, Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa, en Liquidación y del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, México, ISBN: en trámite.

ISC-CDMX, (2019). Formato de Inspección post-sísmica-evaluación rápida, Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México, Secretaría de Obras y Servicios Gobierno del Distrito Federal, SMIS, México.

Pacheco, J. (2022). Daños por sismos de septiembre en Michoacán ascienden a 400 mdp, Quadratin Michoacán, recuperado el 03 de noviembre de 2022 de <https://www.quadratin.com.mx/principal/danos-por-sismos-de-septiembre-ascienden-a-400-mdp-reporta-segob/>.

Rodríguez, R.M., Castrillón E. (1995). Manual de Evaluación Postsísmica de la Seguridad Estructural de Edificaciones, Series, Instituto de Ingeniería, UNAM, <http://datosabiertos.unam.mx/IINGEN:RUSI:569>.

SEP, (2022). SIGED, Sistema de Información y Gestión Educativa, rescatado el 24 de octubre de 2022, <https://sigid.sep.gob.mx/SIGED/escuelas.html>

Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (<http://www.ssn.unam.mx/>).

SSN, (2022). Sismo del 19 de septiembre de 2022, Michoacán (M 7.7), Reporte Especial, Grupo de Trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM, actualizada al 29 de septiembre de 2022. URL: <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2022/SSNMX rep esp 20220919 Michoacan M74.pdf>

USGS, (2022a), Geological Survey, Earthquake Hazards Program, M7.6-35km SSW of Aguililla, Mexico, 2022-09-19, rescatado de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000i9bw/dyfi/intensity>.

USGS, (2022b). Geological Survey, Earthquake Hazards Program, rescatado de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000i9bw/executive>.