

CAPÍTULO 1

Reconocimiento geotécnico de San Mateo del Mar

Gil Humberto Ochoa González

Luis Ignacio Vanegas Espinosa

Antecedentes

La población de San Mateo del Mar se encuentra en el estado de Oaxaca, en la región del Istmo de Tehuantepec al sureste del Estado, a una altura máxima de 8 metros sobre el nivel del mar. Colinda al sur con la laguna Quirium Tilime y al norte con la Laguna Superior. Su clima es muy cálido, con oscilación térmica corta y lluvias en verano y principios de otoño (INEGI, s.f.).

El día 7 de septiembre de 2017, esta comunidad fue afectada por el sismo de 8.2 grados de magnitud (2017-09-08 4:49:19 UTC) con epicentro frente a la costa de Chiapas (15.022°N, 93.899°W). Las afectaciones provocaron daños en viviendas hasta 80%, según Pérez (2017), y muchos de estos daños se catalogaron como colapso.

Vecinos de San Mateo del Mar refieren que se abrieron grietas en el suelo por las que salía agua, y que zonas del poblado quedaron inundadas durante y después del sismo.

Los siguientes son ejemplos de relatos de los pobladores:

“Ver el agua brotando de la tierra y cómo se agrietaba el suelo la media noche del jueves 07” (Hernández, 2017).

“En San Mateo del Mar el terremoto hizo más que tirar las paredes, causó que la tierra se abriera y el agua empezara a brotar del suelo; el poblado se inundó y las viviendas se colapsaron [...] Como podemos ver todas las casas después del sismo se las comenzó a tragar el mar; la arena se elevó y en las grietas del suelo brota agua” (Milenio, 2017).

“...hundiendo lentamente las casas sacudidas por el sismo sin importar que sean de concreto y tabique o solo de adobe con techos de palma” (EFE, 2017).

Algunos videos con afectaciones del lugar se reportaron en Hinojosa (2017), Mendoza (2017) y Bachillerato Comunitario ikoots (2017), señalan que se observaron agrietamientos y hundimientos del suelo, de algunas calles y también de algunas casas.

Con base en investigación sobre notas periodísticas y de sitios de internet, así como mediante la observación de fotografías satelitales, se formuló la hipótesis de que en San Mateo del Mar se había presentado el fenómeno de licuación de arenas.

El fenómeno de licuación de arenas hace que arenas relativamente limpias (sin partículas finas), en estado suelto y sumergidas, pierdan la resistencia al esfuerzo cortante durante cargas sísmicas. Durante estas cargas cíclicas las arenas tenderían a densificarse, pero al estar

sumergidas el efecto es un aumento en la presión del agua, disminuyendo los esfuerzos efectivos que, en arenas, son proporcionales a la resistencia al esfuerzo cortante. Si los esfuerzos efectivos disminuyen lo suficiente, la resistencia al esfuerzo cortante se anula y el suelo se comporta como una suspensión, lo cual causa que las construcciones sobre él se hundan. En algunos casos se ha reportado también la flotación de tanques o de estructuras enterradas.

El efecto del aumento de la presión del agua se ve reflejado en el surgimiento del líquido a través de grietas o de la suspensión (agua y arena) a través de los conocidos volcanes de arena. Este fenómeno ha sido descrito de manera técnica en diversos trabajos, entre ellos el de Idriss y Boulanger (2008), en el terremoto de Niigata en Japón en 1964, en el de San Fernando, California, Estados Unidos, en 1971, y en Kobe, Japón, en 1995.

En San Mateo del Mar se observó que las viviendas averiadas presentaban diferentes tipologías de afectaciones, sin que algún tipo en específico de sistema constructivo hubiese sufrido mayores o menores daños que otros.

En octubre de 2017 el ITESO propuso llevar a cabo un reconocimiento de la situación geotécnica de San Mateo del Mar para eventualmente dar recomendaciones para la reconstrucción de viviendas en ese lugar.

Objetivos del reconocimiento

Los objetivos de este trabajo fueron:

1. Verificar si el comportamiento del suelo durante el sismo contribuyó al daño en las viviendas por medio del fenómeno de licuación de arenas.
2. Si fue el caso de licuación de arenas, evaluar si es posible identificar de manera práctica zonas de mayor o menor peligro dentro de la población, mediante un equipo o método que pueda ser utilizado por los pobladores para su futura aplicación.
3. Preparar y representar en un Sistema de Información Geográfica (SIG) los resultados de los estudios de manera que se compare en un futuro la información con datos de diferentes tipos, como nivel de daños, niveles de agua freática, densidad de población, estado de marginación, etcétera, y pueda ser utilizado para la toma de decisiones.
4. Eventualmente, dar recomendaciones generales sobre las cimentaciones que mitiguen el fenómeno.

Quedó fuera de los alcances de este trabajo el diseño específico de los cimientos de las viviendas y edificaciones locales; se trata de una labor que debe ser llevada a cabo tomando en cuenta las características propias de los proyectos, de los sistemas constructivos y de las particularidades del terreno en el que vaya a quedar emplazada la obra.

Descripción del estudio

Se realizaron dos visitas de reconocimiento geotécnico a San Mateo del Mar. La primera tuvo lugar los días 4 y 5 de noviembre de 2017, y se recabó información cualitativa para observar las condiciones de daños en las viviendas afectadas, la fisiografía del lugar y el testimonio no registrado de las personas. Posteriormente, se realizó una búsqueda de información documental sobre las condiciones climatológicas —en especial, la precipitación pluvial—, el entorno geológico y posibles variaciones en el tiempo del terreno.

En la segunda visita, los días 18 y 19 de noviembre de 2017, se utilizó un equipo portátil de penetración de cono dinámico esquematizado en la Figura 1 con las características descritas en el perfil presentado en la Figura 8, para correlacionar, en diferentes puntos y a distintas profundidades, la densidad o estado de compactación del material.

Si bien el equipo utilizado no permite el uso de correlaciones con propiedades físicas y con parámetros de resistencia, como lo hace la prueba de penetración estándar (SPT, por sus siglas en inglés), se tomó la decisión de usarlo por su fácil fabricación, transporte y manejo, lo que ayudó a optimizar recursos y el tiempo destinado para esta fase. De establecerse una relación de los resultados de los sondeos y los de SPT, se estimó que se podrían utilizar las correlaciones mencionadas.

Este tipo de sondeo se consideró el más indicado porque permite evaluar la compacidad del suelo de manera rápida, continua y bastante precisa. Asimismo, implica equipos que son fáciles de transportar, y pruebas sencillas de realizar e interpretar; se fabricaron dos con la finalidad de realizar un mayor número de sondeos en el menor tiempo posible.

Un muestreo como el de la SPT requeriría una transportación determinada y una supervisión más especializada, aunque hubiera reducido el número de sondeos realizados. Por otro lado, volvería más complicada la apropiación técnica de la metodología por parte de la población local, fallando a uno de los objetivos de la intervención.

Con la finalidad de estimar de manera preliminar la densidad de las arenas a diferentes profundidades y en diferentes lugares de San Mateo del Mar, se realizaron 34 sondeos de cono dinámico. También se recuperaron muestras de material para realizar un análisis de granulometría y establecer su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Es muy importante mencionar que las características del suelo en San Mateo del Mar son particulares y específicas. El fenómeno de licuación de arenas ocurre en cierto tipo de suelo, sobre todo en suelos granulares con tamaño de partícula uniforme, de baja compacidad, de



Figura 1. Esquema de la herramienta para la prueba de cono dinámico

espesores superiores a un metro y con origen geológico reciente, como los que se presentan en algunas barras costeras y playas. Estos suelos son activados por ciertos factores, como el nivel freático y la frecuencia del sismo. Por lo tanto, otros lugares y circunstancias deberán ser analizados a fondo y en su contexto, y por ningún motivo extrapolarse los procedimientos y las conclusiones aquí presentadas.

A partir de los sondeos de cono dinámico se estableció de manera comparativa un valor estimado del espesor de suelo superficial más suelto; el espesor resultó tener una variación de entre 0.9 y 2.8 metros de arenas sueltas. De las granulometrías se obtuvo que el material principal —clasificado por el SUCS— son arenas mal graduadas y en menor medida arenas mal graduadas con limos, lo que significa que en el lugar se encuentran arenas con diámetros de partículas de tamaño similar, susceptibles a la licuación. Con los datos anteriores, las observaciones de la fisiografía del lugar y la investigación documental, se concluyó que San Mateo del Mar se encuentra sobre depósitos cuaternarios (recientes) de litoral y eólicos, ambos correspondientes a los materiales susceptibles al fenómeno de licuación.

Se observaron niveles freáticos entre 0.42 y 1.10 metros de profundidad en los sondeos hechos de noviembre de 2017 a enero de 2018, mientras que en los sondeos realizados en marzo de 2018 se observaron niveles freáticos entre 2 y 3 metros de profundidad; lo que sugiere que el nivel freático disminuyó conforme transcurrió el temporal de lluvias. Cabe mencionar que las personas refirieron un nivel más elevado y cercano a la superficie, e incluso superior a ella, el día en que ocurrió el sismo.

Los sitios cercanos a los cuerpos de agua presentaron mayores daños, según señalaron los pobladores, lo cual es congruente con niveles freáticos más elevados; además se observaron deficiencias en algunos de los métodos de relleno y de construcción del lugar.

De forma preliminar se dedujo que ese día coincidió un nivel freático elevado —al final de la temporada de lluvias—, materiales susceptibles a la licuación característicos de una barra de arena, y un sismo que, por su intensidad, ocasionó el fenómeno de licuación de arenas y dañó todo tipo de viviendas, sin importar lo ligero de sus estructuras.

La mayoría de los métodos de análisis de este tipo de suelos está diseñada para establecer el potencial o probabilidad de licuación de arenas; en este caso no era necesario el análisis al haberse presentado ya el fenómeno. Las consecuencias del fenómeno incluyen la pérdida de la resistencia a la fricción del suelo, extensión lateral de pequeños taludes y asentamientos de la superficie. Durante el fenómeno se observan agrietamientos, elevación del nivel del agua —ambos reportados por los vecinos— y la formación de los llamados volcanes de arena, estos últimos no se apreciaron en el lugar. En la literatura se reporta que los lugares donde se ha presentado la licuación de arena son susceptibles a que se vuelva a presentar, es decir, no necesariamente ocurre una densificación que prevenga una nueva licuación.

Resultados del reconocimiento

De la información geológica documental se estableció un marco geológico para San Mateo del Mar, que puede ubicarse en la Sierra Madre del Sur. San Mateo del Mar se encuentra en una zona de depósitos cuaternarios de litoral (Qli) y eólicos (Qeo) (Consejo de Recursos Minerales, 2000). Los primeros están formados y depositados por la acción del oleaje y corrientes marinas, tanto en la línea de costa como en las márgenes de grandes lagunas que constituyen franjas angostas paralelas a la línea de costa, y también en cordones litorales de escasa elevación, y son conformados por sedimentos clásticos de arenas y conchas de crustáceos (Consejo de Recursos Minerales, 2000).

Los depósitos eólicos son materiales depositados por el viento, formados por granos de tamaño de limos, hasta arena de cuarzo y feldespatos de forma subredondeada a redondeada. Morfológicamente, constituyen dunas que alcanzan 3 a 4 metros de altura. Afloran en la parte central del Istmo de Tehuantepec, en la zona sur y sureste de la Laguna Inferior y bordean la costa. Alcanzan un espesor de hasta 10 metros, son considerados de edad reciente y en la actualidad se siguen acumulando por procesos endógenos (Consejo de Recursos Minerales, 2000).

Respecto a la precipitación pluvial de la región, en la Figura 2 se observa la precipitación normal anual; la época de mayor precipitación comprende los meses de junio a septiembre, y es en este último cuando se espera mayor concentración de humedad en el suelo y niveles más altos de agua freática.

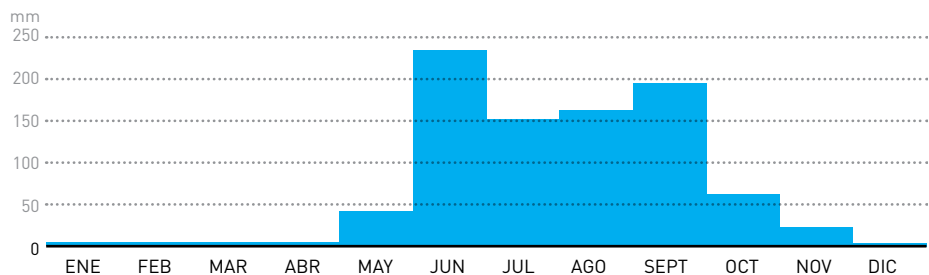


Figura 2. Normal de precipitaciones medidas en estación referenciada en Tehuantepec, Oaxaca, a 30 km de San Mateo del Mar

Nota: Estación en latitud 16°19'00" N. Longitud 095°14'04" W.

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2017). Se observa que el mes en el que ocurrió el sismo fue al final de la temporada de lluvias.

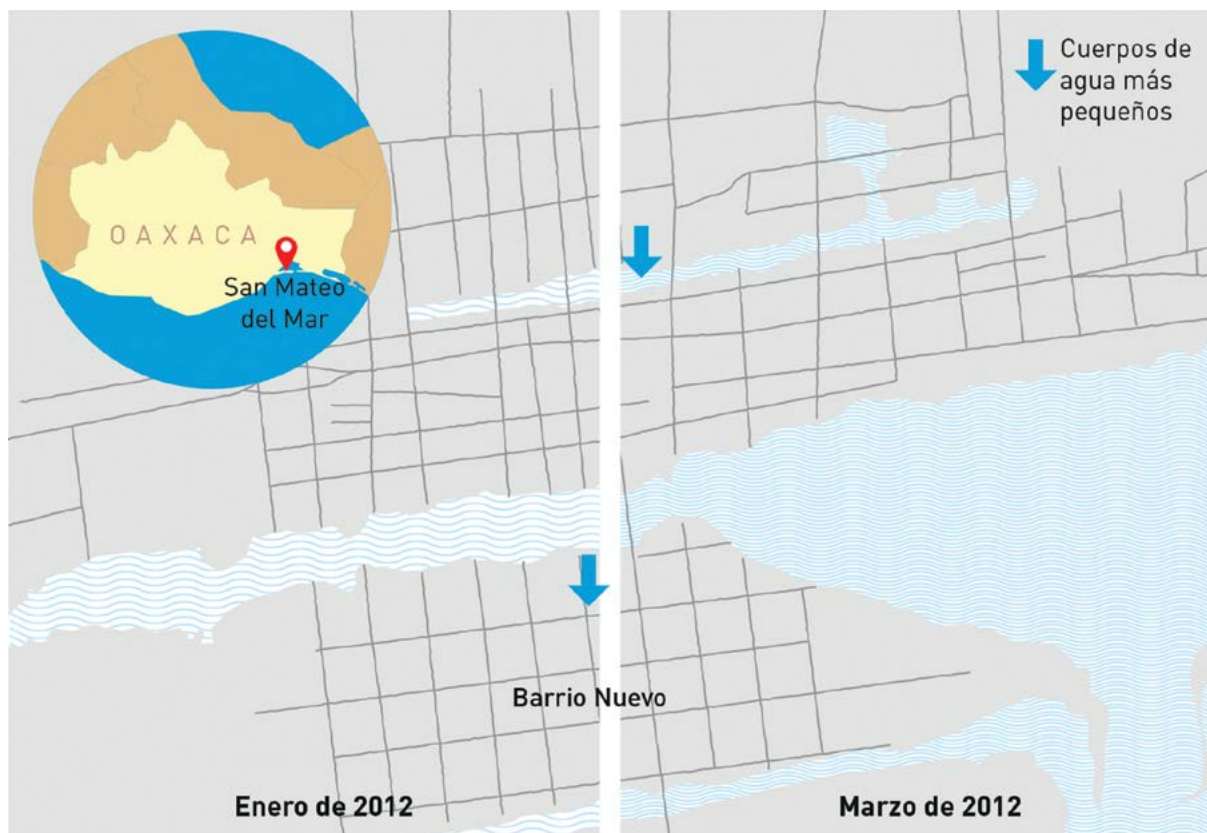


Figura 3. Comparación de imágenes de San Mateo del Mar en 2012

La Figura 3 muestra dos imágenes del mismo año en San Mateo del Mar, y cómo el nivel de agua varía de manera significativa; en la imagen del lado izquierdo, la localización de los cuerpos de agua luce en un estado seco o casi seco, en la del lado derecho aparecen llenos. Las flechas señalan la ubicación de algunos cuerpos de agua más pequeños, también se aprecia la localización de las arenas, y resulta evidente que hay más en los lugares donde no hay vegetación o construcciones.

En la Figura 4, tomada en Barrio Nuevo —su ubicación aparece en la Figura 3—, se ve el material claro tanto en la calle como en las dunas de arena al lado izquierdo y al fondo. Personas del lugar comentan que antes había dunas más altas y que algunas de ellas se utilizaron como relleno para construir viviendas, colocado de manera no controlada y no compactada. En la Figura 4 se observan dunas de arena a la izquierda y al fondo. Este material es transportado y depositado por el viento y presenta propiedades de un material con potencial de licuación; los vecinos añaden que ha servido como relleno no compactado también en la construcción de viviendas.



Figura 4. Calle en Barrio Nuevo

FOTOGRAFÍA: GIL HUMBERTO OCHOA GONZÁLEZ.

El evento que detona el fenómeno de licuación de arenas es un sismo es que las aceleraciones o velocidades máximas están estrechamente relacionadas con la posibilidad de que se presente el fenómeno.

En el mapa de colores de la Figura 5 se observa la intensidad instrumental del sismo que, al contrario de la magnitud —que es un valor absoluto que mide la energía liberada—, estima los efectos a nivel local para un sismo, por lo que varía geográficamente dependiendo cómo se percibió este. Se aprecia que en San Mateo del Mar tuvo una intensidad entre VIII y XIX, lo que supone daños de moderados a graves y aceleraciones de entre 40% a 75% de la aceleración de la gravedad, por lo que su percepción fue de severo a violento.

Por otro lado, Zhu et al. (2017) presentaron un modelo global en el cual utilizan 14 tipos de datos, como velocidad de onda de corte a profundidad, profundidad al nivel de agua freática, distancia a la costa, distancia a un río o un cuerpo de agua y precipitación, además de la velocidad máxima del suelo (PGV) para estimar la probabilidad de licuación (véase la Figura 6). Estos autores señalan que existe probabilidad de licuación, para el sismo ocurrido, de manera general en la zona y particularmente en la zona de estudio.



Figura 5. Intensidad instrumental del sismo

Fuente: elaborado con base en usos (2017).

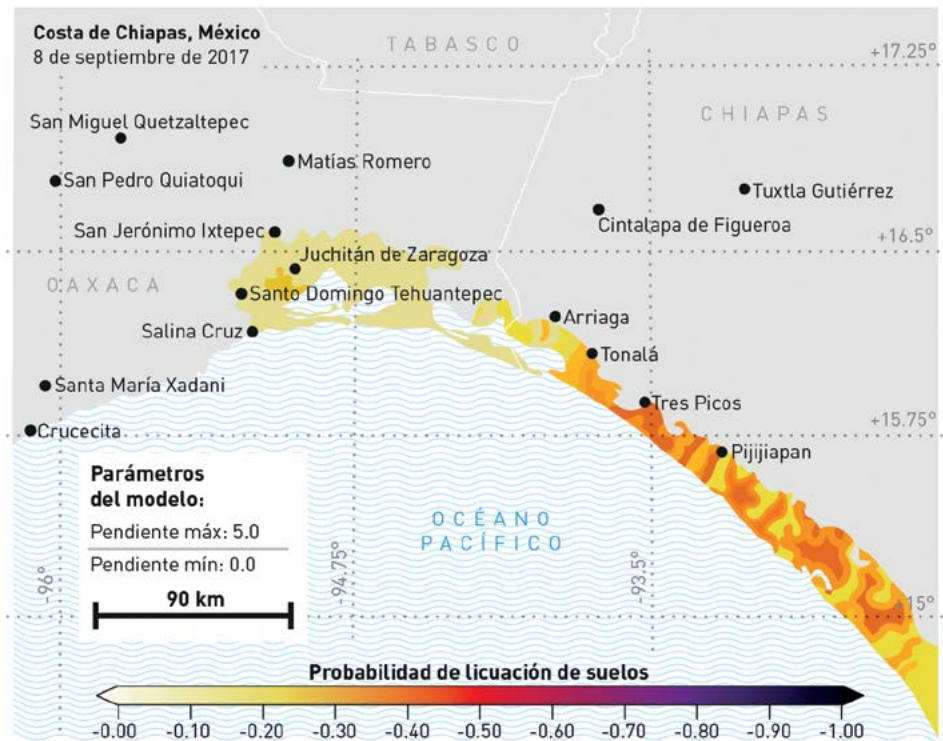


Figura 6. Probabilidad de licuación de suelos

Fuente: San Mateo del Mar se encuentra al este de Salina Cruz. Elaboración con base en Zhu et al. (2017).

En la visita del 4 y 5 de noviembre, varios pobladores describieron la aparición de grietas durante el temblor por las que brotaba agua, además comentaron sobre el hundimiento de construcciones, de brocales de pozos y un incremento en el nivel del agua dentro de los pozos. En las Figuras 7A y 7B se observaron dos tipos de viviendas estructuralmente sanas en apariencia, pero con hundimientos severos. Al momento de hacer la visita, muchas de las construcciones dañadas ya habían sido demolidas, por lo que no se pudo apreciar gran número de destrozos. Sin embargo, el patrón de daño fue claro en diferentes partes de San Mateo del Mar.

Respecto de las muestras de suelo obtenidas durante las visitas, la mayoría eran de suelo definido por la clasificación SUCS como arenas mal graduadas (o SP, por sus siglas en inglés); material que en su mayoría sufre licuación de arenas por su composición de partículas con poca distribución de tamaños. En casi todas las muestras se encontraron finos entre 2 y 3%; en una de las pruebas los finos ascendieron a un total de 5%, y en otra prueba su presencia fue de 12%. Estos finos fueron clasificados como limos, que también entran en el rango de materiales con peligro de licuación.



Figuras 7A y 7B. Hundimiento de viviendas con diversa tipología; nótese que el cuarto no presenta fisuras visibles a pesar del desplazamiento (Figura 7B)

FOTOGRAFÍAS: GIL HUMBERTO OCHOA GONZÁLEZ.

La información recabada mediante los sondeos con el equipo de cono dinámico señala que todos los lugares presentaron una zona superficial suelta que varía de 0.9 a 2.8 metros, la zona se estableció de manera arbitraria por debajo de los 11 golpes, denominada así al no ser un SPT, o prueba de penetración estándar, para el que existan correlaciones establecidas y ampliamente usadas. El ejemplo del sondeo 11 se observa en la Figura 8.

Para los resultados de los sondeos con cono dinámico de la Figura 9 se utilizó el Sistema de Información Geográfico, y muestra la distribución espacial del espesor superficial más suelto; los colores rojos representan los puntos donde las arenas más densas están más profundas, y las zonas de color amarillo donde las arenas más densas están más cerca de la superficie. Si bien hay una tendencia, no se consideró suficiente la información para establecer diferentes zonas con límites definidos, que se podría generar con un estudio geotécnico y con mayor cantidad de sondeos de cono dinámico. La densidad de las arenas no es el único factor que determina la licuación de un suelo, otro factor es si este está sumergido bajo el nivel de aguas freáticas, y en el caso que nos ocupa, el nivel de agua varía a lo largo del año y se presume mayor en las elevaciones más bajas y cercanas a los cuerpos de agua (Figura 3).

Como ejemplo de la aplicabilidad de la información representada mediante el SIG, en la Figura 9 se ve un censo de casas con algún tipo de daño que no habían recibido apoyo gubernamental —llamadas sin folio— hasta la fecha en que se levantó el cuestionario. La clasificación se hizo con base en un reporte de los mismos vecinos, en el que anotaron si hubo algún colapso de cualquier estructura, y si hubo asentamientos o si hubo fisuras.

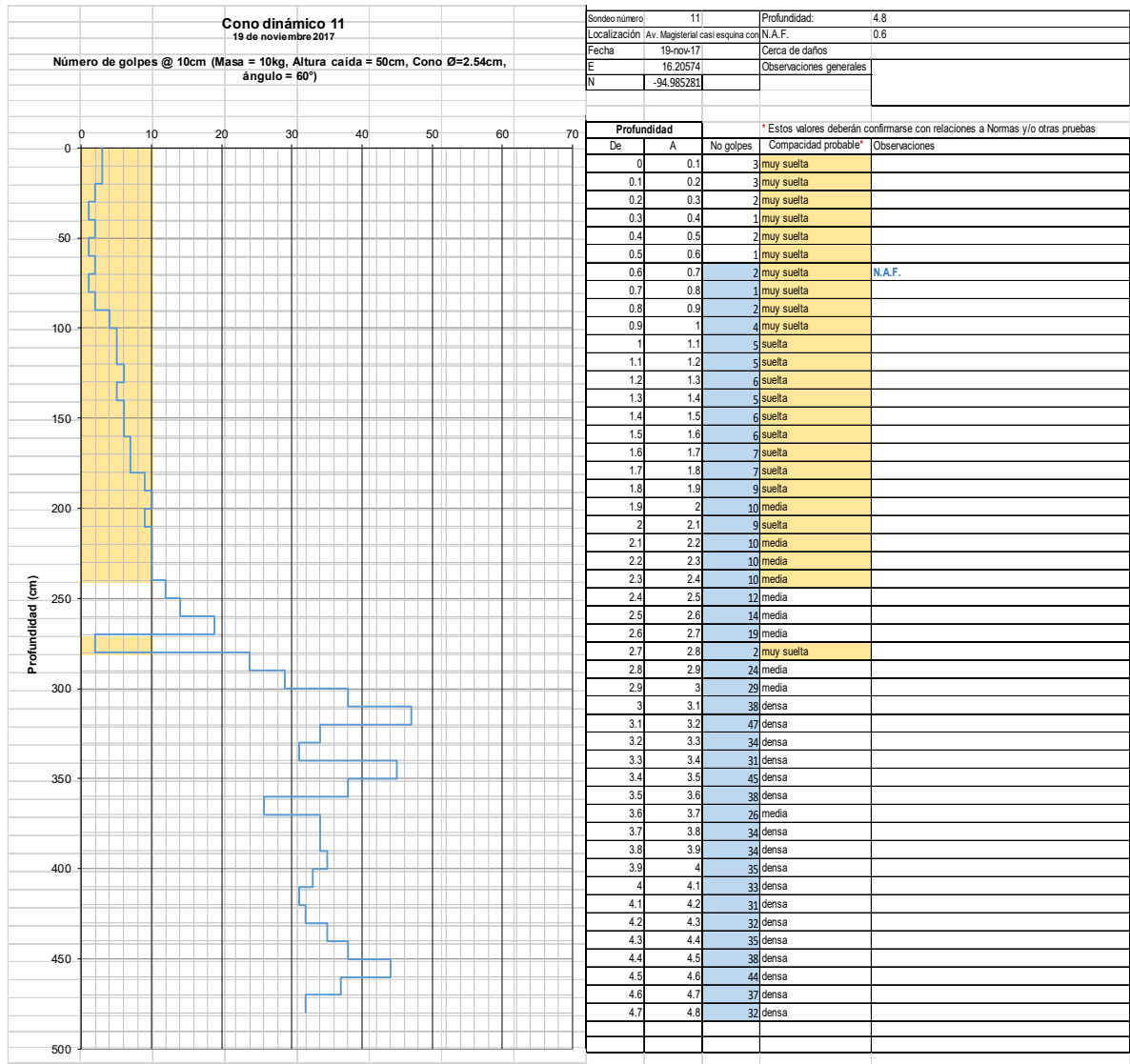


Figura 8. Ejemplo de resultados de sondeo con cono dinámico en el punto 11, en San Mateo del Mar
Nota: La columna azul muestra la profundidad al que se encontró el nivel del agua freática.

La Figura 10 representa la magnitud de los daños de las viviendas en una escala de colores; aparecen también las secciones o barrios con información sobre su área y el número total de reportes. Los datos tendrían mayor utilidad de contarse con información general de los daños a las viviendas que no esté restringida a las averías que no recibieron apoyo gubernamental; otra información útil sería la topografía y la variación de los niveles de agua freática.

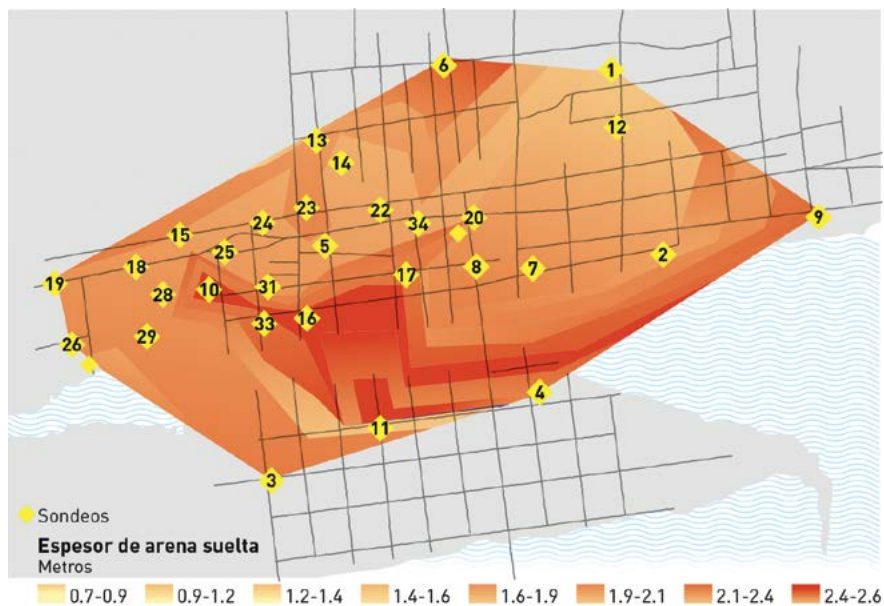


Figura 9. Localización de sondeos de cono dinámico realizados a la fecha (rombos amarillos) y espesor de arena con compacidad suelta o muy suelta a partir de la superficie, según lo definido para este estudio como avances de 10 cm con menos de 11 golpes en estos sondeos.

Fuente: Sistema de Información Geográfica.

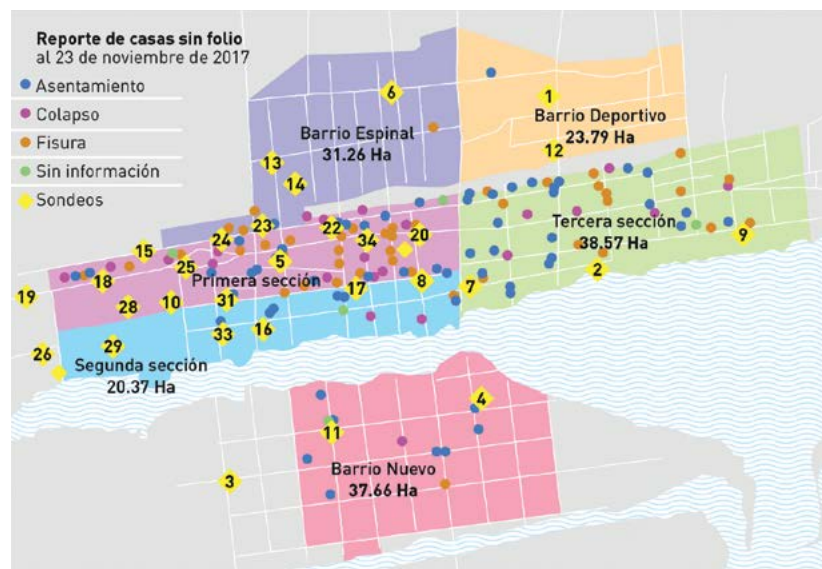


Figura 10. Localización y estimación de daño en viviendas sin folio del gobierno (no son todas las viviendas dañadas de SMM)

Fuente: Sistema de Información Geográfica.

Conclusiones y recomendaciones

1. Con base en los relatos de los pobladores durante el sismo, las características geológicas del lugar, el tipo de material encontrado —sus características físicas, la distribución del tamaño de sus partículas y el estado presente de densidad—, el nivel de agua freática al momento del siniestro, las aceleraciones o velocidades del suelo alcanzadas, y posiblemente la falta de confinamiento lateral cerca de los cuerpos de agua, se hace evidente que durante el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2017 se presentó el fenómeno de licuación de arenas.

2. No se considera necesario hacer un análisis de potencial de licuación, ya se ha mencionado que en un sitio donde ha ocurrido este fenómeno es viable que vuelva a suceder (Seed et al. 2003; Idriss & Boulanger, 2008). Sin embargo, se recomienda la realización de este procedimiento para el diseño de cimentaciones específicas.

3. La prueba de cono dinámico demostró ser útil para dar una primera idea del espesor suelto y de las condiciones de las arenas del lugar. Vale señalar que, por la variabilidad de la topografía ocasionada por las dunas, los cambios en el nivel de agua subterránea y la escasa información de daños, no es posible establecer de manera certera una zonificación determinista.

Sí existe información de diferentes zonas que coinciden con lo relatado por los vecinos; en la Figura 9, la zona de un amarillo más claro fue referenciada como de menos daños —aunque sí se observaron en la visita—, el área norte estudiada fue señalada de esta manera —con menor daño—. Lo que parece acertado es que en la zona roja hubo mayor incidencia de destrozos, sin que se cuente con un censo que cubra la información, salvo los testimonios; ahí se encuentra un hospital recién construido que no sufrió desperfectos (sondeo CD número 10). Se recomienda investigar su sistema constructivo.

4. Existen diferentes consideraciones y estrategias para realizar el diseño o construcción de mejoramiento de suelos o cimentaciones. Todos dependen de la viabilidad de construcción y de la tecnología disponible, por ejemplo: necesitan equipo especial la hincada de pilotes, la inyección de lechada o construcción de columnas de gravas o drenes. El costo de su diseño y construcción suele ser elevado, y por lo regular es difícil establecer el nivel de confiabilidad de la solución; aun cuando se ha definido el espesor más suelto del material, no se ha determinado el espesor con potencial de licuación, dato necesario para el diseño de pilotes u otro tipo de cimentación o mejoramiento profundo.

Un método relativamente directo y de fácil control es la excavación y remplazo con un relleno compactado, con la ventaja de que su construcción y verificación tiene un alto grado de confianza y se pueden realizar con equipos y sistemas disponibles. En San Mateo del Mar existe evidencia de que el uso de este método ayudó a prevenir daños, por ejemplo, en el Bachillerato Asunción Ixtaltepec (BAI); los habitantes cuentan que se realizó una sustitución de material con grava compactada, y a pesar de que el espesor suelto del lugar es de más de 1 metro (sondeo CD 1), no sufrió daños.

5. Otro edificio del que no se reportan estropicios es el hospital (sondeo CD 10), donde se encontró un espesor suelto de 2.5 metros; se desconoce el sistema constructivo por lo que se recomienda investigarlo. Los rellenos realizados como en el BAI cumplen tres funciones: la primera es que establecen una plataforma que dota de cierta estabilidad a la construcción que se levante sobre ella; la segunda, permite la disipación del exceso de la presión de agua

generado por las ondas sísmicas, mitigando así la presentación del fenómeno, pero difícil de estimar con precisión y, la tercera, que aumenta el esfuerzo efectivo confinante en el suelo más profundo, lo que disminuiría el riesgo a la licuación o las deformaciones en caso de que se presente el fenómeno.

Este proceso de excavación y relleno puede ser complicado constructivamente con niveles de agua freáticos altos, y ni con los datos del presente estudio se asegura que se sustituya todo el espesor con potencial licuable —si se reemplaza el espesor indicado como suelto—. Sin embargo, sí se constituye un espesor firme para el desplante de una construcción, además de que existe evidencia de haber funcionado en San Mateo del Mar en la construcción del BAI.

6. En relación con las recomendaciones para cimentaciones en áreas con características como las de San Mateo del Mar, Idriss y Boulanger (2008) sugieren algunas estrategias para mitigar el fenómeno de licuación, entre ellas:

- I. No hacer nada y aceptar el potencial de riesgo y daño.
- II. Abandonar el proyecto o escoger otro lugar.
- III. Mejorar el suelo de tal manera que el daño sea eliminado o reducido a niveles aceptables.
- IV. Modificar el diseño para que la licuación del suelo no dañe las estructuras o que el daño sea reducido a niveles aceptables.

Entre las estrategias II y III se aprecian algunos métodos en la tabla 1, en la cual Seed et al. (2003) hace una recopilación de métodos agrupados en seis categorías principales; en ocasiones se utilizan solo dos o tres métodos ya que algunos de ellos aportan de diferentes maneras. Su aplicabilidad depende de los recursos económicos y técnicos con los que se cuenten.

7. Idriss y Boulanger (2008) hacen una recopilación de la aplicabilidad de distintos métodos, dependiendo el análisis granulométrico de los materiales del lugar. Cuando se superpusieron los resultados de las granulometrías realizadas a los materiales recuperados en San Mateo del Mar, se observó que, atendiendo las recomendaciones, los métodos de estos autores, menos uno, serían aplicables en la localidad.

- a) El método de vibroflotación se logra combinando la instalación de columnas de grava.
- b) El método de compactación dinámica profunda requiere dejar caer una gran masa desde una altura considerable.
- c) El método de inyección de lechada para compactación (véase la tabla 1) con el método *Bottom-up*, que se aplica a una cimentación ya construida y con un estrato suelto no superficial, también podría ser utilizado en San Mateo del Mar.
- d) El método de mezclado profundo *in situ*.
- e) El método de inyección de chorro de lechada o *jet grouting*.

Estos métodos requieren la contratación de una empresa ejecutora que diseñe y provea la aplicación correspondiente.

Tabla 1. Métodos para mitigar el peligro de licuación

Métodos selectos para mitigar el peligro de licuación de suelos		
Categoría general	Método de mitigación	Notas
I. Excavación y/o compactación	(a) Excavación y desecho de suelos licuables	
	(b) Excavación y recompactación	
	(c) Compactación (nuevo relleno)	
II. Densificación del suelo <i>in situ</i>	(a) Compactación con sondas vibratorias (ejemplo: vibroflotación)	Pueden combinarse con columnas de gravas
	(b) Consolidación dinámica (dejar caer pesos muy grandes)	También pueden proveer refuerzo
	(c) Pilas de compactación	
	(d) Compactación profunda con explosivos	
	(e) Lechada de compactación	
III. Otros tipos de tratamiento del suelo	(a) Lechada permeable	La instalación de muchos drenes puede proveer densificación <i>in situ</i>
	(b) Lechada a presión	
	(c) Mezclado profundo	
	(d) Drenes • Drenes de gravas • Drenes de arena • Drenes prefabricados	
	(e) Precarga en superficie	
	(f) Rellenos estructurales	
IV. Bermas, diques, muros y otras estructuras de contención en orillas	(a) Estructuras y/o estructuras de tierra construidas para proveer confinamiento en las orillas y prevenir grandes desplazamientos laterales	
V. Cimentaciones profundas	(a) Pilas (Hincadas a golpes o por vibración)	También pueden densificar el suelo
	(b) Pilotes (Instalados en perforaciones o excavaciones)	
VI. Cimentaciones superficiales reforzadas	(a) Contratrabes	
	(b) Losas reforzadas	
	(c) Losas preesforzadas	
	(d) Sótanos rigidizados	

Fuente: elaboración con base en Seed et al. (2003).

8. Los métodos de cimentaciones profundas (la opción V en la tabla 1), ya sea hincados o excavados, podrían utilizarse en San Mateo del Mar, atendiendo que la hincada de pilotes requiere de uso de maquinaria pesada. Los pilotes excavados han sido utilizados en arenas limosas sin necesidad de ademar; en San Mateo del Mar, por la escasa presencia de finos y el elevado nivel de aguas freáticas —que varía según la época del año—, hay que considerar la instalación de un ademe durante la excavación, para mantener su integridad.

9. El diseño de las cimentaciones —adecuado a cada lugar— deberá contemplar la posible licuación de un espesor superficial del suelo durante el sismo, por lo que será necesario instalarse a una profundidad suficiente para no perder soporte, si se diera el caso, así como tomar

en cuenta que la parte más superficial —dentro de las arenas en suspensión— podrían estar trabajando como columnas y no como pilotes, por lo que se considera necesario diseñarlas para los esfuerzos laterales que esto conlleva.

10. Respecto de la opción de sustituir el suelo por otro de mejor calidad o recolocar el mismo suelo del lugar con una mayor densidad, este proceso debería llevarse a cabo por lo menos con el espesor de las arenas más sueltas, y el relleno colocado posteriormente se ceñiría a un estricto control de compactación. Al parecer, este fue el método utilizado en el BAI (Sondeo CD 1), en el que la construcción no sufrió daños, y serviría de tres maneras:

I) Se contaría con una plataforma más estable que la arena suelta desde la cual desplantar las viviendas. El control de calidad durante la compactación permitiría realizar la cimentación a la menor profundidad posible y alejarla de los esfuerzos inducidos por la estructura de las arenas del lugar.

II) Si se utiliza grava con granulometría abierta, se facilita la posibilidad de drenaje durante el incremento de la presión de agua en los poros del suelo durante la carga cíclica del suelo, lo que evitaría la disminución de los esfuerzos efectivos hasta el punto crítico.

III) Una de las ventajas de esta opción es que el peso del relleno incrementaría los esfuerzos efectivos que requiere vencer el sismo, tanto en sentido vertical como en sentido horizontal por efecto de confinamiento.

Las dos últimas consideraciones se desempeñarían mejor entre mayor sea el área de material sustituido.

Por último, la construcción cerca de los cuerpos de agua expondría las fincas a una mayor probabilidad de enfrentar un alto nivel de aguas freáticas durante otro evento sísmico y a un desplazamiento lateral de las arenas hacia estos cuerpos de agua, lo que se reflejaría como un hundimiento vertical de la construcción; sería recomendable buscar un método de confinamiento lateral.

Referencias

Bachillerato Comunitario Ikoote. (2017). *San Mateo del Mar*. [Video]. YouTube. <https://bit.ly/4rH19g2>

Consejo de Recursos Minerales. (2000). *Explicación a Carta geológica-Minera Salina Cruz-Juchitán E15-10 D15-1 Esc 1:250,000 Estado de Oaxaca*.

EFE. (4 de octubre de 2017). *San Mateo del Mar, pueblo mexicano inundado por el océano*. Debate. <https://bit.ly/4tqqxs6>

Hernández, C. A. (18 de septiembre de 2017). *El olvido y la tragedia en comunidades mareñas de Oaxaca*. El Imparcial del Istmo. <https://bit.ly/45Y10wz>

Hinojosa, Darkito. [@darkitohinojosa5527]. (11 de septiembre de 2017). *Terremoto: San Mateo del mar está totalmente abandonado, pidiendo ayuda del gobierno una ayuda* [Video]. Youtube. <https://bit.ly/4aMqrCX>

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.

INEGI. (s.f.). México en cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Resumen>

Maurer, B. W., Van Ballegooy, S., & Bradley, B. A. (2017). *Probabilistic Prediction of Severity of Liquefaction Surface Manifestation Using Geotechnical and Geospatial Models*. Engineering engrxiv archive. <https://engrxiv.org/preprint/view/105/255>

Mendoza, Julio. [Tangojulio9]. (12 de septiembre de 2017). *Oaxaca Earthquake!! Road all damage. Road to Barrio Nuevo. San Mateo Del Mar. Oaxaca cost*. [Video]. Youtube. <https://bit.ly/4ajwdeU>

Milenio (3 de octubre de 2017). San Mateo, el pueblo que el mar se está tragando. <https://bit.ly/4a9OnRr>

Mitchell, J. K. (2008). Mitigation of liquefaction potential of silty sands. En Laier, J.E., Crapps, D.K., Hussein, M.H. (Ed.), *From Research to Practice in Geotechnical Engineering* (Geotechnical Special Publication No 80). ASCE.

Pérez, Alonso. (23 de septiembre de 2017). *Inhabitables 80% de casas en San Mateo del Mar, Oaxaca*. El Imparcial del Istmo. <https://bit.ly/3ZwlylP>

Santiago, A. (1 de octubre de 2017). *San Mateo del Mar, castigado por las lluvias y temblores*. El Imparcial del Istmo. <https://bit.ly/4cmffix>

Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... & Faris, A. (2003). *Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework*. En Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA.

SMN. (2017). <https://smn.conagua.gob.mx/es/>

USGS. (2017). *M8.2 - near the coast of Chiapas, Mexico*. USGS. <https://bit.ly/4rLTlda>

Zhu, J., Baise, L. G., & Thompson, E. M. (2017). An Updated Geospatial Liquefaction Model for Global Application. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1365–1385. <https://doi.org/10.1785/0120160198>