



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
CIEMAD - IPN



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN GEOCIENTIFICA PROSPECTIVA DE UN
RECIENTE SOCAVÓN EN SANTA MARÍA ZACATEPEC, PUEBLA MÉXICO

Fecha. 05/07/21

Propuesta presentada ante:
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE DESARROLLO SUSTENTABLE Y ORDENAMIENTO
TERRITORIAL
GOBIERNO DEL ESTADO DE PUEBLA



CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



ELABORADA POR: DR. PEDRO FRANCISCO RODRÍGUEZ ESPINOSA

Calle 30 de junio de 1520 s/n Colonia Barrio la Laguna Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero
C.P. 07340, Ciudad de México. Teléfono: 57296000 Extensiones: 52711 y 52735

www.ciemad.ipn.mx

Certificado SGC ISO 9001:2008 No. FS605397



RESUMEN EJECUTIVO

El socavón de la comunidad de Santa María Zacatepec en el Municipio de Juan C. Bonilla es el resultado de la combinación de condiciones de susceptibilidad erosiva en el subsuelo, de eventos hidrometeorológicos no observados en los últimos tres años, flujos subterráneos naturales por gradiente hidráulico e inducidos por el intenso aprovechamiento del agua subterránea observada desde hace 15 años en la zona de Santa María Zacatepec, Puebla, México. Estudios geofísicos realizados con tres diferentes metodologías nos permiten referir condiciones sedimentológicas naturales de susceptibilidad erosiva que conforman los depósitos volcánicos del acuífero del Juan C. Bonilla y Huejotzingo, que han favorecido a través de muchos años de explotación el socavamiento del subsuelo agrícola en los estratos de explotación de agua subterránea.

Investigaciones climatológicas nos permiten referir a los últimos 3 años (2018-2020) con lluvias por abajo de la media climática de 84 mm para el mes de mayo (2018-2020), y comparado con lo ocurrido para el mismo meses en el 2021 el cual superó en más del 50% la cantidad de lluvia registrada de 147 mm. De igual forma los estudios geofísicos de refracción sísmica nos permiten descartar al menos hasta 50 metros de profundidad una falla geológica como causante de la aparición del socavón. Los Flujos subterráneos naturales producidos por el gradiente hidráulico presente en la microcuenca del río Actipan y los flujos subterráneos inducidos por conos de abatimiento producidos por la explotación del agua subterránea, han favorecido los procesos erosivos de socavamiento en estratos del subsuelo agrícola.

El proceso erosivo de remoción de sedimentos finos se lleva a cabo durante la época de lluvias actual y la alternancia de estos flujos promovió la remoción de sedimentos finos produciendo oquedades primeramente individuales y posteriormente colectivas que ocasionaron un vacío y consecuente colapso del techo del socavón. Una vez abierto el socavón se ha observado un nuevo proceso erosivo en el perímetro del socavón. La erosión circundante ha favorecido, a través de grietas, el crecimiento de los ejes mayor y menor del socavón, tendiendo con el tiempo a una forma circular, lo cual es desarrollado por la homogeneidad de los materiales que conforman el suelo agrícola donde se localiza el socavón. El proceso antes descrito se podría ver modificado por procesos erosivos en las fisuras de las paredes del socavón.

Investigaciones geohidrológicas del sitio de estudio y trabajo de campo refieren condiciones de una larga, y últimamente intensa explotación circular del agua subterránea alrededor del socavón pudiendo ser la causa principal del sitio y tiempo de su aparición.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
CIEMAD - IPN



La hipótesis actual está en proceso de re-validación dado que aún falta integrar información que tenemos en laboratorio con determinaciones analíticas de la hidrogeoquímica del agua de socavón y pozos circundantes muestreados. De igual forma tenemos en proceso trabajo de campo y laboratorio en desarrollo referente a la mecánica de suelos, estudios definitivos para la corroboración y correlación geofísica de nuestra actual información de resultados preliminares.

Debido a que el proceso está activo y las causas que le dieron origen podrían estarse replicando en algún otro sitio de la zona agrícola es recomendable llevar a cabo un estudio regional de magnetometría, con el cual podremos detectar zonas de susceptibilidad al desarrollo de anomalías que dieron origen al socavón. De igual forma debemos estudiar geohidrológicamente la zona de Juan C. Bonilla con registros de parámetros en los pozos de la región, nivel freático y muestras para la época de lluvias y época de estiaje con el fin de aproximar el ciclo hidrológico; así como una serie de estudios que se incluyen en el presente documento.



INTRODUCCIÓN

Para conocer las condiciones que originaron que el 29 de mayo se generara un socavón en un campo agrícola en el Municipio de Juan C. Bonilla, Puebla, el Instituto Politécnico Nacional diseñó una estrategia de investigación basada en estudios relacionados a las geociencias que dieran respuesta sobre las características del área de estudio y los procesos involucrados en el fenómeno. Así mismo, los alcances de la investigación se orientan a determinar las zonas de probable riesgo y fundamentar las acciones de prevención para salvaguardar la integridad de la ciudadanía.

El presente documento sintetiza los resultados más relevantes hasta el momento obtenidos.

- ESTUDIOS GEOFÍSICOS

Se utilizaron métodos de exploración indirecta para conocer la respuesta del subsuelo ante diferentes propiedades físicas, con ello determinar el número de capas que conforman el subsuelo, espesores y su correlación litológica, estos estudios son comúnmente usados para el reconocimiento de estructuras asociadas a socavones (Boualla *et. al.*, 2021; Verdet *et. al.*, 2020). De este modo, la investigación contempló realizar Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), Tendido de Refracción Sísmica (TRS) y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

-Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

El arreglo dipolo-dipolo para el levantamiento de secciones eléctricas consiste en introducir corriente eléctrica al terreno mediante un par de electrodos, separados una distancia “A”, que normalmente son dos varillas de acero inoxidable y medir la tensión (voltaje o diferencia de potencial), entre otros dos electrodos a una distancia “R”. Se realizaron 4 líneas con una longitud total de 1,000 metros obteniendo un modelo en 2D que nos dio la profundidad de la zona de interés y con ello identificamos grietas, hundimientos, fracturas y oquedades en un área de 21,888 km² teniendo como centroide del polígono el socavón (Fig.1).

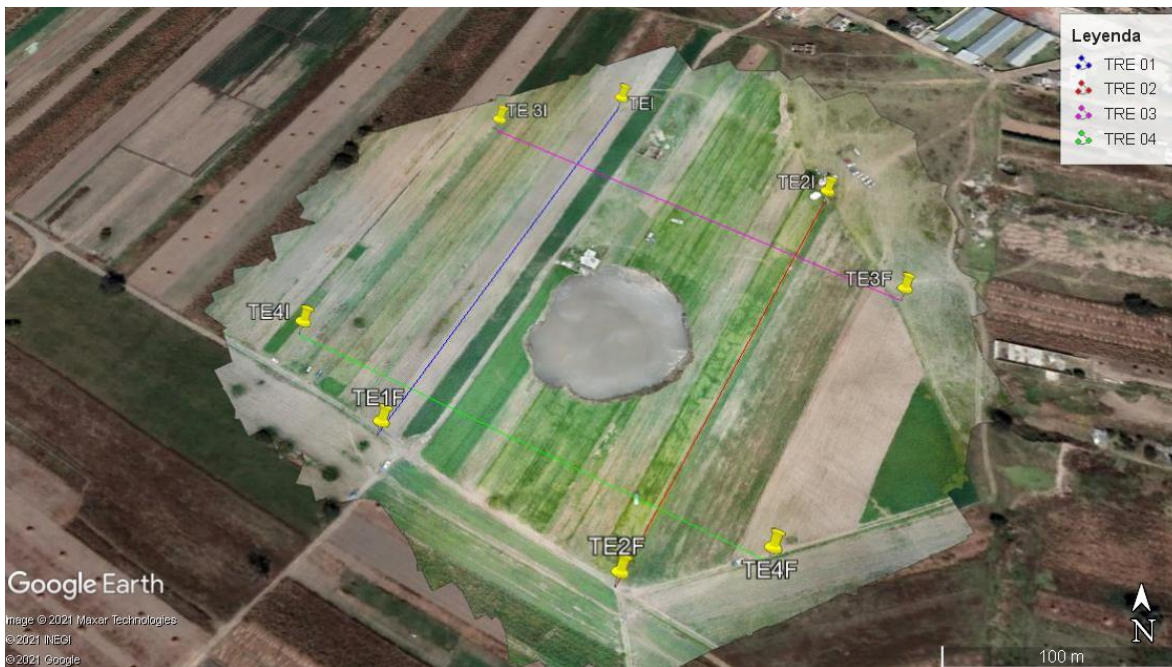


Fig. 1 Tendidos de Tomografía de Resistividad Eléctrica.

Tras el procesamiento y análisis de la información obtenida en campo a través de Tomografías de Resistividad Eléctrica fueron identificados en general tres unidades geoelectricas, las cuales caracterizan geológicamente el área de estudio, dichas capas se describen de manera breve a continuación.

Las unidades y materiales encontrados corresponden a la edad del cuaternario y neógeno principalmente de brechas volcánicas y depósitos piroclásticos. En la parte superficial, se tienen depósitos que son intercalaciones entre arenas, arcillas y limos.

U1: Se presenta como la superficie del predio en su gran mayoría con una profundidad máxima de 20 metros, los valores de resistividad que presenta esta unidad se asocian a materiales como arenas limo arcillosas. Tiene valores desde 50 ohm-m hasta 200 ohm-m.

U2: Se encuentra subyacente de la U1, con valores de resistividad de 10 ohm-m a 50 ohm-m, presentando características de material arenas limosas saturadas de agua por su baja resistividad. Con un espesor máximo de 33 metros, se presentaron también lentes de arena confinados en esta unidad.

U3: Se encuentra subyaciendo la unidad U2, con valores resistivos desde 50 ohm-m hasta 200 ohm-m con un espesor indefinido ya que continúa a profundidad, la cual está asociada a materiales de brecha volcánica.

Con lo anterior, la interpretación de las tomografías se encontraron varias anomalías dentro de la U1 asociándolas a suelo seco en su mayoría o agrietamientos superficiales. Se validó que las anomalías del perfil geoelectrico 1 se asocia directamente a los agrietamientos y desprendimientos que hasta la fecha continúan, a 86m de distancia desde el centro del socavón en dirección NE, se observó en la U2 lentes de arena saturados de agua, los cuales son visibles en el socavón expuestos a erosión por agua y aire (Fig2).

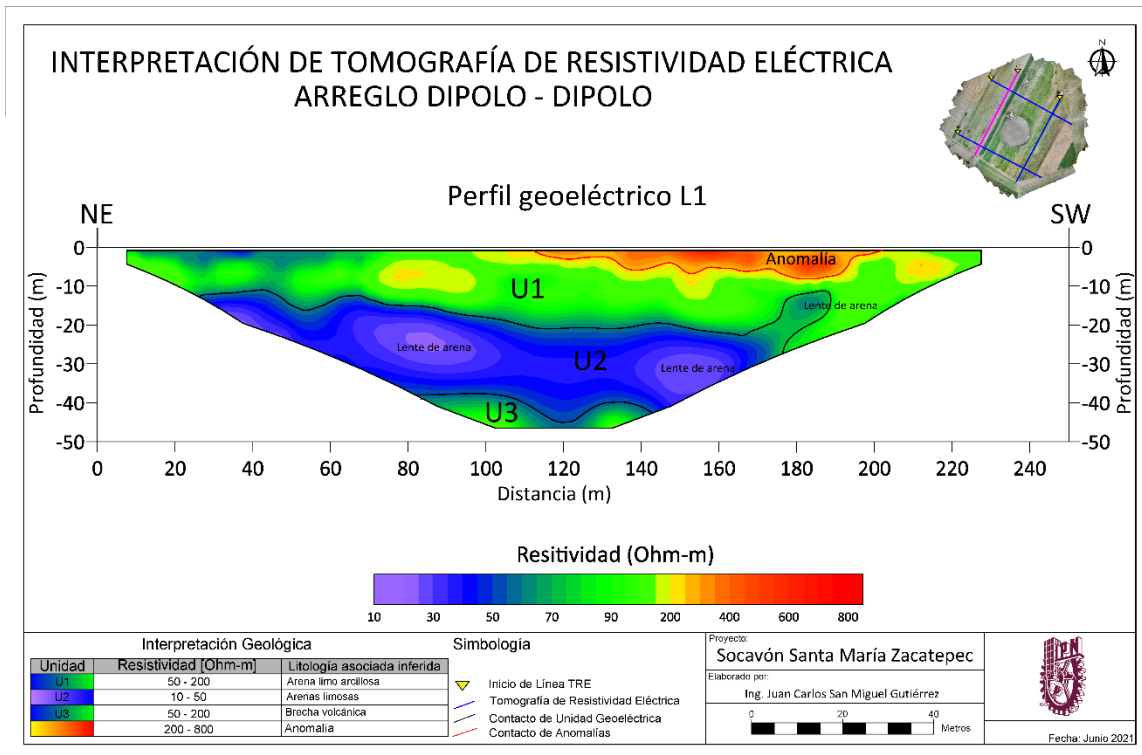


Fig. 2 Tomografía de Resistividad Eléctrica Perfil 1.

-Tendido de Refracción Sísmica (TRS)

El método sísmico se fundamenta en las trayectorias de tiempo mínimo que emplean las ondas elásticas en propagarse desde la superficie hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo. Se realizaron 8 tendidos de refracción sísmica distribuidos en 4 líneas a lo largo de la zona de estudio con la finalidad de proporcionar los módulos elásticos.

De acuerdo con el método de Tendido de refracción sísmica (TRS) se identificaron tres unidades, se tienen depósitos que son intercalaciones entre arenas, arcillas y limos, hasta encontrarse con brechas volcánicas (Fig.3).

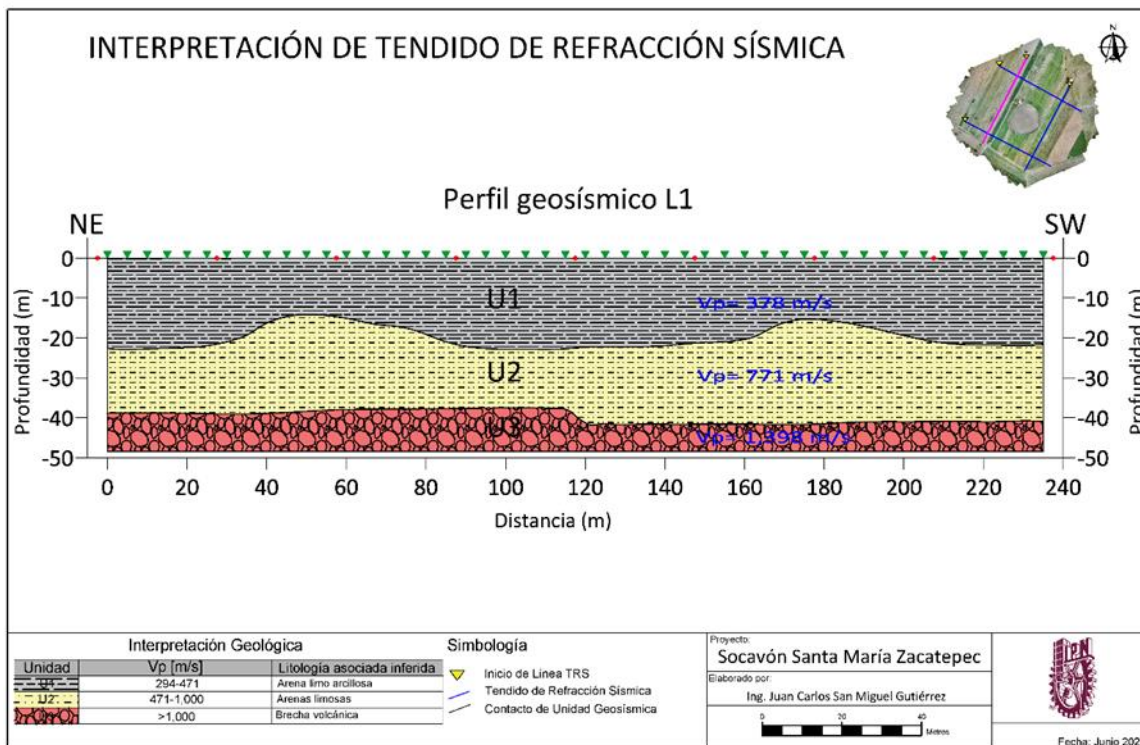


Fig. 3 Tendido de Refracción Sísmica con interpretación geológica Perfil 1.

U1: Se encuentra principalmente material asociado a arenas limo arcillosas, con velocidades de onda P que varían de los 249 a los 471 m/s y con un espesor promedio de 15 metros.

U2: Subyaciendo a la U1, se encuentra material asociado a arenas limosas, con velocidades de onda P que varían de los 471 a los 1000 m/s con espesores que van de los 15 y hasta los 30 metros. En el perfil 2, se logró visualizar un espesor menor teniendo como máximo los 15 metros.

U3: Se ilustra en la parte inferior de los perfiles, se asocia esta unidad a brecha volcánica con velocidades de onda P mayores a los 1000 m/s con espesor promedio que va de los 5 a 10 metros en los perfiles 1, 3 y 4. En el perfil 2 se logró obtener un mayor espesor fluctuando de los 23 a los 25 metros, geológicamente hablando posiblemente esta unidad está aflorando en dirección Este del predio.

-Sondeo Eléctrico Vertical

Teniendo el principio de la resistividad eléctrica como parámetro para diferenciar los materiales que se encuentran a profundidad, se llevó a cabo el levantamiento de nueve sondeos con la finalidad de determinar la distribución vertical a partir de las resistividades del terreno en un solo punto y que de manera conjunta con los otros sondeos se realizó una correlación horizontal para conocer la distribución de las capas depositadas.



Fig. 4 Arreglo radial de los SEVs.

De manera general, este método crea un campo eléctrico mediante la inyección de corriente en el terreno a través de dos electrodos (electrodos de corriente), y estudiar este campo con el uso de otros dos electrodos (electrodos de potencial). Cada uno de estos electrodos debe tener una configuración para obtener el detalle y profundidad adecuada para el caso de estudio.



A partir del análisis de la situación del socavón se diseñó un arreglo cuasi radial para la ejecución de nueve SEV (Fig.4) cubriendo un área de 114,948 m², determinado los diferentes depósitos, comenzando por la última capa compuesta por suelo (tierra de cultivo).seguidamente de materiales arcillosos, limosos y arenosos a diversas profundidades.

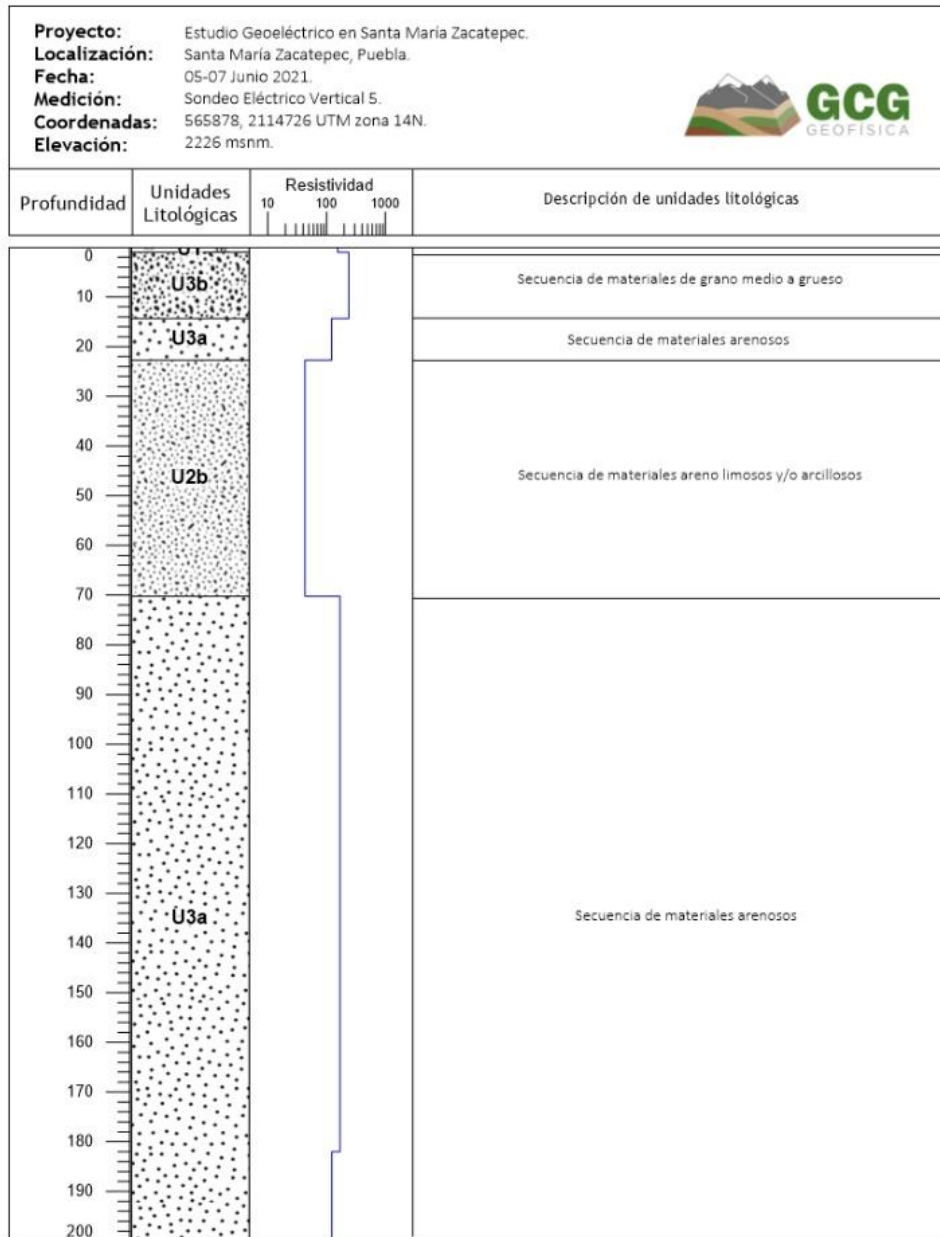


Fig. 5 Sondeo Eléctrico Vertical no. 5 ejecutado a 165 metros al sur del socavón.

Como se puede observar en la imagen del SEV-5 (Fig.5), ejecutado a 165 metros al sur de la zona de interés, se identificaron cinco resistividades asociadas a diferentes depósitos, teniendo la primera capa con un espesor de 0.5 metros compuesta de suelo o materia orgánica, posteriormente se observa un depósito de arenas gruesas con un espesor de 14.5 metros, subyacente a este depósito se observa una capa con un grosor de 8 metros de arenas finas, consecutivamente se tiene un estrato de 48 metros de espesor compuesto de arenas con presencia de limos y arcillas, y finalmente se tiene la última capa con el mayor espesor siendo este de 130 metros compuesto por material arenoso.

Con la integración de los SEVs se realizó un análisis y evaluación de los estratos, haciendo una correlación de éstos, a fin de conocer de manera general la geometría de las unidades litoestratigráficas, así como, valorar su posición en el tiempo.

Con las secciones litoestratigráficas realizadas se ejecutó el modelo 3D (ver figura 6) con el objetivo de conocer la dimensión y distribución de cada una de las capas que conforman el terreno a profundidad, y en conjunto con la tomografía eléctrica se definió el estrato de interés, estando a una profundidad que va de los 20 a los 40 metros, ya que como se menciona en párrafos anteriores esta zona tiene un alto grado de saturación de fluidos.

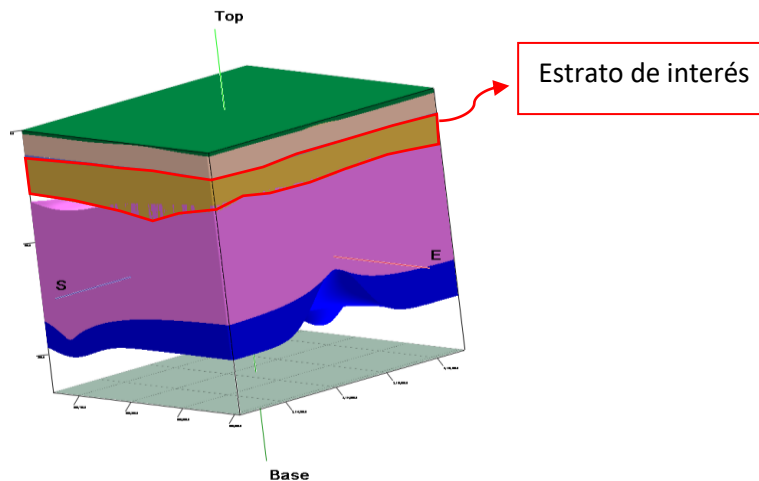


Fig. 6. Modelo 3D, mostrando la distribución y geometría de los depósitos.

Como se observa en la figura 6, el estrato de interés se muestra en tono amarillo, mostrando su distribución y geometría irregular en la zona de interés.

Es importante destacar que esta clasificación de materiales quedará sujeta a cambios, ya que esta información será complementada con los sondeos de mecánica de suelos.

- ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA.

La microcuenca que alberga el área donde ocurrió el socavón cuenta con una elevación máxima de 2,656 m y una pendiente media de 2.56%.

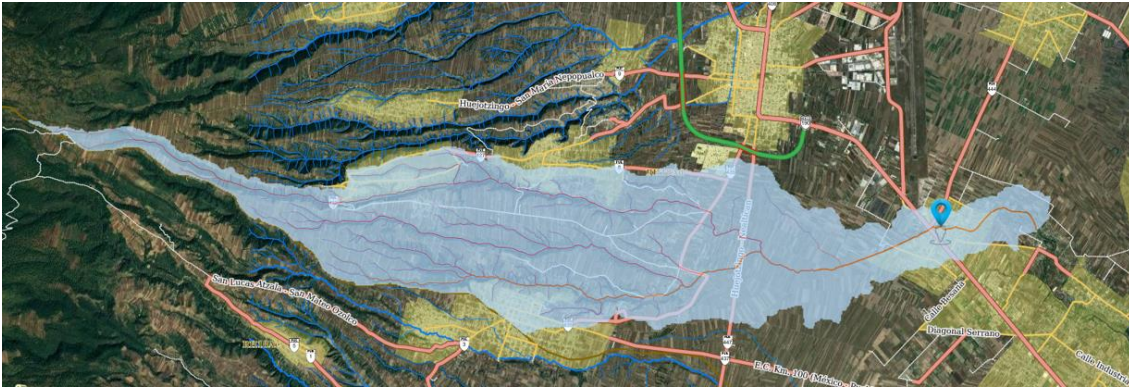


Fig. 7. Microcuenca del área de estudio

El área de Juan C. Bonilla se encuentra albergando 47 pozos registrados ante el REPDA (Fig.8) bajo los usos agrícolas, urbano e industriales, siendo el primero al que, según esta base de datos, corresponde el 79% de la extracción reportada en este sistema. Sin embargo, el trabajo de campo permitió identificar que los pozos en operación en la zona son muchos más de los registrados en esta plataforma. La zona en la que se encuentra el socavón presenta un pozo tipo noria por cada casa, extrayendo un volumen y usos que no están cuantificados.



Fig. 8 Extracción (parcial) de agua en Juan C. Bonilla

De acuerdo con los resultados obtenidos en los estudios de geofísica, el acuífero superior es de tipo libre y con base en los datos de campo, recuperados desde los usuarios del agua con pozo propio, para el 2005 su profundidad se encontraba entre los 11 y 12 metros de

Calle 30 de junio de 1520 s/n Colonia Barrio la Laguna Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero 11
C.P. 07340, Ciudad de México. Teléfono: 57296000 Extensiones: 52711 y 52735

www.ciemad.ipn.mx

Certificado SGC ISO 9001:2008 No. FS605397



profundidad, sin embargo, el nivel ha descendido 8 metros en los últimos 15 años quedando el nivel estático a los 18-19 metros de profundidad actualmente. Los 8 metros de esta formación que ha perdido la zona saturada, los gana la zona de aireación quedando con quedades debido al arrastre de sedimento que provocan los conos de abatimiento generados por los pozos de explotación y los flujos concéntricos en ellos. Investigaciones científicas reportan importantes conos de abatimiento y un balance negativo en este acuífero desde 2005 (Morales-Hernández *et. al.*, 2015; Salcedo Sánchez *et. al.*, 2017). Es necesario generar datos sobre los actuales niveles piezométricos del acuífero para determinar y cuantificar el descenso del nivel del agua.

El espesor de la zona de aireación estaba conformado por una formación Areno-limo-arcillosa con un espesor aproximado de 12 metros. Enseguida se presenta un potente espesor de 26 metros de arenas gruesas de permeabilidad y transmisividad altas. En este aspecto es el mejor espesor para explotar el acuífero libre. Cerca del socavón se ubican al menos 5 pozos de bombeo que extrae agua para diversos usos. Los pozos que explotan el acuífero libre generalmente extraen agua del espesor de arenas gruesas (por ser el más permeable y transmisivo) cuyas bombas seguramente se ubican en la parte inferior de esta formación, es decir, a una profundidad aproximada de los 40 a los 50 metros.

-Climatología

La climatología de la lluvia para el mes de mayo durante el periodo comprendido de 1992 al 2021 indica un valor promedio de 80 mm para la región de Santa María, Zacatepec en el estado de Puebla. Los datos son provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y concentrados en una base de datos interpolada (Malla SIG Ver. 2020), y con una resolución de 10 km².

La media resultante para la zona de estudio fue de 80mm. Los datos se analizaron desde 1992 al 2021. Los resultados muestran que durante los últimos 3 años previos al año 2021 estuvieron por debajo de la media de los últimos 30 años como se muestra en la Tabla 1. Esto es provocado en la recurrencia de 3, 4 y 5 años de la recurrencia del fenómeno del Niño y La Niña, el cual es un problema de variabilidad climática.

El año 2021 fue el tercer año con más lluvia durante los últimos 30 años con un incremento del 83% arriba de la media climática en la población de Santa María Zacatepec en el Municipio de Juan C. Bonilla. Las condiciones del problema de variabilidad climática se consideran normales y solo se puede mencionar que las intensas lluvias ocurridas en el mes de mayo del 2021 estuvieron asociadas por la presencia de una baja presión en la zona centro del país.

Tabla 1. Climatología de lluvia en Santa María, Zacatepec: 80 mm para los meses de mayo.

AÑO	LLUVIA (mm)	ANOMALIA
2021	147	83% arriba de la media
2020	68	15% debajo de la media
2019	52	35% debajo de la media
2018	72	10% debajo de la media

- ESTUDIOS DE HIDROGEOQUÍMICA

La investigación contempló realizar hidrogeoquímica de 64 elementos para caracterizar fisicoquímica y elementalmente la composición del agua presente dentro del socavón. A la vez, se caracterizarían dos pozos de uso agrícola cercanos al evento, instrumentados a diferentes profundidades, de este modo poder establecer una relación entre el agua de las unidades acuíferas con la recuperada en el socavón.

Los pozos fueron seleccionados por su cercanía con el socavón, y representar un pozo superficial PC (Pozo Calpurravia, 80 metros) y PT (Pozo Tlali, 180 metros), para de esta manera caracterizar el agua de acuerdo con la reserva que se encuentra explotando (Fig.9).

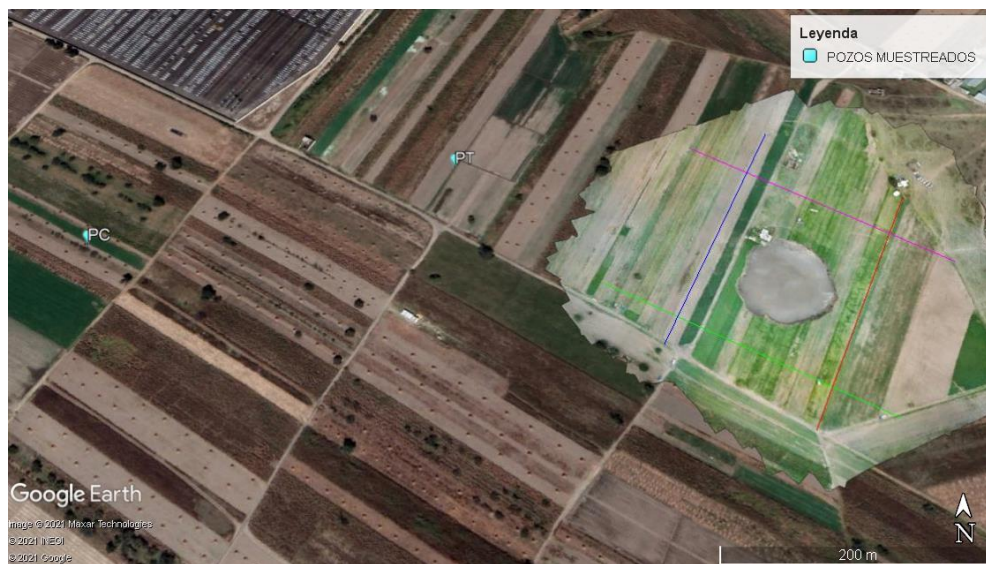


Fig. 9 Pozos muestreados.

Los parámetros fisicoquímicos fueron determinados *in situ* con el equipo Spectrolyser con tecnología de principio óptico y corroborado con equipos multiparamétricos de la Marca Hach, midiendo en campo pH, Temperatura, Conductividad, Turbidez, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno DQO filtrado.



Debido a que el análisis químico realizado en el laboratorio certificado internacional ActLabs, ubicado en Canadá toma 3 semanas para la entrega de resultados, aún no se cuenta con los datos. A continuación, se presentan los resultados fisicoquímicos más importantes obtenidos desde dos muestras recuperadas del socavón a distintas horas, establecido así para determinar si existía un flujo particular dentro de la estructura, y dos pozos de la región (Fig.8).

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos muestras socavón y pozos agrícolas.

MUESTRA	DBOeq filtrado (mg/L)	DQOeq filtrado (mg/L)	Conductividad ($\mu\text{s/cm}$)	T °C
SOCAVON 1	1.01	1.08	401	22.4
SOCAVON 2	0.91	1	403	22.8
POZO TLALI	1.01	1.05	409	15.9
POZO CALPURRAVIA	0.91	0.93	409	15.48

Los resultados de las muestras reflejaron una gran consistencia entre los pozos y el agua dentro del socavón, por lo que se puede presumir que el agua encontrada en la formación corresponde al volumen del nivel freático de la zona. La temperatura del agua $>28^{\circ}\text{C}$ descarta su relación con el agua sulfurosa del Municipio de Puebla y los bajos valores de conductividad descartan su procedencia con aguas de la unidad acuífera profunda o contacto con rocas carbonatadas (Rodríguez-Espinosa P.F. *et al.*,2020). Por otro lado, los valores de DQO y DBO equivalentes, estuvieron dentro de los rangos declarados para agua prístina y apta para el consumo humano (Gawle, *et al.*, 2021; A.P.A.H). La determinación hidrogeoquímica de agua será finalizada al arribo de los resultados de laboratorio.

- **DESARROLLO DE LA HIPÓTESIS**

El fenómeno de naturaleza acumulativa en el tiempo se explica desde el flujo de agua subterráneo modificado por las actividades humanas, el cual, al tener múltiples pozos en explotación, genera que las líneas de flujo en cada pozo sean concéntricas hacia ellos (Fig.10) y generan gradientes hidráulicos significativos, de manera que se crea un flujo que erosiona materiales más finos sobre todo en la parte superior del acuífero (donde se localiza las arenas-limoso-arcillosas). Este proceso en las arenas por sí solo se conoce como lixiviación de arenas, donde los sedimentos pierden sus partículas más finas por el lavado

de éstas, las condiciones de drenaje y la compresibilidad de la arena favorece la erosión, también pudiéndose tratar de un proceso de licuación (Youssef *et. al.*,2016; Bastola *et. al.*, 2021) y creación de poros que al vaciarse el agua este espacio es sustituido por aire, creando espacios individuales que posteriormente al incrementarse el porcentaje de finos perdidos, comienzan a interconectarse.

Con el tiempo esta erosión se continúa generando en la parte superior, aunado a la excesiva explotación del recurso hídrico subterráneo que provoca el abatimiento del nivel freático.

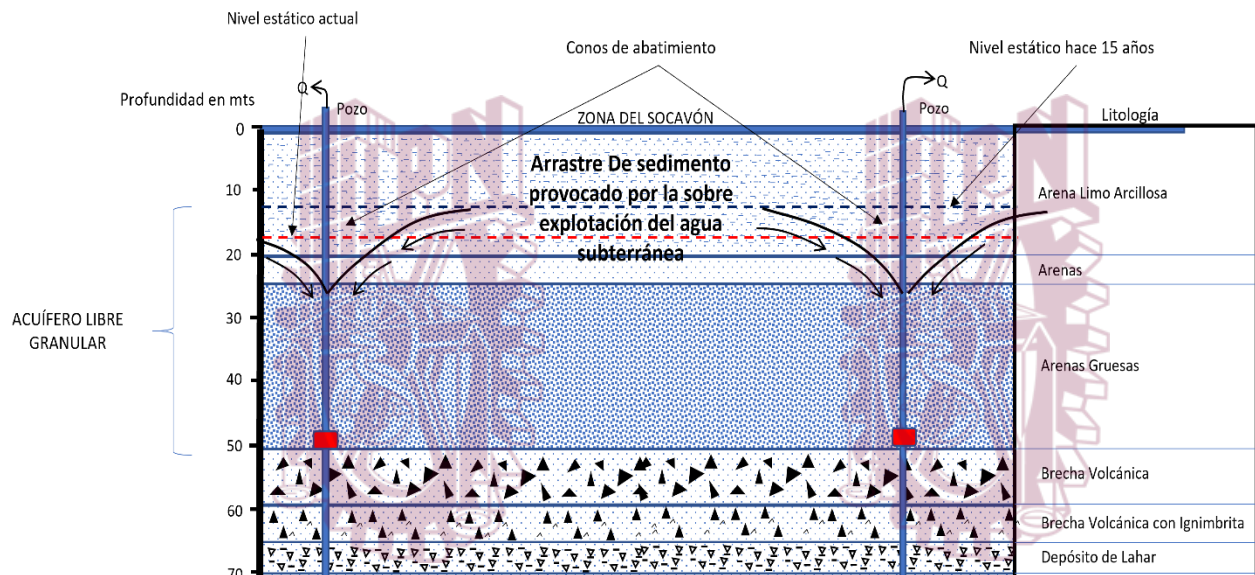


Fig. 10 Modelo parcial del efecto de la extracción en los flujos del agua y la remoción de sedimentos finos

Los 8 metros de esta formación que ha perdido la zona saturada, los gana la zona de aireación quedando con oquedades debido al arrastre de sedimento que provocan los conos de abatimiento generados por los pozos de explotación y los flujos concéntricos en ellos. Al tener un alto porcentaje de poros vacíos, la unidad no resiste la carga de sedimentos en su techo y colapsa.



- **CONCLUSIONES**

El fenómeno fue originado por la combinación de condiciones de susceptibilidad erosiva en el subsuelo, de eventos hidrometeorológicos no observados en los últimos tres años, flujos subterráneos naturales por gradiente hidráulico e inducidos por el intenso aprovechamiento del agua subterránea observada desde hace 15 años en la zona de Santa María Zacatepec, Puebla, México. Las actividades humanas, que aceleran la erosión de los suelos y la pérdida de agua de recarga por la deforestación para el crecimiento urbano y áreas para la agricultura, el intenso ritmo de extracción del agua, así como los elementos climáticos como las lluvias por encima de la media acontecidas durante 2021, que propiciaron junto con la extracción antrópica, el lavado de sedimentos finos, que al perderse generaron inestabilidad en la columna de sedimentos, la acumulación de estos procesos durante un largo periodo de tiempo, ocasionó que el suelo llegará a su límite de resistencia, y se generará el colapso.

Los estudios geofísicos determinaron que no existe presencia de una falla o fractura significativa a los 50 m en el subsuelo del área. A la vez se determinó que la U2 de 20 a 40m presenta arenas limo-arcillosas saturadas de agua, donde pueden estar ocurriendo los procesos de licuefacción por la naturaleza del tamaño de granos del sedimento, considerándose esta capa la unidad crítica donde se originó el colapso. La línea 2 de TRE determinaron que la porción NW-SE del área, al presentar espesores débiles de la U2 y tener un espesor de la unidad U3, considerada la más estable, representa el área menos propensa a colapsar. Sin embargo, las anomalías de alta resistividad encontradas en la línea 1 de TRE, son asociadas a posibles desprendimientos o agrietamientos del subsuelo, teniendo como evidencia los eventos que han ocurrido durante el periodo de la toma de datos hasta la fecha; es necesario resaltar que estas deducciones obedecen a estimaciones con lo reflejado por las características del subsuelo, sin embargo al involucrarse varios factores en los desprendimientos no hay una cuantificación exacta de dónde y cuánto va a expandirse este evento.

Las oquedades producidas en las zonas de aireación ocasionaron un colapso en el cual el techo se derrumba formando una figura elíptica o cuasi circular. La erosión provocada por la lluvia afecta en toda la zona y marca un patrón circular en la periferia del socavón por los escurrimientos que se dirigen hacia el centro. Esta erosión es similar en todos los puntos de la circunferencia del socavón; ya que el material es homogéneo. Si se tuvieran materiales heterogéneos, la figura del socavón tomaría patrones irregulares, como lo está haciendo en torno a la casa. De igual forma los procesos erosivos en las fisuras que recientemente aparecieron en las paredes del socavón podrían estar modificando la forma circular.

Los parámetros físicoquímicos medidos en el agua del socavón determinaron que esta agua no procede desde drenaje urbano o descargas residuales. Del mismo modo, se descarta, que



sean aguas sulfurosas. El origen del agua procede desde los estratos saturados de agua. Por el momento, se presume que esta agua esté circulando según el patrón del flujo subterráneo modificado por los pozos en operación. Así mismo, esta circulación sería el proceso mediante el cual, los sedimentos removidos durante el colapso se encuentran migrando a través de la circulación del agua bombeada hacia los pozos de la zona.

Es necesario ampliar el polígono de estudio para conocer las condiciones del resto del área y poder determinar la susceptibilidad del área limítrofe al socavón. De acuerdo con los resultados obtenidos, se propone que esta ampliación abarque un área mínima de 110 hectáreas, en dirección NW en dirección al parque industrial y cubriendo las casas localizadas al NE del área. Si bien el desprendimiento de bloques ha reducido su velocidad a casi ser nula durante los últimos días, el área se considera inestable y el perímetro de seguridad debe continuar como hasta ahora.

De manera general, hasta el momento no se encuentra con registro de otro evento de la misma naturaleza en el área, sin embargo, dado que los elementos estructurales, litológicos y geohidrológicos de la zona se comparten con los municipios vecinos, se recomienda el constante monitoreo, y pronta acción en la prevención del desastre, actualizando los atlas de riesgo y planes de desarrollo urbano con resultados de estudios profundos y precisos. De igual forma, es una prioridad para los municipios abastecidos por el Acuífero del Valle de Puebla generar y actualizar los datos geohidrológicos, lo que permitirá tener un conocimiento real del volumen disponible y así hacer las adecuaciones necesarias para su manejo y gestión sostenible.

Referencias:

- American Public Health Association: A.P.H.A. 2005. E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eton (Eds.), Standard Methods for the Examinations of Water and Waste Water (23rd ed.), AWWA –WEF, USA, pp. 29-179
- Ashish Bastola, Xiaoqiang Gu, Kangle Zuo. 2021. Numerical investigations on liquefaction potential of saturated silty sands. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 147, 106799, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106799>.
- Othmane Boualla, Ahmed Fadili, Saliha Najib, Khalid Mehdi, Abdelhadi Makan, Bendahhou Zourarah. 2021. Assessment of collapse dolines occurrence using electrical resistivity tomography: Case study of Moul El Bergui area, Western Morocco. Journal of Applied Geophysics, 191, 104366, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104366>
- Martínez Morales, Manuel; Salcedo Sánchez, Edith R.; Garrido Hoyos, Sofía E.; Esteller, Ma. Vicenta. 2015. Simulación de diferentes alternativas de gestión de los



recursos hídricos del acuífero de Puebla-Atoyac. Ingeniería, vol. 19, núm. 1, 2015, pp. 62-72

- Sukirtee Gawle, Krishna Pateria, R.P. Mishra. 2005. Physico-chemical analysis of groundwater during monsoon and winter season of Dindori district, India. Groundwater for Sustainable Development, 12, 100550, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100550>.
- P.F. Rodríguez-Espinosa, Chidambaram Sabarathinam, K.M. Ochoa-Guerrero, E. Martínez-Tavera, Banajarani Panda. 2020. Geochemical evolution and Boron sources of the groundwater affected by urban and volcanic activities of Puebla Valley, south central Mexico. Journal of Hydrology, 584, 124613, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124613>.
- Edith R. Salcedo Sánchez, Sofía E. Garrido Hoyos, Ma. Vicenta Esteller, Manuel Martínez Morales, Ariadna Ocampo Astudillo. 2017. Hydrogeochemistry and water-rock interactions in the urban area of Puebla Valley aquifer (Mexico). Journal of Geochemical Exploration, 181, 219-235, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.016>.
- Cécile Verdet, Colette Sirieix, Antoine Marache, Joëlle Riss, Jean-Christophe Portais. 2020. Detection of undercover karst features by geophysics (ERT) Lascaux cave Hill. Geomorphology, 360, 107177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107177>.
- Youssef, A.M., Al-Harbi, H.M., Gutiérrez, F. *et al.* Natural and human-induced sinkhole hazards in Saudi Arabia: distribution, investigation, causes and impacts. *Hydrogeol J* 24, 625–644 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1336-0>

ATENTAMENTE
“La Técnica al Servicio de la Patria”

Dr. Pedro Francisco Rodríguez Espinosa
Grupo de Estudios Geoambientales y Calidad del Agua
Departamento de Ingeniería y Biociencias
CIEMAD IPN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
CIEMAD - IPN

