

# Informe sobre “*Characterizing Liquid Water in Deep Martian Aquifers: A Seismo-Electric Approach*” (Roth et al., 2024, JGR Planets)

## 1. Resumen ejecutivo

El presente artículo explora un método geofísico innovador para detectar y caracterizar posibles **acuíferos profundos en Marte** mediante señales *sismoeléctricas*. En esencia, los autores demuestran que los **martemotos** (sismos marcianos) que se propaguen a través de un acuífero líquido generarían perturbaciones electromagnéticas detectables en la superficie, permitiendo **identificar la presencia de agua líquida a kilómetros de profundidad** bajo el suelo marciano <sup>1</sup>. Mediante simulaciones numéricas de *forma de onda completa* y análisis teóricos, el estudio muestra que es posible extraer información cuantitativa de dichas señales para **estimar las propiedades de los acuíferos** (profundidad, espesor, extensión, saturación y salinidad, entre otras) <sup>2</sup> <sup>3</sup>. Este trabajo constituye la **primera aplicación del método sismoeléctrico en un contexto planetario** fuera de la Tierra, sentando las bases para su uso en el análisis de datos de misiones actuales (e.g. InSight) y en el diseño de futuros experimentos geofísicos en Marte <sup>4</sup>. En síntesis, el artículo aporta una nueva herramienta para la **búsqueda de agua subterránea en Marte**, superando limitaciones de técnicas tradicionales y abriendo una vía para comprender mejor la distribución y evolución del agua marciana en la actualidad.

## 2. Justificación científica

La **detección de acuíferos en Marte** reviste gran importancia científica por varias razones. Por un lado, Marte muestra abundante evidencia de que en el pasado hubo **grandes cantidades de agua en la superficie** (océanos, ríos) que desaparecieron con el tiempo <sup>5</sup>. Se ha propuesto que una fracción de esa agua podría haber quedado **atrapada en el subsuelo** marciano, en forma de acuíferos profundos, pero hasta ahora no se ha logrado confirmar su existencia (previos indicios con radar resultaron ambiguos o polémicos) <sup>5</sup> <sup>6</sup>. Comprobar la presencia de **agua líquida actual en el subsuelo de Marte** tendría implicaciones de gran alcance: ayudaría a reconstruir la historia climática del planeta y sus cambios en los últimos miles de millones de años <sup>7</sup>, delimitar regiones potencialmente **habitables** en el presente (la subsuperficie húmeda podría sustentar vida microbiana) y proveer conocimiento valioso para futuras misiones tripuladas que requieran **recursos de agua** in situ.

Sin embargo, **detectar acuíferos marcianos profundos es un desafío** porque las técnicas geofísicas tradicionales tienen alcances limitados. En la Tierra, métodos como el **radar de penetración de subsuelo** (GPR) permiten mapear agua subterránea hasta decenas de metros, pero pierden efectividad a mayores profundidades <sup>8</sup>. Se sospecha que si existe agua líquida en Marte hoy, probablemente se halle a **varios kilómetros de profundidad**, por debajo del alcance de los radares orbitales actuales <sup>8</sup>. Por otro lado, los **métodos sísmicos convencionales** (como los usados por la sonda InSight) pueden revelar la estructura interna pero **no diferencian fácilmente entre capas rellenas de agua, hielo o roca porosa** <sup>9</sup>. Frente a estas limitaciones, resulta necesaria una nueva aproximación capaz de “ver” el agua profunda de forma no invasiva.

En este contexto, el artículo propone aprovechar el **fenómeno sismoeléctrico** como herramienta de prospección planetaria. El método sismoeléctrico, desarrollado recientemente en estudios terrestres, combina la sismología y el electromagnetismo: cuando una onda sísmica producto de un terremoto atraviesa un estrato rocoso **saturado de agua**, la diferencia en la respuesta de movimiento entre la matriz rocosa y el fluido genera cargas eléctricas en la interfaz sólido-líquido, induciendo la emisión de **campos electromagnéticos transitorios** <sup>10</sup>. Estos pulsos electromagnéticos se propagan hasta la superficie, donde pueden ser registrados por antenas o magnetómetros sincronizados con el sismómetro. En la Tierra, detectar acuíferos activos con este método es complicado debido a la presencia ubicua de agua en el subsuelo (incluso fuera de acuíferos), lo cual genera multitud de señales eléctricas de fondo que **enmascaran la firma del acuífero** deseado <sup>11</sup>. **Marte, en cambio, presenta un entorno superficial sumamente seco**, libre de agua líquida cercana a la superficie, por lo que cualquier señal sismoeléctrica medida sería un indicador *limpio y directo* de un acuífero profundo <sup>11</sup>. Esta ausencia de “ruido hídrico” natural en Marte otorga al método sismoeléctrico una ventaja única: el propio planeta rojo **filtra el ruido de fondo**, facilitando la identificación y análisis de las señales útiles <sup>12</sup>. En resumen, la detección sismoeléctrica de acuíferos ofrece una **solución novedosa** al problema, potencialmente capaz de lograr **mayor profundidad de exploración** que el radar y de distinguir específicamente la presencia de agua líquida, proporcionando información que complementa y enriquece la obtenida por métodos sísmicos convencionales <sup>8</sup> <sup>3</sup>.

### 3. Metodología usada

Para evaluar esta propuesta, **Roth et al. (2024)** emplearon un enfoque teórico-computacional que integra la física sísmica y electromagnética. En términos generales, desarrollaron un **modelo sismoeléctrico** del subsuelo marciano y realizaron simulaciones numéricas para predecir las señales que se generarían en diferentes escenarios. A continuación se resumen los componentes principales de la metodología:

- **Modelo de Marte con y sin acuíferos:** Los investigadores construyeron un modelo estratificado del **subsuelo marciano**, basado en las propiedades geológicas conocidas, al cual añadieron capas acuíferas hipotéticas a distintas profundidades <sup>13</sup>. Se consideraron **varios escenarios** contrastantes, incluyendo un caso base de Marte completamente seco (sin agua subsuperficial), casos con **uno o más acuíferos profundos** (representando agua líquida atrapada a gran profundidad), y un **caso análogo terrestre** con el subsuelo saturado de agua, para fines comparativos <sup>14</sup>.
- **Parámetros explorados:** En los distintos escenarios se variaron sistemáticamente parámetros clave del acuífero para probar la sensibilidad de la técnica. Entre ellos, la **profundidad** del acuífero, su **espesor** y la cantidad o número de capas acuíferas presentes, así como las propiedades del fluido: la **fracción de saturación de agua** (porcentaje de poros llenos de líquido), la **salinidad** o composición iónica del agua, y otros factores físico-químicos relevantes <sup>15</sup>. Esto permitió analizar cómo cada variable influye en las señales sismoeléctricas resultantes.
- **Simulación sismoeléctrica acoplada:** Para cada configuración de subsuelo, se simuló la propagación de **ondas sísmicas** generadas por un martemoto a través de las capas geológicas, **acoplando** el cálculo de los **campos electromagnéticos inducidos** por el efecto sismoeléctrico. Es decir, a medida que las ondas sísmicas (tipos **P** y **S**) atravesaban las interfaces entre capas secas y capas saturadas, el modelo computacional calculó las correspondientes **señales eléctricas transientes** producidas por el movimiento del fluido respecto a la roca <sup>10</sup>. Estas simulaciones de “forma de onda completa” incorporaron tanto las perturbaciones

electromagnéticas que acompañan a la onda sísmica mientras viaja (campo **co-sísmico**), como las adicionales **respuestas de interfaz** generadas en los límites de los acuíferos.

- **Respuestas sismoeléctricas (IRs):** Un aspecto importante del modelo es la distinción de dos tipos de señales sismoeléctricas generadas en las interfaces saturadas. Los autores definen **respuestas de interfaz radiativas (RIR)**, que son ondas electromagnéticas que **se irradian desde la interfaz acuífero-roca** y se propagan por el subsuelo a la velocidad de las ondas EM (independientemente de la onda sísmica), y **respuestas de interfaz evanescentes (EIR)**, que son perturbaciones electromagnéticas vinculadas a la onda sísmica cuando incide en el interfaz bajo ciertos ángulos críticos <sup>16</sup>. Ambas se producen solo en presencia de fluidos móviles (agua) y aportan información complementaria: las RIR pueden viajar kilómetros a través de la roca y ser detectadas en superficie, mientras que las EIR decaen más rápidamente. El modelo sismoeléctrico utilizado permitió **separar y analizar** estas componentes por separado, lo cual es útil para identificar la firma característica de un acuífero.
- **Análisis de las señales:** Finalmente, se procesaron las **señales sintéticas** obtenidas (sismogramas y electrogramas simulados en la superficie) para identificar las huellas sismoeléctricas del acuífero y correlacionarlas con las condiciones del subsuelo. Se midieron tiempos de arribo de las distintas ondas, formas de onda y amplitudes de las señales electromagnéticas generadas. Mediante un análisis comparativo entre escenarios, se pudo determinar cómo cambian las **características de la señal** cuando hay un acuífero presente vs. cuando no lo hay, y cómo dependen dichas características de cada parámetro del acuífero. Esto sentó la base para proponer *inversiones* cualitativas: dada una señal sismoeléctrica detectada, inferir las propiedades del acuífero responsable.

## 4. Resultados clave

*Figura 1.* Ejemplo de resultados de las simulaciones sismoeléctricas para tres escenarios diferentes (adaptado de Roth et al., 2024). Cada columna muestra el subsuelo (arriba) y los registros simulados (abajo) de un sensor en la superficie: (a) Marte seco sin acuíferos, (b) Marte con un acuífero líquido profundo, (c) un análogo terrestre con el subsuelo completamente saturado de agua. Las líneas negras representan las ondas sísmicas y las curvas/cintas de color representan las señales electromagnéticas inducidas. En el caso (a) sin agua, prácticamente **no se generan señales sismoeléctricas** apreciables. En cambio, en (b) la presencia de un acuífero produce **respuestas sismoeléctricas nítidas** ("IR", flechas rojas) que llegan a tiempos característicos una vez que las ondas sísmicas atraviesan la capa saturada. En (c), la multitud de interfaces saturadas en la Tierra genera múltiples señales superpuestas (ruido electromagnético de fondo), evidenciando la mayor dificultad de aislar la señal de un acuífero individual en entornos terrestres <sup>14</sup>.

A continuación se sintetizan los **hallazgos principales** del estudio:

- **Viabilidad de detección:** Se confirmó que, de existir un acuífero profundo, los **marsquakes** producirían señales sismoeléctricas detectables en Marte. Las simulaciones mostraron pulsos electromagnéticos claros asociados a la interfaz del acuífero, **validando la premisa** de que este método puede revelar agua subterránea en Marte **a varios kilómetros de profundidad** <sup>17</sup>. Dichos pulsos constituyen una "firma" diagnóstica de agua líquida presente en la actualidad bajo la superficie marciana <sup>18</sup>.
- **Influencia de la geometría del acuífero:** Las **características del acuífero (profundidad, espesor y distribución)** impactan notablemente en la señal sismoeléctrica observada. En

particular, los **tiempos de arribo** de las respuestas de interfaz y la **forma de la onda** electromagnética dependen de la profundidad a la que se encuentra el acuífero y del grosor de la capa de agua: acuíferos más profundos demoran más en generar la señal y pueden producir separaciones temporales distintas entre componentes, mientras que acuíferos más **gruesos** o múltiples capas acuíferas pueden dar lugar a *trenes de señales* diferenciables <sup>15</sup>. En suma, la **profundidad y tamaño** del acuífero dejan una huella temporal característica en el registro sismoeléctrico.

- **Influencia de las propiedades del fluido:** La **intensidad (amplitud)** de las señales sismoeléctricas resultó ser muy sensible a las propiedades del agua presente. Una **mayor saturación** de agua en los poros (es decir, acuífero más lleno de líquido) produce señales eléctricas de mayor amplitud, al igual que una **mayor salinidad o conductividad iónica** del agua genera respuestas más fuertes debido a un acoplamiento electrocinético más eficiente <sup>19</sup>. En cambio, estas variables tienen **poca o ninguna influencia en la forma temporal** de la onda sismoeléctrica registrada <sup>19</sup>. Esto significa que la química y cantidad de agua afectan cuánto *energía* electromagnética se genera, pero no alteran el *patrón temporal* de la señal.
- **Información deducible de las señales:** Combinando las dependencias anteriores, el estudio demuestra que a partir de una señal sismoeléctrica registrada es posible **inferir múltiples propiedades** del acuífero causante. En particular, las mediciones permiten acotar la **profundidad y ubicación** del acuífero, estimar su **espesor** e incluso su **volumen o extensión** lateral, así como obtener indicios sobre la **composición del fluido** (por ejemplo, distinguir si el agua es dulce o salobre en base a la conductividad) <sup>2</sup> <sup>3</sup>. Los autores destacan que esta técnica proporcionaría **parámetros del acuífero imposibles de obtener** con otros métodos remotos; por ejemplo, un sismómetro solo no podría confirmar si una capa es agua o roca, mientras que la señal sismoeléctrica sí lo evidencia <sup>20</sup>. En palabras del artículo, las **señales sismoeléctricas** se pueden utilizar para “*acotar estimaciones de la profundidad, volumen, ubicación y composición química de un acuífero*” <sup>2</sup>, ofreciendo **muchas más restricciones** sobre el sistema de agua subterránea marciano que las disponibles hasta ahora <sup>21</sup>.
- **Ventaja del entorno marciano:** Los resultados resaltan que Marte ofrece condiciones ideales para aplicar este método. En las simulaciones análogas a la Tierra, la presencia de agua generalizada produjo ruido de fondo significativo (señales eléctricas en múltiples interfaces), dificultando la identificación única de un acuífero <sup>14</sup>. En cambio, en Marte la ausencia de agua somera implicó que **las únicas señales electromagnéticas generadas provenían del acuífero buscado**, sin interferencias cercanas a la superficie <sup>12</sup>. Esto **confirma la hipótesis** de que la aridez marciana “*remueve naturalmente el ruido*” y deja al descubierto datos más limpios sobre los acuíferos profundos <sup>12</sup>. En consecuencia, **detectar agua subterránea mediante sismoelectricidad sería más fácil en Marte que en la Tierra** <sup>11</sup>, siempre que existan los instrumentos adecuados.

Para mayor claridad, la siguiente tabla resume cómo las distintas características del acuífero influyen en la señal sismoeléctrica, según los hallazgos de Roth et al. (2024):

Parámetro del acuífero	Efecto observado en la señal SE
<b>Profundidad</b> del acuífero	Afecta el <b>tiempo de llegada</b> de la señal: acuíferos más profundos generan IRs con mayor retardo <sup>15</sup> .

Parámetro del acuífero	Efecto observado en la señal SE
<b>Espesor</b> (grosor) de la capa	Influye en la <b>duración y forma</b> de la señal: capas más gruesas producen señales más prolongadas o múltiples pulsos <sup>15</sup> .
<b>Cantidad de acuíferos</b> (capas)	Múltiples capas acuíferas generan <b>varias respuestas</b> distinguibles por tiempos de arribo diferentes (una por interfaz) <sup>15</sup> .
<b>Saturación de agua</b> (poros llenos)	Afecta la <b>amplitud</b> : mayor saturación → señales sismoeléctricas más <b>fuertes</b> (mayor conversión electrocinética) <sup>19</sup> .
<b>Salinidad / Conductividad</b>	Afecta la <b>amplitud</b> : fluidos más salinos (mayor conductividad) → señales de mayor <b>intensidad</b> ; no altera significativamente la forma temporal <sup>19</sup> .

(SE = sismoeléctrica, IR = respuesta de interfaz).

En síntesis, el estudio **demostró la efectividad de la técnica sismoeléctrica** para “ver” el agua subterránea marciana en el entorno virtual simulado. Los autores concluyen que las mediciones sismoeléctricas brindarían **una nueva ventana de observación** del subsuelo marciano, permitiendo *detectar e incluso obtener imágenes* de posibles acuíferos localizados a kilómetros de profundidad <sup>17</sup>. Esto representa un avance significativo en la búsqueda de agua marciana contemporánea.

**(Sugerencia de figuras para presentación):** Para ilustrar estos resultados en una presentación, podrían emplearse: (a) **Diagramas esquemáticos de propagación sismoeléctrica**, como la Figura 1 mostrada, que visualicen cómo una onda sísmica genera señales EM al atravesar un acuífero, y cómo estas señales emergen en la superficie diferenciándose del caso sin agua; y (b) **Gráficas paramétricas**, por ejemplo, una curva de **amplitud de la señal vs. saturación de agua**, evidenciando cuantitativamente que a mayor contenido de agua en el acuífero, mayor es la amplitud de la respuesta sismoeléctrica registrada <sup>19</sup>. Este tipo de figura ayudaría a comunicar la sensibilidad del método a las propiedades del acuífero de manera visual y concisa.

## 5. Aplicaciones y potencial para futuras investigaciones

Los hallazgos de este trabajo abren diversas **aplicaciones y líneas futuras** para integrar el enfoque sismoeléctrico en la exploración marciana (y planetaria en general):

- **Análisis de datos reales (misión InSight):** Una aplicación inmediata es reexaminar los datos sísmicos y magnéticos ya recopilados en Marte en busca de las señales sismoeléctricas predichas. Precisamente, los autores señalan que el siguiente paso será analizar los registros de la **misión InSight** (NASA) <sup>22</sup>. InSight operó entre 2018–2022 e instaló el primer **sismómetro** en Marte, detectando numerosos martemotos y caracterizando la estructura subsuperficial hasta unos ~10 km de profundidad. Aunque InSight no detectó directamente acuíferos (cualquier agua líquida estaría más profunda de lo que su sismómetro podía discernir), el *lander* también incluía un **magnetómetro** de propósito auxiliar <sup>23</sup>. Los investigadores proponen **combinar los datos del sismómetro y del magnetómetro** de InSight para intentar extraer **señales sismoeléctricas reales** <sup>24</sup>. Esto sería un *análisis retrospectivo* innovador: buscar en los eventos sísmicos registrados indicios electromagnéticos coincidentes que delaten la presencia de interfaces saturadas en las profundidades atravesadas por las ondas. Si bien el magnetómetro de InSight no fue diseñado específicamente para este experimento, un resultado positivo validaría la técnica de forma empírica. Incluso en caso de no encontrar señales claras (por limitaciones de

sensibilidad o porque los terremotos registrados no atravesaron acuíferos), este análisis proporcionará lecciones valiosas para refinar el método.

- **Instrumentación en misiones futuras:** Mirando hacia adelante, el estudio sugiere incorporar **instrumentación sismoeléctrica dedicada** en futuras misiones a Marte. Específicamente, enviar **magnetómetros de alta sensibilidad** junto con sismómetros en próximos *landers* o redes de geofonos desplegables permitiría aplicar el método con un mayor rendimiento <sup>25</sup>. Un magnetómetro optimizado para detectar las sutiles fluctuaciones de campo previstas (y sincronizado con eventos sísmicos) podría **mejorar significativamente la relación señal/ruido**, facilitando la identificación de acuíferos profundos <sup>25</sup>. Asimismo, convendría diseñar rutinas de adquisición de datos que registren continuamente ambos tipos de señales durante y después de cada marsquake. La integración de estos sensores no requiere tecnología exótica —son instrumentos probados— y ofrecería una **capacidad de exploración adicional a bajo coste** en futuras misiones geofísicas. Por ejemplo, un próximo **lander** podría llevar un paquete combinado sismómetro+magnetómetro orientado a buscar agua; del mismo modo, una red de estaciones sísmicas en Marte (propuesta a largo plazo) debería incluir medidores EM para aprovechar este efecto.
- **Extensión a otros cuerpos planetarios:** El potencial del método sismoeléctrico trasciende Marte. Cualquier entorno planetario donde coexistan actividad sísmica y medios fluidos subsuperficiales es candidato para esta técnica. Los autores destacan su aplicabilidad para investigar los **“océanos” bajo el hielo en lunas heladas** <sup>26</sup>. Por ejemplo, un módulo de aterrizaje en **Europa (luna de Júpiter)** o en **Encélado (luna de Saturno)** podría escuchar los “hielo-motos” (sismos en la corteza helada) con un sismómetro y detectar las señales electromagnéticas generadas al paso de las ondas a través del océano líquido interno. Esto brindaría una manera de estimar el **espesor de la capa de hielo** y la profundidad del océano en esos mundos <sup>26</sup>, datos cruciales para evaluar su habitabilidad. Más en general, la técnica sismoeléctrica se perfila como una nueva herramienta dentro de la **geofísica planetaria**, hasta ahora poco explorada, con la promesa de complementar la exploración subsuperficial en escenarios donde otras técnicas (radar, gravimetría, etc.) resulten insuficientes <sup>27</sup>.
- **Desarrollos experimentales y sinergias:** A nivel de investigación, este estudio invita a profundizar en la comprensión del fenómeno sismoeléctrico en diferentes contextos. Sería valioso realizar **experimentos análogos en la Tierra** que repliquen condiciones marcianas (por ejemplo, en regiones desérticas con acuíferos profundos aislados) para **validar sobre el terreno** la detección sismoeléctrica en ausencia de ruido superficial, afinando así los métodos de procesamiento de señal. También se abre la puerta a enfoques multidisciplinarios: combinar los datos sismoeléctricos con otras técnicas remotas (p.ej., radar orbital o gravimetría) podría brindar **conjuntos de evidencias más robustos** sobre la presencia de agua. En el plano computacional, futuros trabajos podrán expandir el modelo a geometrías más complejas (terrenos fracturados, acuíferos inclinados, etc.) y explorar rangos más amplios de propiedades del fluido (viscosidad, temperaturas extremas) para simular condiciones aún más fieles a las marcianas. En suma, existe un **amplio potencial de investigación futura** encaminada a llevar esta prometedora técnica desde la simulación numérica hasta su consolidación como método estándar en la exploración planetaria.

## 6. Evaluación crítica del estudio

En general, el trabajo de Roth et al. (2024) constituye una contribución valiosa y pionera, aunque presenta también ciertos desafíos e hipótesis que deberán verificarse. A continuación, se ofrece una evaluación crítica considerando **fortalezas**, **debilidades** y **recomendaciones** para trabajos futuros:

- **Fortalezas:** El principal acierto del estudio es introducir de manera convincente un **método innovador** para resolver la problemática de detectar agua profunda en Marte. La metodología empleada es sólida, apoyada en **simulaciones físicas de alta fidelidad** (ondas sísmicas acopladas a respuestas electromagnéticas) y en un amplio **análisis paramétrico** que explora diversos escenarios <sup>15</sup>. Los resultados **subrayan el gran poder informativo** de las señales sismoeléctricas: a partir de un solo experimento pasivo se podrían inferir múltiples propiedades de un acuífero (profundidad, grosor, extensión, saturación, salinidad), algo **inédito con otras técnicas** <sup>3</sup>. Además, el estudio capitaliza inteligentemente una condición única de Marte (su subsuelo seco) para **minimizar el ruido**, lo que sugiere que la señal de un eventual acuífero sería inequívoca en ese entorno <sup>12</sup>. En suma, la investigación abre un **nuevo campo dentro de la geofísica planetaria** y lo hace construyendo un caso sólido de viabilidad, lo cual es una clara fortaleza. Cabe destacar también la **relevancia interdisciplinaria** de la propuesta: combina geofísica sísmica y electromagnética, aprovecha datos existentes de una misión (InSight) y ofrece aplicabilidad a futuras misiones, mostrando un panorama amplio de impacto científico <sup>28 27</sup>.

- **Debilidades:** Por tratarse de un estudio principalmente teórico, una evidente limitación es la **falta de validación empírica** hasta el momento. Los resultados se basan en simulaciones bajo supuestos simplificadores (estratigrafía horizontal, propiedades homogéneas en cada capa, etc.), que si bien son razonables, podrían diferir de la compleja realidad geológica marciana. No se descarta que en un contexto real las señales sismoeléctricas sean **débiles o difíciles de aislar** incluso en Marte, debido a ruidos instrumentales, interferencias ionosféricas o campos magnéticos remanentes del propio planeta que no fueron modelados. Otra posible debilidad es la **dependencia de eventos sísmicos**: la técnica requiere martemotos de magnitud suficiente y que las ondas generadas atravesasen el acuífero de interés. Si los martemotos en ciertas regiones son muy infrecuentes, o si el acuífero está ubicado de tal forma que pocos eventos lo afectan directamente, la detección podría tomar mucho tiempo o pasar inadvertida. En cuanto a instrumentación, aunque InSight proporcionó un punto de partida, su magnetómetro no fue optimizado para este propósito; los autores mismos reconocen que **se necesitaría un magnetómetro más sensible** en el futuro <sup>25</sup>. Esto implica que actualmente podríamos estar **limitados por la sensibilidad** de los datos disponibles. Finalmente, el método asume la presencia de un **acuífero definido (capa líquida discreta)**; si el agua subsuperficial marciana existe más bien como parches dispersos o en poros a baja saturación dentro de rocas, la señal sismoeléctrica generada podría ser muy tenue o indistinguible de otras heterogeneidades. En resumen, la mayor debilidad es que estamos ante un **estudio exploratorio** que aún debe contrastarse con la realidad marciana; existe incertidumbre sobre si las condiciones se alinearán para producir señales tan claras como las simuladas.

- **Recomendaciones:** Dada la promesa de esta técnica, se recomienda enfocar esfuerzos de investigación en **tres direcciones principales**. Primero, llevar a cabo la **búsqueda de señales sismoeléctricas en datos existentes** (como los de InSight) sin demora, ya que podría proporcionar la *prueba de concepto* observacional o al menos ayudar a refinar los modelos con ruido real. Segundo, incorporar el diseño de **experimentos sismoeléctricos en futuras misiones**: por ejemplo, incluir magnetómetros científicos junto a sismómetros en Marte o incluso en misiones lunares, y planificar la recolección conjunta de datos sísmicos y EM durante

eventos (tal como se discutió en la sección de aplicaciones). Esto garantizará que dispongamos de los datos adecuados para explotar este fenómeno. Tercero, realizar **estudios complementarios en la Tierra** y en laboratorio: ensayos controlados donde se genere una fuente sísmica y se midan las señales EM en presencia de acuíferos conocidos, de modo que se pueda **calibrar la respuesta sismoeléctrica** y desarrollar algoritmos robustos de filtrado y detección de señales débiles. Asimismo, futuros trabajos podrían extender el marco teórico, explorando configuraciones más complejas y evaluando el impacto de variables aún no consideradas (por ejemplo, la temperatura del agua, que en Marte podría ser salmuera cercana al punto de congelación, con efectos electrocinéticos particulares). En definitiva, la recomendación general es avanzar desde este estudio teórico pionero hacia una **fase experimental y aplicada**, validando el método in situ e integrándolo en la caja de herramientas de la exploración marciana. De tener éxito, la comunidad científica contará con un poderoso medio para “escuchar” el agua escondida en el corazón de Marte y quizás, en un futuro, en otros mundos lejanos <sup>27</sup>.

**Fuentes:** Roth, N., Zhu, T., & Gao, Y. (2024). *Characterizing Liquid Water in Deep Martian Aquifers: A Seismo-Electric Approach*. *\*JGR Planets*, 129(5), e2024JE008292 <sup>17</sup> <sup>29</sup>; Comunicados de prensa y artículos de divulgación de Penn State University <sup>30</sup> <sup>28</sup>, ScienceDaily <sup>31</sup>, Universe Today <sup>15</sup> <sup>14</sup>, EarthSky <sup>9</sup> <sup>32</sup> y Astrobitácora (esp.) <sup>11</sup> <sup>24</sup>. (Véase las referencias en línea para más detalles).

---

<sup>1</sup> <sup>3</sup> <sup>5</sup> <sup>7</sup> <sup>8</sup> <sup>10</sup> <sup>11</sup> <sup>12</sup> <sup>13</sup> <sup>22</sup> <sup>23</sup> <sup>24</sup> <sup>25</sup> <sup>26</sup> <sup>29</sup> El agua subterránea de Marte podría detectarse con terremotos — Astrobitácora

<https://www.astrobitacora.com/el-agua-subterranea-de-marte-podria-detectarse-con-terremotos/>

<sup>2</sup> <sup>4</sup> <sup>14</sup> <sup>15</sup> <sup>16</sup> <sup>17</sup> <sup>19</sup> Marsquakes Can Help Us Find Water on the Red Planet - Universe Today

<https://www.universetoday.com/articles/marsquakes-can-help-us-find-water-on-the-red-planet>

<sup>6</sup> <sup>9</sup> <sup>32</sup> To find water on Mars, listen to marsquakes

<https://earthsky.org/space/water-on-mars-aquifers-marsquakes-seismoelectrical-method/>

<sup>18</sup> <sup>20</sup> <sup>21</sup> <sup>27</sup> <sup>28</sup> <sup>30</sup> Marsquakes may help reveal whether liquid water exists underground on red planet | Penn State University

<https://www.psu.edu/news/research/story/marsquakes-may-help-reveal-whether-liquid-water-exists-underground-red-planet>

<sup>31</sup> Marsquakes may help reveal whether liquid water exists underground on red planet | ScienceDaily

<https://www.sciencedaily.com/releases/2024/06/240625204921.htm>