

Estudios de resistividad eléctrica en la calle Basilio Badillo (-105.2334°, 20.6028°) Puerto Vallarta, Jalisco

Christian R. Escudero¹, Araceli Zamora Camacho¹, Mario A. Fuentes Arrezola¹
Alejandro Ramírez Gaytán²

¹ Departamento de Ciencias Exactas, CUCOSTA, Universidad de Guadalajara, Puerto Vallarta, Jalisco, México

² Departamento de Ciencias Computacionales, CUCEI, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México

Resumen: La subsidencia en zonas urbanas, como en la calle Basilio Badillo, en Puerto Vallarta, representa un riesgo para la infraestructura y la seguridad pública, con causas no evidentes y hundimientos recurrentes sin un origen claro. Este estudio buscó determinar si el hundimiento se debe a cavidades subterráneas o a mecanismos como la consolidación diferencial del suelo. Se realizó tomografía de resistividad eléctrica con cuatro transectos lineales dipolo-dipolo, cuyos datos se invirtieron para crear un modelo tridimensional del subsuelo. El modelo mostró una anomalía de baja resistividad (40 ohm-m) en el centro de la calle, coincidente con el hundimiento. Contrasta con valores típicos de cavidades (1,000–3,000 ohm-m) y está en rango para suelos saturados o con compactación heterogénea. Se concluye que la subsidencia se debe a consolidación y compactación diferencial, no a oquedades, por variaciones en humedad y propiedades mecánicas.

Palabras clave: Tomografía de resistividad eléctrica (ERT), Subsidencia urbana, Peligro geotécnico, Compactación diferencial del suelo, Estudios geofísicos no destructivos.

1. Introducción

El hundimiento de calles en zonas urbanas representa un desafío complejo y costoso para la integridad de la infraestructura y la seguridad pública. Este fenómeno, que a menudo se manifiesta como socavones repentinos o depresiones graduales del pavimento, suele ser el resultado de la interacción entre las condiciones naturales del suelo y factores antropogénicos. Las causas comunes incluyen la erosión o consolidación del suelo, fugas en tuberías de servicios públicos antiguas, material de relleno mal compactado y la presencia de huecos naturales o artificiales. Diagnosticar el mecanismo subyacente específico es crucial, ya que una remediación eficaz depende de distinguir con precisión entre causas como cavidades clandestinas, asentamientos diferenciales o fluctuaciones en las aguas subterráneas. Por lo tanto, la investigación proactiva del subsuelo es esencial para la gestión urbana sostenible y la mitigación de riesgos.

A lo largo de las últimas décadas, la tomografía de resistividad eléctrica (ERT) se ha consolidado como un método geofísico no destructivo y rentable para la caracterización del subsuelo en numerosos campos de la ingeniería y el medio ambiente [1, 2]. Históricamente, su aplicación se centró en la exploración de aguas subterráneas y de recursos minerales; sin embargo, su uso se ha extendido progresivamente al diagnóstico de infraestructuras civiles. En el contexto específico

de las vías terrestres, la ERT ha demostrado ser una herramienta valiosa para detectar cavidades, suelos de baja competencia, zonas saturadas y materiales meteorizados que comprometen la capacidad portante de la subrasante [3, 4]. Diversos estudios han establecido que los tramos de carretera con valores de resistividad bajos (inferiores a 100 ohm-m) en los primeros metros de profundidad suelen estar asociados a arcillas saturadas o suelos muy meteorizados, los cuales se correlacionan con manifestaciones superficiales como fisuras, bacheo y pérdida recurrente de soporte [5-7]. La eficacia de la ERT también se ha confirmado en la localización de cavidades bajo pavimentos, tanto rígidos como flexibles, y su integración con sondeos geotécnicos (SPT) y otros métodos geofísicos complementarios ha permitido optimizar los diseños de excavación, los sistemas de drenaje y la sustitución de materiales incompetentes [3, 4, 8]. Si bien el acoplamiento de electrodos en superficies asfálticas presenta desafíos particulares, las adaptaciones metodológicas desarrolladas han consolidado la ERT como una herramienta de gran valor para la rehabilitación sostenible de infraestructuras viales.

Una problemática en particular son las condiciones del subsuelo y la causa del hundimiento superficial recurrente a lo largo de la calle Basilio Badillo en Puerto Vallarta (Fig. 1). Si bien otras vialidades de la zona presentan problemas similares de deterioro del pavimento, estos se manifiestan en menor medida y con menor frecuencia. En contraste, la calle Basilio Badillo presenta un hundimiento progresivo y localizado que ha requerido reparaciones reiteradas, sin que se haya identificado una causa definitiva. Los informes locales y la evidencia fotográfica confirman el deterioro continuo del pavimento en esta zona. Los residentes han especulado sobre la presencia de tuberías de agua o de cavidades no registradas, pero no existen registros fiables del subsuelo. En consecuencia, se desconoce el mecanismo geotécnico preciso que provoca la subsidencia observada.

Dado el impacto en la seguridad vial y la infraestructura urbana, las autoridades de la Coordinación Municipal de Protección Civil y Bomberos de Puerto Vallarta solicitaron una evaluación técnica del sitio para orientar posibles medidas de remediación. Este estudio busca determinar el origen de la subsidencia en la calle Basilio Badillo mediante la caracterización de la estructura de resistividad del subsuelo; específicamente, si el hundimiento se debe a cavidades de aire, como suele sospecharse, o a mecanismos alternativos, como variaciones en la consolidación y compactación del suelo. Para abordar esta cuestión se utilizó la tomografía de resistividad eléctrica (ERT). El modelo de resistividad estimado se analizó para identificar e interpretar anomalías de resistividad en el contexto tanto del patrón de subsidencia superficial como de los valores de resistividad establecidos para los geomateriales esperados.



Figura 1. a) Vista al oeste de la calle Basilio Badillo en el área de estudio. b) Imágenes de fracturas con signos de hundimiento en la superficie de la calle.

2. Área de estudio

El sitio de estudio se ubica a lo largo de la calle Basilio Badillo (-105.2334° , 20.6028°), en la zona sur de Puerto Vallarta, México (Fig. 2). La geología del subsuelo del área se caracteriza por un lecho rocoso de toba reolítica del período Cretácico, clasificado como KsTpaTR [9]. Desde una perspectiva geotécnica, los suelos suprayacentes se clasifican como Clase de Sitio D [10], con un rango de velocidad de onda de corte de 360 a 760 m/s y un período de vibración fundamental inferior a 0.4 segundos [11].

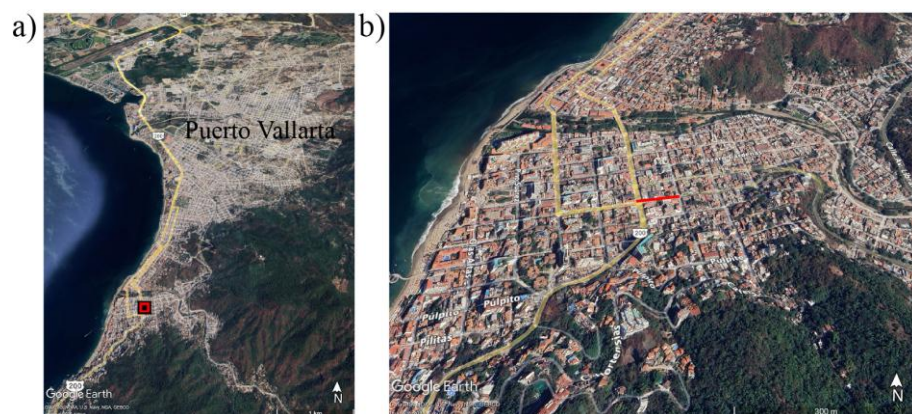


Figura 2. Ubicación del área de estudio. a) Vista hacia el norte de Puerto Vallarta. b) Zona Centro de Puerto Vallarta. El cuadro y la línea rojos indican la ubicación del área de estudio.

Para caracterizar mejor las condiciones cercanas a la superficie, se consideró un estudio de exploración y muestreo de suelos mediante la Prueba de Penetración Estándar (SPT) a una profundidad de 15 metros (Fig. 3), lo que proporcionó muestras de suelo perturbado representativas de la estratigrafía observada.

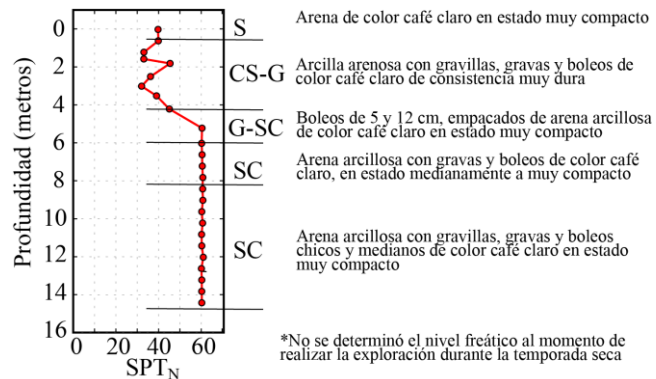


Figura 3. Composición estratificada del subsuelo. Los códigos corresponden al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos: arena (S), grava (G), y arcilla (C).

3. Metodología: Tomografía de Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca del material que cuantifica su oposición al flujo de corriente eléctrica [1,2]. Esto está controlado por la porosidad, el contenido de humedad, la temperatura, el agua intersticial, la conductividad de los fluidos y la textura del suelo. La tomografía de resistividad eléctrica (ERT, por sus siglas en inglés) es un método geofísico de fuente activa que consiste en inyectar corriente eléctrica en el subsuelo y medir el campo de potencial mediante electrodos en la superficie [1,2]. Mediante el despliegue de múltiples transectos lineales paralelos o intersectantes, se pueden estimar modelos bidimensionales o tridimensionales de resistividad a partir de medidas de resistividad aparente y de su inversión numérica [1,2].

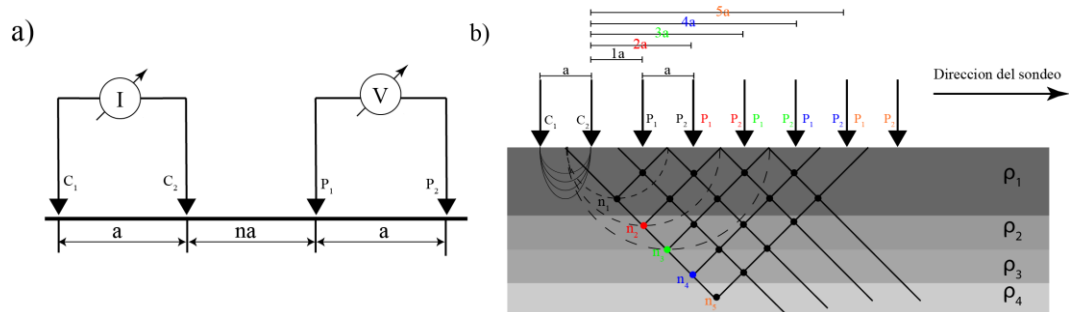


Figura 4. Esquemas del método de resistividad eléctrica empleado. a) Arreglo dipolo-dipolo: muestra dos pares de electrodos en la superficie. El dipolo de corriente (C_1, C_2) inyecta corriente continua en el subsuelo, y el de potencial (P_1, P_2) mide la diferencia de voltaje. La separación entre dipolos (n) y entre electrodos (a) define la geometría. b) Tomografía de resistividad eléctrica (ERT): perfil lineal con múltiples electrodos que registran en secuencia.

En un arreglo dipolo–dipolo (Fig. 4a), tanto la fuente de emisión como, la medida en el receptor se realizan con pares de electrodos (dipolos) separados entre sí, lo que genera una matriz de sensibilidad muy estructurada, particularmente adecuada para resaltar cuerpos pequeños o de geometría compleja y para obtener una elevada resolución lateral de discontinuidades, fallas, cavidades o lentes de arena o arcilla [1,2]. La tomografía de resistividad eléctrica (ERT): se realiza con múltiples electrodos conectados a un resistivímetro (Fig. 4b). Mediante la conmutación automática de diferentes combinaciones de electrodos, se obtiene una imagen pseudosección de resistividades aparentes que, tras inversión numérica, permite reconstruir un modelo bidimensional (o tridimensional) de la distribución real de resistividades del subsuelo.

3.1 Adquisición y análisis de datos

Los datos se adquirieron a lo largo de cuatro transectos de 72 metros en la calle Basilio Badillo, entre la calle Aguacate y la Carretera 200 (-105.2334°, 20.6028°). Se consideró innecesario realizar un levantamiento topográfico debido al escaso relieve. La ubicación de los transectos se muestra en la Figura 5a. Para la recopilación de datos se utilizó un resistivímetro SYSCAL PRO equipado con 24 electrodos conectados mediante cables multinúcleo (Fig. 5b).



Figura 5. a) Ubicación de los transectos y posición de los electrodos. Los transectos #1 y #2 se realizaron paralelos a las aceras norte y sur, respectivamente, mientras que los transectos #3 y #4 cruzan de sur a norte y de norte a sur, respectivamente. b) Resistivímetro utilizado SYSCAL JUNIOR.

Los datos se descargaron y procesaron inicialmente con Prosys II (Iris Instruments®). El modelado se realizó utilizando el programa Res2dinv (Geotomo Software®) mediante su algoritmo de mínimos cuadrados con restricción de suavidad para convertir las mediciones de resistividad aparente en modelos 2D de resistividad del subsuelo. Los parámetros clave de inversión, por ejemplo, el filtro de suavidad y la ponderación horizontal/vertical, se optimizaron automáticamente.

Los perfiles 2D resultantes se interpolaron para generar un modelo 3D para su visualización.

4. Resultados

Se realizó una tomografía de resistividad eléctrica para caracterizar las condiciones del subsuelo a lo largo de la calle Basilio Badillo, entre la calle Aguacate y la Carretera 200 (-105.2334°, 20.6028°) e investigar las posibles causas de la subsidencia observada. La Figura 6 presenta los valores de resistividad en función de la distancia y la profundidad para los cuatro transectos. La Figura 7 muestra una proyección isométrica de los modelos de resistividad, que evidencian su distribución espacial en el área de estudio y su correlación con los datos geotécnicos de un estudio complementario de mecánica de suelos.

Los modelos de resistividad revelan una marcada estructura subterránea de dos capas. Por encima de aproximadamente 8 m de profundidad, las resistividades oscilan entre 40 y 100 ohm-m. Por debajo de esta profundidad, las resistividades disminuyen drásticamente hasta aproximadamente 4 ohm-m, formando una capa continua de baja resistividad a lo largo de los cuatro transectos.

En la zona somera (<8 m de profundidad), se observan variaciones laterales distintivas. Las resistividades más altas, cercanas a 100 ohm-m, se presentan en los extremos del transecto y disminuyen hacia la parte central del área de estudio. Se observa un patrón transversal consistente a lo largo de la calle:

1. Acera norte (línea 1), las resistividades alcanzan hasta 70 ohm-m.
2. Acera sur (línea 2), las resistividades promedian 60 ohm-m.
3. Centro de la calle (líneas 3 y 4), las resistividades son de ~40 ohm-m.

Los valores de resistividad superficial (40-100 ohm-m) se encuentran dentro del rango esperado para los geomateriales identificados en el estudio de mecánica de suelos (Anexo II), específicamente 30-215 ohm-m para la arcilla arenosa y la mezcla de arena y grava. Sin embargo, las resistividades consistentemente bajas (4 ohm-m) observadas a más de 8 m de profundidad son atípicas para las litologías reportadas y sugieren la presencia de materiales o condiciones no captados por la investigación mecánica del suelo.

Los modelos de resistividad muestran una sólida consistencia interna, con una excelente correlación en los puntos de intersección entre transectos (en los vértices de volumen) y tendencias de resistividad vertical coherentes en los cuatro perfiles. Esta consistencia confirma la fiabilidad de los procedimientos de adquisición e inversión de datos.

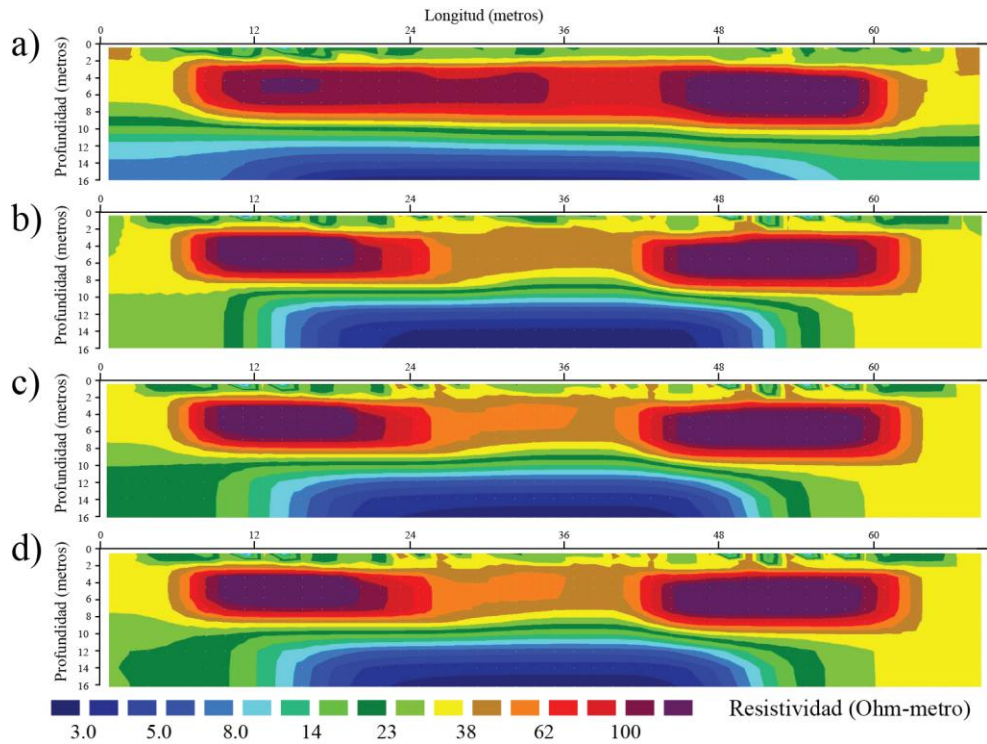


Figura 6. Resistividad en función de la distancia y la profundidad en los cuatro transectos: a) Transecto #1, b) Transecto #2, c) Transecto #3, d) Transecto #4.

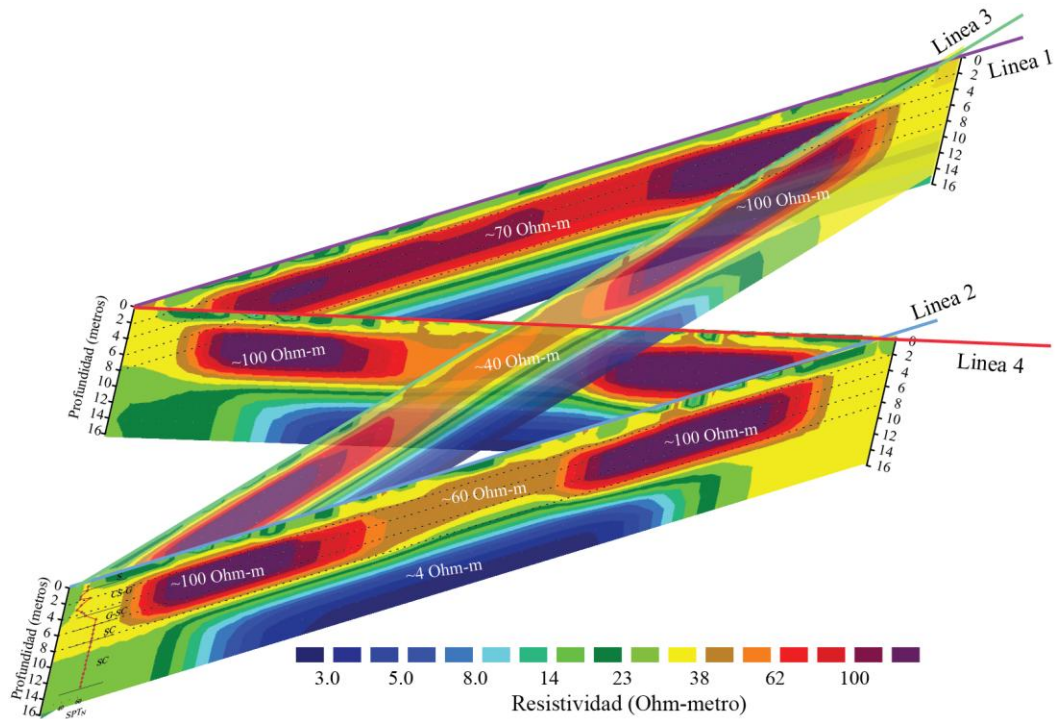


Figura 7. Representación isométrica de estudios de resistividad en el área de estudio.

5. Discusión y conclusiones

La tomografía de resistividad eléctrica delineó con éxito las condiciones del subsuelo a lo largo de la calle Basilio Badillo, lo que proporcionó información crucial sobre la subsidencia observada. El hallazgo más significativo es la anomalía de baja resistividad (aproximadamente 40 ohm-m) centrada en la zona de subsidencia (Fig. 6). Esta anomalía coincide espacialmente con la deformación superficial, lo que sugiere firmemente una relación causal entre las condiciones del subsuelo y el asentamiento observado.

Si bien las resistividades medidas (40-100 ohm-m en la zona somera) se encuentran dentro del rango esperado para los geomateriales reportados, las variaciones laterales revelan una importante heterogeneidad en las propiedades del subsuelo. La disminución sistemática de la resistividad desde los extremos del transecto hacia la zona central, junto con el patrón transversal a lo largo de la calle (acera norte: 70 ohm-m; centro de la calle: 40 ohm-m; acera sur: 60 ohm-m), indica condiciones subsuperficiales no uniformes que se correlacionan con la distribución espacial de la subsidencia superficial.

Estudios previos han reportado resistividades de 1000 a 3000 ohm-m en vacíos llenos de aire en entornos geológicos similares [3]. Las resistividades relativamente bajas observadas en este estudio (máximo 100 ohm-m) descartan la presencia de cavidades llenas de aire significativas o de vacíos abiertos como mecanismo principal de subsidencia. La ausencia de anomalías de alta resistividad sugiere que la subsidencia no se debe al colapso de elementos kársticos subyacentes ni a vacíos de erosión subterránea a gran escala.

La marcada disminución de la resistividad, de 40-100 ohm-m por encima de los 8 m de profundidad a aproximadamente 4 ohm-m por debajo de este límite, es particularmente notable. Dado que el estudio de mecánica de suelos indica continuidad litológica a lo largo de este intervalo de profundidad, el contraste de resistividad no puede atribuirse a cambios en el tipo de suelo. Los valores observados son consistentes con un marcado aumento del contenido de humedad por debajo de 8 m, ya que la resistividad está inversamente relacionada con la saturación de agua en medios porosos. Adicionalmente, la humedad puede deberse a una intrusión salina por la proximidad a la costa. Valores de resistividad del orden de 4 ohm-m son característicos de una unidad arcillosa humedecida con agua salina, incluso en ausencia de un nivel freático reconocible, dado que la salinidad puede distribuirse en la humedad capilar o residual presente en la matriz porosa.

Sin embargo, esta interpretación presenta una aparente contradicción: la investigación de mecánica de suelos no detectó el nivel freático en los 15 m superiores del perfil. Varias hipótesis podrían reconciliar estas observaciones:

1. La capa de baja resistividad podría representar una zona de agua subterránea suspendida o una saturación localizada sobre un acuitardo, que no fue captada por los puntos de muestreo discretos de la investigación geotécnica.
2. El contraste de resistividad podría indicar cambios en la química del fluido intersticial (p. ej., aumento de sólidos disueltos) en lugar de la saturación por sí sola, aunque ello requeriría explicar el origen de dichos fluidos.
3. La presencia de minerales arcillosos conductores, aunque no se reporta en los registros geotécnicos, podría contribuir a las bajas resistividades.

Se realizó un estudio de reconocimiento de las calles circundantes para identificar la posible infraestructura hidráulica que pudiera influir en las condiciones del subsuelo. Se identificó un drenaje pluvial de aproximadamente 2 metros de diámetro en la calle Jacarandas, paralela a la calle Aguacate, que se extiende desde su intersección con Rodolfo Gómez hasta un emisario expuesto y una estructura de disipación de energía en el río Cuale. No se observó evidencia superficial de una conexión lateral con las calles Aguacate o Basilio Badillo. Si bien esta infraestructura no está presente directamente en el área de estudio, confirma la presencia de sistemas de conducción de aguas pluviales en las inmediaciones, que podrían influir en las condiciones locales del agua subterránea o constituir una fuente potencial de fugas en caso de sufrir daños.

Los métodos geofísicos proporcionan mediciones indirectas de las propiedades del subsuelo; las anomalías de resistividad observadas pueden deberse a múltiples factores, como variaciones en el contenido de humedad, compactación diferencial, condiciones de soporte heterogéneas o degradación de los materiales del subsuelo. El confinamiento espacial de la anomalía de baja resistividad en la zona de subsidencia sugiere un proceso localizado, más que fenómenos a escala regional.

Proponemos que el mecanismo más plausible es un fenómeno de entubación (erosión interna) impulsado por la infiltración de agua a través de la superficie del pavimento. El área de estudio está revestida con adoquín cementado, que con el tiempo puede presentar grietas y vías de flujo preferenciales. A diferencia de la infiltración que se produce lateralmente a partir de los bordes del pavimento, el agua que entra a través de grietas superficiales puede quedar atrapada en las capas granulares subyacentes. Bajo la carga de vehículos, esta agua atrapada genera presiones de poro elevadas e induce la migración de partículas finas. La pérdida progresiva de material de soporte conduce al desarrollo de depresiones superficiales y, potencialmente, a la formación de huecos superficiales.

Este mecanismo es consistente con: (1) la correlación espacial entre la anomalía de baja resistividad y el área de subsidencia, (2) los valores de resistividad que sugieren un alto contenido de humedad, (3) la ausencia de vacíos de alta resistividad, y (4) el tipo de pavimento observado y el agrietamiento superficial.

El ERT proporciona una caracterización robusta de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo, pero no identifica directamente las causas de las anomalías observadas. La interpretación que se presenta aquí integra datos geofísicos con información geotécnica limitada y observaciones superficiales. La confirmación del mecanismo propuesto requeriría investigaciones adicionales, incluyendo: exploración directa del subsuelo en la zona anómala, instalación de piezómetros para medir la presión de poro y confirmar las condiciones de saturación, análisis del tamaño de partícula de los suelos de la zona anómala para evaluar la susceptibilidad a la erosión, pruebas con trazadores para evaluar las posibles vías de infiltración de aguas superficiales, y métodos geofísicos complementarios para proporcionar restricciones independientes sobre las propiedades del subsuelo.

Los resultados geofísicos indican que las condiciones anómalas relacionadas con la subsidencia se extienden hasta una profundidad mínima de 8 m por debajo del centro de la calle. Por lo tanto, cualquier estrategia de remediación debe abordar las condiciones del subsuelo al menos hasta esta profundidad para ser efectiva. La selección de técnicas adecuadas de mejora del suelo requiere considerar múltiples factores que van más allá del alcance de esta investigación geofísica, incluidos las propiedades del suelo, las condiciones del agua subterránea, las estructuras adyacentes, la viabilidad de la construcción y los requisitos de rendimiento a largo plazo [12].

Este estudio no constituye recomendaciones profesionales de ingeniería para la remediación. En cambio, proporciona una caracterización del subsuelo que puede fundamentar evaluaciones geotécnicas y de ingeniería de pavimentos posteriores realizadas por profesionales calificados.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a quienes participaron en la realización de los ensayos geofísicos. Técnicos académicos: M.C. Adán Gómez Hernández y Juan Manuel Sandoval Hernández. Estudiante de doctorado: Susana Alejandra Márquez Díaz. Estudiantes de licenciatura que asistieron en el marco del XXVIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico: Ana Paula Portillo Luján, Claudia Ana María Rosales Ríos, Roberto Alvarado Izarraras, y Wendy Lizbeth Zúñiga Cuevas.

Financiamiento y apoyos

Este trabajo se desarrolló en el marco de las actividades del Cuerpo Académico UDG-CA-941 (PRODEP). El Centro de Estudios de la Tierra de la Universidad de Guadalajara, sedes CUSUR (Ciudad Guzmán, Jalisco, México) y CUCOSTA (Puerto Vallarta, Jalisco, México), facilitó los equipos geofísicos. La Dirección Municipal de Protección Civil y Bomberos de Puerto Vallarta, Jalisco, brindó el apoyo logístico necesario para la realización de los ensayos geofísicos en campo.

Disponibilidad de datos

Los datos originales necesarios para realizar las tomografías de resistividad eléctrica están disponibles en <https://doi.org/10.5281/zenodo.19710277> [17].

Anexo

Prueba de penetración estándar y resistividad eléctrica de los geomateriales

La prueba de penetración estándar (SPT) es un método de exploración geotécnica *in situ* normalizado por la ASTM D1586/D1586M-18 [13]. El procedimiento consiste en hincar un muestreador de cuchara partida en el suelo mediante un martillo de 63.5 kg que cae repetidamente desde una altura de 0.76 m. El número de golpes requerido para penetrar tres intervalos sucesivos de 150 mm (con la exclusión de los 150 mm iniciales de asiento) se registra como el valor de resistencia a la penetración estándar (SPT-N). Este valor, tras las correcciones pertinentes, se emplea para estimar las propiedades ingenieriles del suelo. El muestreador recupera muestras alteradas para su clasificación visual y ensayos de laboratorio. El valor N se interpreta en función del tipo de suelo: para suelos granulares (arenas y gravas) indica su compacidad relativa; para suelos cohesivos (limos y arcillas) indica su consistencia [14]. Las muestras recuperadas se clasifican según los sistemas unificados de clasificación de suelos [15,16]. La Tabla 1 presenta la simbología estándar para describir los componentes del suelo, la gradación y el límite líquido.

Tabla 1. Clasificación de suelo de acuerdo con ASTM [15].

Compacidad y consistencia-SPT _N			
Compacidad arenas y gravas		Consistencia de limos y arcillas	
Nivel de Compacidad	STP _N	Nivel de consistencia	STP _N
Muy suelto	< 5	Muy suave	< 2
Suelto	5 a 10	Suave	2 a 4
Compacto	10 a 30	Firme	4 a 8
Denso	30 a 50	Rígido	8 a 15
Muy denso	> 50	Muy Rígido	15 a 30
		Duro	> 30
Componente		Modificador	
Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre
-	Boleos	W	Bien graduada
G	Grava	P	Pobremente graduada
S	Arena		
S	Arena	M	Limosa
M	Limo	L o H	Baja/ Alta plasticidad
C	Arcilla		
O	Orgánico		

Las resistividades eléctricas típicas de varios tipos de geomateriales se enumeran en la Tabla 2. Las resistividades varían de 1.0 ohm-m en arcilla a 7.4×10^8 ohm-m en arenisca [1,2]. La resistividad eléctrica del hormigón y del asfalto depende de las

proporciones de la mezcla, debido a la influencia de los materiales constituyentes (proporción de áridos, contenido de agua y arcilla, contenido de iones en el agua, porosidad, etc.). Por lo tanto, analizar la correlación entre la resistividad eléctrica y los constituyentes de los materiales del pavimento resulta importante al emplear ERS [1-3].

Tabla 2: Resistividades típicas de los geomateriales [1,2].

Material	Resistividad eléctrica (Ohm-m)
Granito	300 a 1,300,00
Arenisca	1 a 740,000,000
Arcilla	1 a 100
Topsoil	250 a 1700
Grava	100 a 1400
Aluvión y arena	10 a 800
Suelo seco arenoso	80 a 1050
Arcilla arenosa/Arena arcillosa	30 a 215
Arena y grava	30 a 215
Arcilla: mojada a húmeda	1.5 a 3.0
Arcilla limosa/limo arcilloso: mojada a húmeda	3 a 5
Arcilla/Arenas: húmedo a seco	15 a 150
Agua dulce	20 a 60
Agua salada	0.18 a 0.24

Referencias

1. K. Knödel, G. Lange, and H.-J. Voigt, *Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies*. Berlin, Germany: Springer, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-74671-3
2. J. M. Reynolds, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2011
3. C. Park, J. H. Jeong, H.-W. Park, and K. Kim, "Experimental study on electrode method for electrical resistivity survey to detect cavities under road pavements," *Sustainability*, vol. 9, no. 12, p. 2320, Dec. 2017. doi: 10.3390/su9122320
4. A. Elseicy, A. Alonso-Díaz, M. Solla, M. Rasol, and S. Santos-Assunção, "Combined Use of GPR and Other NDTs for Road Pavement Assessment: An Overview," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 17, p. 4336, 2022. doi: 10.3390/rs14174336
5. W. O. Medjor, M. O. Kanu, and S. Solomon, "Application of Electrical Resistivity Tomography to Investigating Geological Causes of Road Failure in Taraba State, Nigeria," *Science World Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 346–355, 2022.
6. A. A. Abong and A. M. George, "Electrical Resistivity Tomography Survey of Some Failed Segments along Selected Major Highways in Cross River State, Southeastern Nigeria," *Journal of Applied Science and Environmental Management*, vol. 27, no. 8, pp. 1687–1693, 2023. doi: 10.4314/jasem.v27i8.11

7. S. S. Oguntade, "Subsurface Investigation for Road Construction Using Electrical Resistivity Method along Oloko Road, Apatapiti, Akure, Ondo State, Nigeria," *Annals of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 29–35, 2022.
8. T. E. Oni, A. O. Falade, and E. O. Adeyemi, "Geophysical Assessment of Pavement Failure Along the Ikere-Iju Road, Southwestern Nigeria, Using 2D Electrical Resistivity Imaging," *Asian Journal of Emerging Research*, vol. 7, no. 1, pp. 43–51, 2025. doi: 10.3923/ajer.2025.43.51
9. INEGI, "Carta Geológico-Minera, Puerto Vallarta F13-11, 1:250,000," Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México, 1999. [EnLinea]. Disponible: http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/54_F13-11_GM.pdf
10. Building Seismic Safety Council (BSSC), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions," Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., FEMA 368, 2001.
11. C. R. Escudero, A. Ramírez Gaytán, A. Zamora Camacho, A. Preciado, K. L. Flores, and A. Gómez Hernández, "Geotechnical zonation and soil-structure interaction at Puerto Vallarta, México," *Natural Hazards*, vol. 110, no. 1, pp. 247–267, 2022. doi: 10.1007/s11069-021-04945-w
12. J. Pérez Valcárcel, "Mejora y consolidación de suelos," E.T.S. Arquitectura de A Coruña, A Coruña, España, 2020.
13. J. D. Rogers, "Subsurface exploration using the standard penetration test and the cone penetrometer test," *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 12, no. 2, pp. 161–179, 2006. doi: 10.2113/12.2.161
14. USDA Natural Resources Conservation Service (NRCS), "Engineering Classification of Earth Materials," in *National Engineering Handbook*, Part 631, Washington, DC, USA, 2012.
15. ASTM D2487-17e1, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017. doi: 10.1520/D2487-17E01
16. ASTM D2488-17e1, *Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedures)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017. doi: 10.1520/D2488-17E01
17. C. R. Escudero, S. A. Márquez Díaz, and M. Fuentes-Arreazola, "Datos de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) de la calle Basilio Badillo, Puerto Vallarta, Jalisco, México". *Zenodo*, Apr. 23, 2026. doi: 10.5281/zenodo.19710277