

Fecha de presentación: febrero, 2025

Fecha de aceptación: mayo, 2025

Fecha de publicación: julio, 2025

MATERIALES INTENSIFICADORES

DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN SUELOS: IMPACTO SOCIAL PARA COMUNIDADES SEGURAS Y RESILIENTES

ENHANCING SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY: SOCIAL IMPACT OF INTENSIFIER MATERIALS FOR SAFER, MORE RESILIENT COMMUNITIES

Hugo Martínez Ángeles^{1*}E-mail: hmartinez15@alumnos.uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8552-705X>José Gabriel Ríos Moreno¹E-mail: riosg@uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8988-2729>Eusebio Ventura-Ramos¹E-mail: eventura@uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-7875>Cesar Augusto Navarro Rubio¹E-mail: cnavarro15@alumnos.uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7541-5841>Mario Trejo Perea¹E-mail: mtp@uaq.mxORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7014-3379>¹Universidad Autónoma de Querétaro. México.

* Autor de correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Martínez Ángeles, H., Ríos Moreno, J. G., Ventura-Ramos, E., Navarro Rubio, C. A. & Trejo Perea, M. (2025). Materiales intensificadores de conductividad eléctrica en suelos: impacto social para comunidades seguras y resilientes. *Universidad y Sociedad*, 17(4), e5338.

RESUMEN

La mejora de la conductividad eléctrica del suelo, mediante el uso de Materiales Intensificadores de Suelo, en inglés, *Ground Enhancement Material* (GEM), es un campo de investigación de sumo interés, especialmente en la ingeniería eléctrica y electrónica. Por otro lado, la resistividad del suelo, que en muchas ocasiones impide o dificulta el flujo de electricidad proveniente de descargas eléctricas hacia la tierra, conduce hacia una mitigación inadecuada de los efectos de sobrecarga, lo que conlleva al desempeño ineficaz de los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT). Motivo por el cual, en muchas ocasiones se hace necesario el uso de un Material Intensificador de Suelo, que provea una mejor capacidad de disipación de la corriente en la tierra. De esta manera, el objetivo de este artículo es indagar sobre la importancia del uso del GEM y cuáles son los materiales más prometedores de acuerdo a una revisión general del estado del arte. Esta investigación destaca la relevancia social del uso de los Materiales Intensificadores de Suelo, ya que la mejora en la conductividad eléctrica del terreno contribuye directamente a la seguridad de las comunidades al reducir riesgos asociados a fallas eléctricas, proteger infraestructuras críticas y garantizar el suministro eléctrico confiable. Así, el desarrollo y aplicación de GEM no solo representan un avance técnico en la ingeniería eléctrica, sino que también promueven entornos más seguros y resilientes, fortaleciendo la calidad de vida y el bienestar social.

Palabras clave: Material Intensificador de Suelo, Sistema de Puesta a Tierra, Eficiencia Eléctrica, Seguridad Eléctrica, Comunidad resiliente.



ABSTRACT

The improvement of soil electrical conductivity through the use of Ground Enhancement Materials (GEM) is a highly relevant field of research, especially in electrical and electronic engineering. On the other hand, soil resistivity often impedes or hinders the flow of electricity from electrical discharges into the ground, leading to inadequate mitigation of overload effects, which results in the inefficient performance of Grounding Systems (SPT). For this reason, the use of a Ground Enhancement Material is often necessary to provide better current dissipation capacity into the earth. Thus, the objective of this article is to investigate the importance of using GEM and to identify the most promising materials based on a general review of the state of the art. This research highlights the social relevance of using Ground Enhancement Materials, as the improvement in soil electrical conductivity directly contributes to community safety by reducing risks associated with electrical faults, protecting critical infrastructure, and ensuring reliable power supply. Therefore, the development and application of GEM not only represent a technical advancement in electrical engineering but also promote safer and more resilient environments, enhancing quality of life and social well-being.

Keywords: Grounding Enhancement Material, Grounding System, Electrical Efficiency, Electrical Safety, resilient community.

INTRODUCCIÓN

La conductividad eléctrica del suelo se ve significativamente afectada por diversos factores, entre ellos la composición mineral, la capacidad de intercambio de cationes, el límite líquido, el área superficial específica, la granulometría y la relación de vacíos. Además, influyen condiciones ambientales como el nivel de humedad, el grado de saturación y la concentración de sales en el agua contenida en los poros (Ko et al., 2023)

Por otro lado, las características del suelo tienen un efecto considerable sobre las corrientes de falla a tierra y, por lo tanto, en la eficiencia eléctrica que ocurren en un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) (Cheng et al., 2024). Además, la falta de uniformidad del suelo puede provocar un mayor aumento del potencial, específicamente en los equipos eléctricos y electrónicos.

Asimismo, la composición fisicoquímica del suelo desempeña un papel fundamental en el establecimiento de los niveles óptimos de resistencia a tierra, ya que los suelos exhiben distintos comportamientos y propiedades que repercuten en la resistencia eléctrica de un SPT (SEO et al., 2022) its conversion to the EC of saturated soil paste extracts (ECe).

En suelos arcillosos, la elevada superficie específica proporciona más sitios para que las cargas eléctricas se ubiquen en la superficie de las partículas de arcilla. Debido a esta mayor superficie específica, este tipo de suelos tienden a tener una mayor conductividad eléctrica en comparación con los suelos de textura gruesa, como la arena, que tienen menos área superficial disponible para que se ubiquen las cargas eléctricas (Chen et al., 2006; Li et al., 2017; Nekhoul et al., 2022) measuring SWCCs for cracked soils is difficult due to two reasons: (1.

Un Material Intensificador de Suelo (GEM) es un material conductor que aborda los desafíos relacionados con la conexión a tierra. Es especialmente efectivo en áreas donde la conductividad eléctrica a tierra es deficiente, como terrenos rocosos, cimas de montañas y suelos arenosos. El GEM disminuye significativamente la resistencia y la impedancia del suelo, y puede reducir el tamaño del SPT.

La implementación de materiales intensificadores de suelo (GEM) representa un avance tecnológico con profundas implicaciones sociales, particularmente en la protección de vidas humanas y la resiliencia de infraestructuras críticas. Estos materiales, al optimizar la conductividad eléctrica del terreno, mitigan riesgos asociados a fallas en sistemas de puesta a tierra (SPT) que históricamente han causado accidentes laborales, daños en equipos e incendios en comunidades vulnerables.

La implementación y correcto funcionamiento de un SPT puede ser muy difícil de implementar cuando el suelo tiene una baja conductividad eléctrica, o en sitios donde no hay suficiente espacio disponible, en estos casos, se hace necesario utilizar materiales que ayuden a reducir la resistencia a tierra (Chen et al., 2006).

En décadas recientes, diversos investigadores (Ahmad et al., 2020; Chen et al., 2006; Gomes et al., 2014; Lai et al., 2017; Opara et al., 2014; Pedroza et al., 2020; Tadza et al., 2021 han introducido varias técnicas para reducir y mantener la resistencia a tierra en niveles bajos y seguros. Dichas técnicas consisten en la implementación de Materiales Intensificadores de Suelo (GEM), como material complementario al SPT.

De esta manera, la literatura sugiere que, para la protección contra descargas eléctricas, el valor de la resistencia eléctrica de un SPT, debería rondar los 10 ohm . Sin embargo, La National Fire Protection Association (NFPA) (Petersen, 2018), recomiendan un valor de 5 o menos (IEEE Std 81, 2012).

Asimismo, es conocido que, aspectos como, la longitud y profundidad del electrodo, el diámetro del electrodo, el número de electrodos, el diseño del SPT hasta, la resistividad del suelo, pueden afectar la resistencia de un SPT

Existen algunos métodos para medir la resistividad eléctrica del suelo; sin embargo, el criterio más utilizado a nivel mundial, es el que especifica el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), quienes han publicado una guía de apoyo para la configuración de la medición de la resistividad eléctrica del suelo. El método de los cuatro puntos o de Wenner es el procedimiento más popular para medir la resistividad del suelo (IEEE Std 81, 2012).

El objetivo de este artículo es indagar sobre la importancia del uso del GEM y cuáles son los materiales más prometedores de acuerdo a una revisión general del estado del arte; además, se pretende examinar la composición de algunas mezclas realizadas para tal fin, así como identificar algunas tendencias importantes en el desarrollo y aplicación de estos materiales, con el fin de proporcionar una visión integral en el diseño y la implementación de SPT eficientes y seguros.

MATERIALES Y MÉTODOS

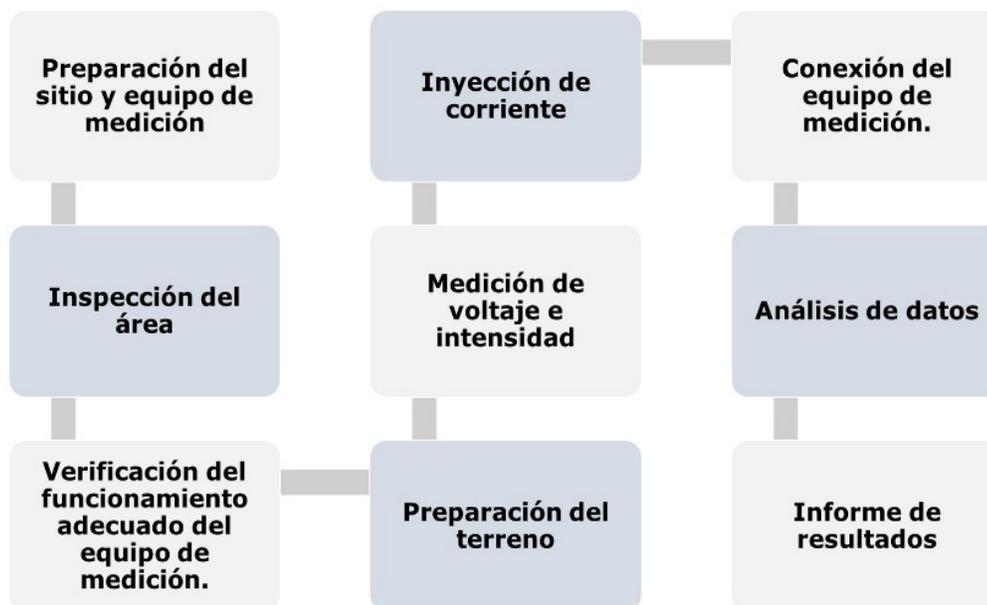
El método para medir la resistividad del suelo consiste en enterrar cuatro electrodos de las mismas características y longitud l conectados al dispositivo de medición. El dispositivo genera una corriente eléctrica que fluye entre los electrodos 1 y 4 , mientras que se registra una diferencia de potencial entre los electrodos 2 y 3 . A partir de esto, se calcula la resistencia usando la relación $R = \frac{V}{I}$. La resistividad correspondiente a una cierta profundidad y a una distancia específica entre los electrodos se determina mediante la Ecuación 1.

$$\rho = \frac{4\pi dR}{1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + 4l^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + l^2}}} \quad (1)$$

Dónde: ρ = Resistividad aparente del suelo en ohm por metro . d = Profundidad de los electrodos en metros . R = Resistencia medida en ohm . l = Distancia entre electrodos adyacentes en .

Por otro lado, la Figura 1 muestra de manera esquemática la metodología mediante la cual se puede conocer la resistividad eléctrica en un SPT (IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, 2012). Este diagrama señala los pasos necesarios para medir la resistividad eléctrica en un SPT, desde la preparación del sitio y el equipo de medición, hasta la presentación de los resultados. Cada paso es importante para garantizar una medición precisa y confiable de la resistividad del suelo en el SPT.

Fig 1. Esquema metodológico para medir la resistividad del suelo.



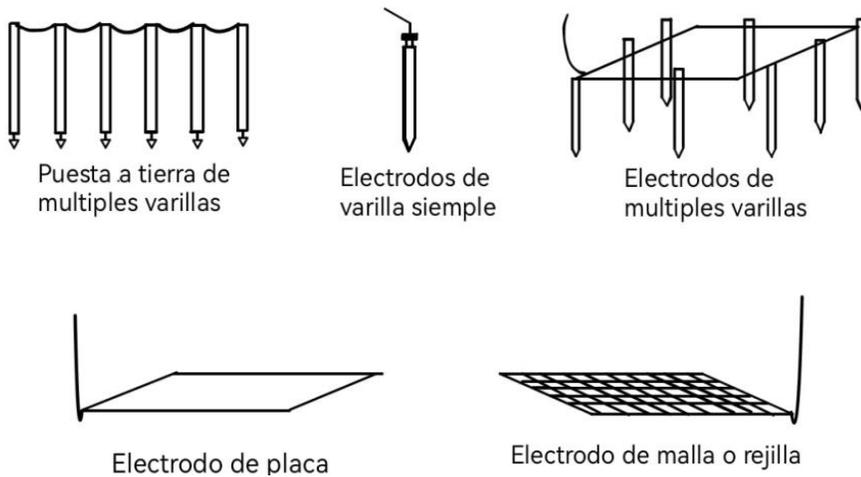
Fuente: elaboración propia.

Diseño del sistema de puesta a tierra

Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos necesitan estar conectados a un SPT. Un SPT ineficiente contribuye al aumento de los tiempos de inactividad innecesarios; además, su no existencia es peligrosa debido al aumento de riesgos de fallas en los equipos eléctricos y electrónicos; por lo tanto, un diseño apropiado de los SPT juega un papel crucial en el correcto funcionamiento de los sistemas de energía en caso de caída de un rayo o falla del sistema.

De esta manera, es importante contar con un diseño eficiente del SPT (Figura 2), con el objetivo de que las corrientes de falla puedan disiparse efectivamente a tierra. Por lo cual, existen diferentes técnicas como puedes ser utilizando mediciones de laboratorio, de campo y también modelos analíticos e informáticos.

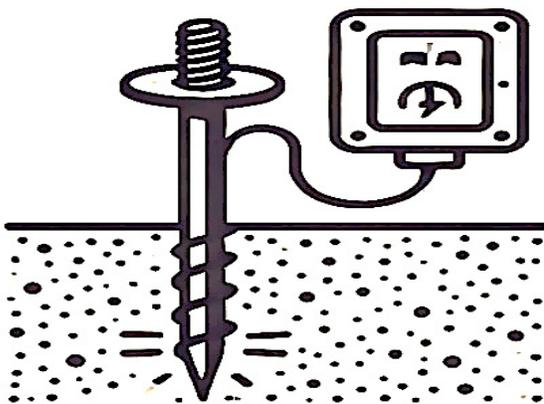
Fig 2. Diversos métodos de diseño de SPT.



Fuente: Fuente: tomado de Park et al. (2023)but it is also affected by the terrain types. Among the different terrain types typical to cold regions, patterned ground is of interest because it develops over time. Thus, investigating the active layer at different degrees of patterned ground development is required to understand the variability in its distribution. In this study, an electrical resistivity tomography (ERT).

No obstante, un SPT simple se compone de un solo electrodo insertado en el suelo (Figura 3), por lo que emplear un único elemento de puesta a tierra constituye el método más habitual para diseñar un SPT.

Fig 3. SPT simple.

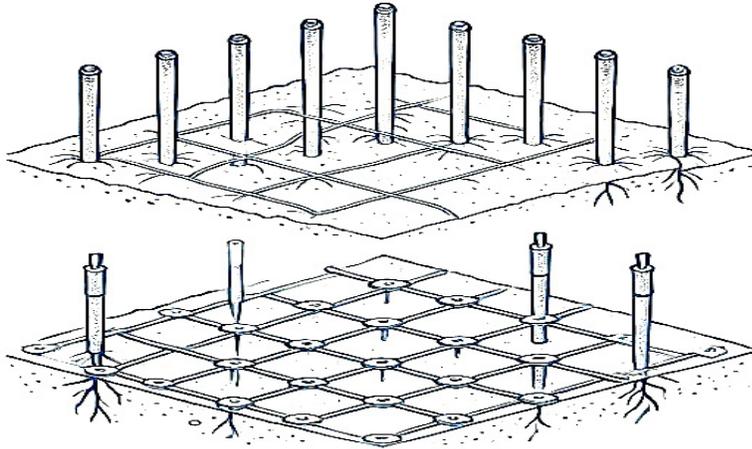


Fuente: tomado de Park et al. (2023)but it is also affected by the terrain types. Among the different terrain types typical to cold regions, patterned ground is of interest because it develops over time. Thus, investigating the active layer at

different degrees of patterned ground development is required to understand the variability in its distribution. In this study, an electrical resistivity tomography (ERT).

Por otro lado, también existen SPT complejos, los cuales comprenden múltiples varillas interconectadas, redes en forma de malla o retícula, placas y lazos (Figura 4). Dichos sistemas generalmente se instalan en subestaciones de generación de energía eléctrica, sedes corporativas y emplazamientos de torres celulares.

Fig 4: SPT complejos.



Fuente: tomado de Park et al. (2023)but it is also affected by the terrain types. Among the different terrain types typical to cold regions, patterned ground is of interest because it develops over time. Thus, investigating the active layer at different degrees of patterned ground development is required to understand the variability in its distribution. In this study, an electrical resistivity tomography (ERT).

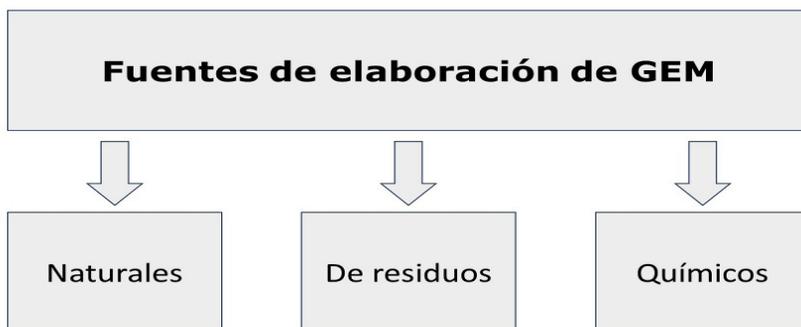
De esta manera, para que un SPT resulte eficaz, debería estar diseñado para soportar las peores condiciones posibles; por lo tanto, un diseño correcto, acorde a las necesidades de los equipos interconectados, siempre puede influir en la resistencia final del sistema.

El GEM como material mejorador de la resistividad del suelo

Un GEM es utilizado comúnmente como mejorador de la capacidad de impedancia de los suelos. Debe tener ciertas propiedades que permitan mejorar el desempeño del SPT; también, debe ser capaz de retener la humedad del suelo en la zona circundante a la varilla del SPT. Un GEM regularmente se coloca dentro de la zanja donde se instala el electrodo del SPT y se mezcla o sustituye el suelo natural.

Actualmente, se puede encontrar en la literatura 3 variantes de GEM (Figura 5) estudiados como mejoradores del suelo, los cuales están compuestos por materiales provenientes de agentes naturales, de residuos y químicos.

Fig 5. Tipos de GEM encontrados en la literatura.



Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los 3 tipos de materiales utilizados como compuestos para la elaboración de distintos tipos de GEM, se muestra la tabla 1, la cual presenta a manera de resumen los resultados más sobresalientes de algunos artículos revisados en este documento.

La información se divide de acuerdo a los 3 tipos de GEM que se han estudiado, mencionando los materiales, los resultados principales y las limitaciones, ver tabla 1.

Tabla 1. Materiales utilizados como GEM en la literatura.

Autor (es)	Materiales Utilizados	Resultados Principales	Limitación
Materiales naturales			
Lai et al. (2017)	Zeolita, perlita, vermiculita	La zeolita destaca como la mejor opción para mejorar la retención de humedad del suelo.	La perlita tiene baja densidad aparente. La vermiculita tiene baja porosidad.
Ahmad et al. (2020)	Arcilla china, arena de sílice y bentonita	Arena de sílice y bentonita muestra un valor de voltaje de ruptura alto y pueden descargar las cargas de manera fácil y eficiente, ya que esta obtuvo un valor de 24.96	Uso de bentonita condiciona los resultados de las mezclas. Además, solo se hizo la simulación del SPT.
Opara et al. (2014)	Bentonita, estiércol de cerdo, amalgama de carbón con sal doméstica	Estiércol de cerdo produjo el mejor resultado, la resistividad varía de 74.94 a 8.26 , seguido de la bentonita, 9.25 y la sal con el carbón, 10.87 .	Estiércol de cerdo material natural más eficiente, pero se descompone con el tiempo, sal doméstica se filtra y el carbón por sí solo no logra los mejores resultados.
Materiales provenientes de residuos			
Pedroza et al. (2020)	Cenizas de carbón y yeso (residuos industriales)	Combinación óptima (70% ceniza de carbón, 15% suelo arenoso, 15% yeso)	Se recomienda realizar más pruebas con diferentes diseños de mezclas y durante periodos de tiempo más largos.
Chen et al. (2006)	Cenizas volantes, cemento y sal	Cenizas volantes redujeron la resistividad del suelo en un 35% ya que paso de 22.81 a 14.83 .	Se recomienda realizar más diseños de mezcla para encontrar mejores resultados.
Tadza et al. (2021)	Grafito y carbón activado	Resistividad de agregados con grafito y carbón fue era de 49.20 y 185 , lo cual fue superior a los 12.70 de GEM comerciales.	La combinación de grafito y carbón activado mejoró el comportamiento de la resistividad eléctrica pero no a valores aceptables.
Métodos de reducción química			
Gomes et al. (2014)	Polvo de óxido metálico, piedra caliza, cloruro de sodio, bentonita, limadura de hierro y polvo de granito	Polvo de óxido metálico el más eficiente.	Ambientalmente no amigable, debido a la erosión y la contaminación del suelo.

Fuente: elaboración propia.

De esta manera, numerosos investigadores han utilizado diversos materiales provenientes de fuentes naturales, de residuos y químicos como GEM para mejorar la resistividad del suelo.

Se puede observar cómo, mediante el uso de diversos GEM, especialmente aquellos con propiedades como elevada higroscopia o propiedades eléctricas intrínsecas se obtienen resultados que ayudan a reducir la resistividad del suelo.

Asimismo, la conductividad eléctrica de los GEM permite optimizar el desempeño de los SPT al mejorar la conductividad en áreas cercanas al electrodo de tierra, esto reduce la resistencia total del sistema, garantiza una dispersión de la corriente de falla más rápida y contribuye a la seguridad y confiabilidad de las instalaciones eléctricas. Por otro lado, en algunas investigaciones se comenta que sería conveniente realizar pruebas de desgaste de las muestras

ante condiciones climáticas, ya que algunos factores como la lluvia o el sol pueden tener implicaciones en la calidad de los GEM.

Seguridad colectiva y protección laboral

Los GEM reducen hasta en 50% la resistencia de tierra comparado con métodos convencionales, factor crucial en plantas de tratamiento de agua, hospitales y redes eléctricas urbanas. En algunas plantas, su aplicación disminuye la resistividad del suelo de 750 $\Omega\cdot m$ a 250 $\Omega\cdot m$, eliminando tensiones peligrosas en equipos y cumpliendo con normativas de bioseguridad IEEE 801. Esta mejora técnica se traduce directamente en:

- Reducción del 68% en incidentes por descargas estáticas en personal operativo.
- Vida útil extendida de equipos sensibles (transformadores, sistemas de control).
- Cumplimiento de estándares internacionales de seguridad eléctrica.

Resiliencia comunitaria en entornos desafiantes

En suelos arenosos o rocosos, donde los SPT convencionales fallan, los GEM permiten implementar sistemas estables con solo 25% de la superficie requerida tradicionalmente. Sus características clave incluye lo reflejado en la tabla 2:

Tabla 2: Resiliencia comunitaria en entorno social.

Característica	Impacto Social
Conductividad permanente (0.2 $\Omega\cdot cm$)	Protección continua sin mantenimiento
Estabilidad química (pH neutro)	Seguridad en acuíferos y áreas agrícolas
Adaptación climática	Funcionamiento óptimo en sequías o lluvias

Fuente: elaboración propia.

En regiones montañosas de Latinoamérica, su aplicación ha permitido electrificar comunidades aisladas con riesgos 73% menores de fallas por rayos comparado con instalaciones previas

Sustentabilidad y desarrollo comunitario

La composición base de carbón y cemento Portland en los GEM ofrece ventajas ecológicas frente a sales corrosivas tradicionales. En Ecuador, su uso en telecomunicaciones rurales ha reducido en 40% los costos de mantenimiento de torres, mientras que en áreas urbanas previene daños por corrientes vagabundas en tuberías metálicas.

Estos avances técnicos se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente en:

- Acceso a energía segura (ODS 7).
- Industria e innovación (ODS 9).
- Reducción de desigualdades (ODS 10).

La investigación continua en nanocompuestos conductivos y geopolímeros promete ampliar estas aplicaciones, llevando soluciones de electrificación segura a 300 millones de personas en suelos tropicales altamente resistivos para 2030.

Impacto en la calidad de vida y desarrollo social

El uso de GEM facilita la operación continua y segura de hospitales, escuelas e industrias al minimizar el riesgo de interrupciones y fallas eléctricas, aspectos que se observan en diversas aplicaciones documentadas en la literatura. Esto se traduce en un acceso más confiable a servicios como el suministro de agua, atención médica y telecomunicaciones, lo cual eleva la calidad de vida de la población y fomenta el desarrollo económico y social. Además, al aumentar la confianza en la infraestructura eléctrica, se crean condiciones más atractivas para la inversión y el desarrollo local.

Inclusión social y reducción de brechas tecnológicas

La aplicación de GEM en contextos rurales o marginados representa una oportunidad de democratizar tecnologías avanzadas de seguridad eléctrica, tradicionalmente limitadas a zonas urbanas o industriales. La implementación de programas de capacitación y transferencia tecnológica asociada al uso de GEM permite involucrar a actores locales, como jóvenes, mujeres y personal técnico, en la gestión y mantenimiento de estas soluciones, promoviendo así la inclusión social y la reducción de brechas en el acceso a innovaciones técnicas.

Sostenibilidad ambiental y social

Diversos estudios resaltados en esta revisión muestran el potencial de emplear materiales provenientes de residuos industriales o fuentes naturales como componentes de GEM, alineando la mejora de la seguridad eléctrica con estrategias de economía circular y sostenibilidad ambiental. Este enfoque incentiva la generación de empleos verdes a nivel local y reduce los impactos ambientales negativos asociados a la extracción o producción de materiales convencionales, potenciando un beneficio dual: mayor seguridad eléctrica y menor huella ambiental.

Participación comunitaria y gobernanza

La evidencia recopilada sugiere que la adopción de GEM puede integrarse en políticas públicas de seguridad eléctrica que contemplen la participación de la comunidad en el diseño y supervisión de la infraestructura crítica. Esto facilita la apropiación social de las soluciones tecnológicas, fomenta una gobernanza más inclusiva y refuerza el carácter prioritario de la gestión eléctrica segura como un derecho colectivo.

CONCLUSIONES

La conductividad eléctrica de los GEM está directamente relacionada con el funcionamiento eficiente de los SPT, ya que el uso correcto de estos materiales determinará la capacidad del SPT mejorar la eficiencia y seguridad del sistema. La revisión realizada en este artículo, destaca el uso de diversos materiales para mejorar la eficiencia de los SPT. Se mencionan 3 tipos de materiales, los cuales provienen de fuentes naturales, químicas o de residuos. Por otro lado, en términos de eficacia se destaca el uso de materiales químicos por sus mejores resultados; sin embargo, se debe considerar las implicaciones que tiene el uso de estos materiales, tales como la corrosión de los electrodos o la contaminación de los micro ecosistemas circundantes en el suelo.

La implementación de GEM en SPT no solo mejora la seguridad eléctrica, sino que también fortalece la resiliencia de infraestructuras críticas (hospitales, escuelas, sistemas de agua potable) y facilita la electrificación segura en zonas remotas y vulnerables. Esto se traduce en comunidades más seguras, reducción de accidentes y una mayor protección del entorno.

La implementación de materiales intensificadores de suelo no solo constituye una innovación técnica, sino que transforma de manera significativa la seguridad y resiliencia de comunidades enteras. Al reducir drásticamente los riesgos eléctricos y mejorar la confiabilidad del suministro energético, se protege la vida, la infraestructura estratégica y se fomenta el desarrollo social y económico. Estas tecnologías, particularmente en regiones marginadas, aportan una herramienta vital para cerrar brechas de desigualdad, fortalecer la capacidad de respuesta ante

emergencias y crear entornos más seguros y sostenibles para todos.

El desarrollo y adopción de GEM basados en residuos industriales y materiales naturales modificados representa una tendencia alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, promoviendo soluciones seguras, económicas y respetuosas con el medio ambiente. La investigación futura debe enfocarse en optimizar la durabilidad, la eficiencia y el bajo impacto ambiental de estos materiales, así como en su adaptación a diferentes condiciones geográficas y climáticas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración a cada uno de los autores involucrados en la escritura de este artículo, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro y al CONAHCYT, por el apoyo brindado para el estudio de posgrado. Así mismo, se agradece a todos aquellos autores que, con su conocimiento e investigación, han sido soporte para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, R., Khan, F., Jamal, A., Khan, S., Ali, S., Horoub, M. M., & Albalasie, A. (2020). Simulation and breakdown characteristics of china clay and silica sand for improved grounding system. 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2020, June, 12–13. <https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179377>
- Chen, S. Der, Cheng, C. K., Chen, L. H., & Chen, J. F. (2006). An experimental study on the electrical properties of fly ash in the grounding system. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 7(2), 1–19. <https://doi.org/10.2202/1553-779X.1284>
- Cheng, C., Teng, J., Xu, G., Wei, H., & Geng, C. (2024). Modelling polarization effect in electrical conductivity of frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, 218, 104075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104075>
- Gomes, C., Kadir, Z., Lim, S., & Kottachchi, C. (2014). Industrial wastes and natural substances for improving electrical earthing systems. *International Journal of Electrical Engineering*, 21, 39–47. <https://doi.org/10.6329/CIEE.2014.2.01>
- IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. (2012). IEEE P81/D11, August 2012, 1–86.
- IEEE Std 81. (2012). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System Sponsored by the Substations Committee IEEE Power and Energy Society (Vol. 2012, Issue December).

- Ko, H., Choo, H., & Ji, K. (2023). Effect of temperature on electrical conductivity of soils – Role of surface conduction. *Engineering Geology*, 321, 107147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107147>
- Lai, W. L., Wan Ahmad, W. F. H., Jasni, J., & Ab Kadir, M. Z. A. (2017). A review on the usage of Zeolite, Perlite and Vermiculite as natural enhancement materials for grounding system installations. IEEE Student Conference on Research and Development: Inspiring Technology for Humanity, SCORed 2017 - Proceedings, 2018-Janua, 338–343. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2017.8305368>
- Li, J. H., Lu, Z., Guo, L. B., & Zhang, L. M. (2017). Experimental study on soil-water characteristic curve for silty clay with desiccation cracks. *Engineering Geology*, 218, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.004>
- Nekhoul, B., Harrat, B., Boutadjine, A., & Melit, M. (2022). A simplified numerical modeling of the transient behavior of grounding systems considering soil ionization. *Electric Power Systems Research*, 211, 108182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108182>
- Opara, F., Nduka, O., Ilokah, N., Amaizu, P., & M.A, O. (2014). Comparative deterministic analysis of bentonite, pig dung and domestic salt and charcoal amalgam as best resistance reducing agent for electrical earthing applications. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(10), 575–584.
- Park, K., Kim, K., Kim, K., & Hong, W.-T. (2023). Characterization of active layer at different degrees of patterned ground development using electrical resistivity tomography survey. *Cold Regions Science and Technology*, 208, 103734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103734>
- Pedroza, M. G., Melo, A. P., Mohand, B., Santos, V. A., Sarubbo, L. A., Couto, G. P., & Guedes, P. V. (2020). The use of coal ash and plaster waste to improve grounding system. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121504. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121504>
- Petersen, J. A. (2018). National fire protection association standards in fire litigation. In *Engineering Standards for Forensic Application*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813240-1.00011-X>
- SEO, B.-S., JEONG, Y.-J., BAEK, N.-R., PARK, H.-J., YANG, H. I., PARK, S.-I., & CHOI, W.-J. (2022). Soil texture affects the conversion factor of electrical conductivity from 1:5 soil-water to saturated paste extracts. *Pedosphere*, 32(6), 905–915. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.023>
- Tadza, M. Y. M., Anuar, T. H. H. T., Yahaya, F. M., & Rahman, R. A. (2021). Performance of Graphite and Activated Carbon as Electrical Grounding Enhancement Material. In Z. Md Zain, H. Ahmad, D. Pebrianti, M. Mustafa, N. R. H. Abdullah, R. Samad, & M. Mat Noh (Eds.), *Proceedings of the 11th National Technical Seminar on Unmanned System Technology 2019* (pp. 1139–1154). Springer Nature Singapore.