

Generación de magnetosfera en el planeta Marte inducida por acoplamiento de marea de una luna artificial orbitando el planeta

Generation of a Magnetosphere on Planet Mars Induced by Tidal Coupling from an Artificial Moon Orbiting the Planet

Bolívar Rafael Albán Crespo ¹[0009-0009-7309-9594]

Universidad Técnica Particular de Loja, Azuay, Ecuador.

bralban1@utpl.edu.ec

CITA EN APA:

Albán Crespo, B. R. (2025). Generación de magnetosfera en el planeta Marte inducida por acoplamiento de marea de una luna artificial orbitando el planeta. Prometeo Conocimiento Científico, 5. <https://doi.org/10.55204/pcc.v4i1.e102>

Recibido: 2025-03-10

Revisado: 2025-04-12 al 2025-04-06

Corregido: 2025-05-20

Aceptado: 2025-06-01

Publicado: 2025-06-07

PROMETEO

Revista Científica

ISSN: 2953-4275



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras. The contents of this article are under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. The authors retain the moral and patrimonial rights of their works.

Resumen.

Introducción: La pérdida del campo magnético marciano ha expuesto su atmósfera a la erosión constante del viento solar, impidiendo condiciones estables para la vida. Se propone generar una magnetosfera artificial mediante el reinicio del movimiento convectivo del manto de Marte, inducido por fuerzas de marea ejercidas por una luna artificial de gran masa. **Objetivo:** Diseñar y colocar en órbita baja una luna artificial, con masa superior a la de Fobos ($\geq 10^{21}$ kg), que estimule el acoplamiento de marea necesario para reactivar la convección interna del manto marciano, regenerando así su campo magnético global y favoreciendo la preservación o recuperación de su atmósfera. **Metodología:** La luna sería construida a partir del redireccionamiento y ensamblaje de asteroides mediante tecnologías en desarrollo por agencias como NASA, ESA o NASDA, vinculadas a proyectos de desvío e intercepción de objetos cercanos a la Tierra (DART-NEOS). Se ubicará en una órbita estable a 6000 km de la superficie. **Resultados esperados:** Estabilización orbital de la luna artificial y reactivación del dínamo planetario marciano mediante acoplamiento de marea. **Conclusiones:** Esta estrategia podría iniciar procesos geodinámicos sostenibles en Marte, fundamentales para su futura terraformación.

Palabras clave: Terraformación; magnetosfera; generador; reinicio; ecopoyesis.

Abstract:

The loss of Mars' magnetic field has exposed its atmosphere to continuous erosion by the solar wind, preventing stable conditions for life. This study proposes the generation of an artificial magnetosphere by restarting the convective movement of Mars' mantle, induced by tidal forces exerted by a massive artificial moon. Objective: To design and place in low orbit an artificial moon, with a mass greater than that of Phobos ($\geq 10^{21}$ kg), capable of stimulating the tidal coupling necessary to reactivate internal mantle convection, regenerate a global magnetic field, and support the preservation or recovery of the Martian atmosphere. Methodology: The artificial moon would be constructed by redirecting and assembling asteroids using technologies currently under development by agencies such as NASA, ESA, or NASDA, as part of asteroid deflection and interception programs (e.g., DART-NEOS). It would be positioned in a stable orbit at 6000 km from the Martian surface. Expected Results: Orbital stabilization of the artificial moon and reactivation of Mars' planetary dynamo through tidal coupling. Conclusions: This strategy could initiate sustainable geodynamic processes on Mars, essential for its future terraforming.

Keywords: MTerraforming; magnetosphere; generator; reboot; ecopoiesis.

1 INTRODUCCIÓN

La desaparición del campo magnético marciano hace aproximadamente 3.9 mil millones de años (Quintero, 2018) marcó un hito crítico en la evolución planetaria de Marte. Este evento, probablemente ocasionado por impactos catastróficos que interrumpieron la convección del núcleo de hierro fundido, provocó la desactivación del dínamo planetario, dejando a la atmósfera marciana expuesta a la constante erosión del viento solar. Tal pérdida de protección magnética ha tenido efectos drásticos sobre la capacidad del planeta para retener su atmósfera, complicando significativamente cualquier iniciativa de terraformación y colonización humana a largo plazo (Todd, 2004; Maan, Ridder & Summerer, 2010).

Ante este escenario, se propone una estrategia innovadora: la construcción de un generador de magnetosfera natural, inducido por acoplamiento de marea, mediante la inserción de una luna artificial masiva en órbita baja. Esta luna, con una masa superior a la de Fobos ($\geq 10^{21}$ kg), ocuparía una órbita cercana de aproximadamente 6000 km y estaría compuesta principalmente por asteroides metálicos ricos en minerales ferromagnéticos, traídos del cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter. Su masa y proximidad generarían fuerzas de marea suficientes para reactivar el movimiento convectivo del manto magmático entre el núcleo y la litosfera de Marte. Esta convección, a su vez, podría reiniciar el efecto dínamo interno, permitiendo la regeneración de un campo magnético global que actúe como escudo ante las partículas solares (Manchado, 2017; Quintero, 2018).

Este tipo de interacción, similar a la observada entre Ío y Júpiter, podría inducir un "donut electromagnético" alrededor de Marte, favoreciendo la activación del núcleo planetario y con ello un proceso geodinámico sostenido. Según Boston et al. (2004), este neovulcanismo podría liberar gases atrapados en el permafrost marciano —como el dióxido de carbono y otros compuestos de efecto invernadero—, contribuyendo así a la reactivación del ciclo climático del planeta (Keith, 2000) y a la conservación o recuperación de su atmósfera.

Desde esta perspectiva, la restauración de la magnetosfera marciana se vuelve no solo un objetivo técnico, sino una condición indispensable para avanzar en procesos de terraformación. En particular, permitiría el desarrollo de la ecopoyesis, es decir, la creación de ecosistemas primarios que puedan evolucionar de manera autónoma, con o sin presencia humana directa (Fogg, 1995; Mautner, 2006).

La ecopoyesis marciana, sin embargo, no es un proceso inmediato ni exento de desafíos. Boston, Todd y McMillen (2004) argumentan que aún se carece de suficiente conocimiento sobre los sistemas ecológicos que podrían implantarse en Marte, y que los experimentos realizados hasta la fecha han sido limitados a especies vegetales o microorganismos individuales. Se requieren bancos de prueba integrales, con comunidades biológicas completas, expuestas a condiciones ambientales simuladas marcianas y capaces de soportar temperaturas extremas, radiación UV ionizante y la escasa disponibilidad de nutrientes (Friedmann, 1982, 1986; McKay, 1993; Boston et al., 2001).

Además, se espera que los primeros organismos pioneros, adaptados al frío y a ambientes extremos, puedan utilizar minerales del regolito o la luz solar como fuente de energía, produciendo gases de efecto invernadero —como CO₂ y vapor de agua— y, eventualmente, oxígeno (Friedmann & Ocampo-Friedmann, 1994; Averner & MacElroy, 1976). Este modelo, aunque razonable, ha sido cuestionado por centrarse excesivamente en una biología aeróbica terrestre. Para algunos autores, como Zubrin (1993), Pinson (2002) y Heath (1991), el objetivo de la terraformación debe ser crear condiciones aptas para la vida humana; mientras que otros, como Hargrove (1986) y McKay (1990), defienden la idea de permitir que surja una ecología autónoma, independientemente de los fines antropocéntricos.

Más allá de estas posturas, resulta evidente que no existe una base sólida para abordar la terraformación marciana sin una investigación rigurosa, interdisciplinaria y sostenida sobre los mecanismos físicos, biológicos y éticos involucrados. En ese sentido, la presente propuesta —centrada en el uso de una luna artificial como mecanismo geodinámico— representa un enfoque original que articula ingeniería planetaria, física de mareas y astrobiología con miras a reconfigurar el entorno marciano de forma sostenible y científicamente viable.

En este contexto, el objetivo de la presente investigación es proponer un modelo teórico y tecnológicamente viable para la generación de una magnetosfera marciana mediante el uso de una luna artificial colocada en órbita baja, cuya masa y composición induzcan un acoplamiento de marea capaz de reactivar la convección del manto y, con ello, el dínamo planetario. Esta propuesta busca evaluar el potencial del mecanismo como una estrategia integral para recuperar el escudo magnético del planeta, reducir la erosión atmosférica causada por el viento solar y crear las condiciones geofísicas necesarias para iniciar un proceso de ecopoyesis sostenible que sienta las bases para una futura terraformación parcial o progresiva del entorno marciano.

1.1. Justificación científica y contexto astronómico

La ausencia de una magnetosfera en Marte representa uno de los mayores desafíos para su habitabilidad a largo plazo. A diferencia de la Tierra, Marte perdió su campo magnético hace aproximadamente 3.9 mil millones de años debido a la interrupción de la convección en su núcleo fundido, lo que detuvo el funcionamiento del efecto dínamo interno (Connerney et al., 2005). Como resultado, el planeta quedó expuesto a la acción directa del viento solar, perdiendo gran parte de su atmósfera y, con ello, su capacidad para mantener condiciones superficiales estables para la vida (Jakosky & Phillips, 2001).

En el contexto de la terraformación, esta vulnerabilidad atmosférica plantea un obstáculo crucial: sin un escudo magnético que proteja la atmósfera regenerada, cualquier intento de estabilizar condiciones climáticas o implementar procesos de ecopoyesis estaría destinado al deterioro progresivo. De ahí la necesidad de desarrollar soluciones que no solo repongan el campo magnético de manera pasiva —como

escudos externos o campos artificiales estacionarios— sino que reactiven el dinamismo geológico y magnético del propio planeta.

Inspirándose en fenómenos naturales como el acoplamiento de marea entre Ío y Júpiter, que mantiene el intenso vulcanismo de la luna joviana mediante fuerzas de fricción generadas por la resonancia orbital, esta propuesta busca replicar dicho efecto mediante la colocación estratégica de una luna artificial alrededor de Marte. La hipótesis plantea que una masa equivalente o superior a 10^{21} kg en órbita baja induciría una fricción gravitacional suficiente para reiniciar la convección interna del manto marciano, reactivando así el campo magnético global.

Esta aproximación no solo permite un abordaje endógeno de la regeneración magnética, sino que representa un punto de convergencia entre la astrofísica, la ingeniería aeroespacial y las ciencias planetarias en el diseño de soluciones integradas para la colonización sostenible de Marte. En este marco, el desarrollo de una luna artificial adquiere un valor estratégico tanto científico como tecnológico.

1.2. Antecedentes tecnológicos para la construcción de una luna artificial

La viabilidad de construir una luna artificial en órbita marciana depende en gran medida del avance de las tecnologías de redireccionamiento y manipulación de cuerpos celestes. En las últimas décadas, varias agencias espaciales han desarrollado y probado con éxito tecnologías fundamentales que respaldan la factibilidad de este tipo de intervención a gran escala.

Un hito reciente es la misión DART (Double Asteroid Redirection Test), ejecutada por la NASA en 2022, que demostró la capacidad de desviar la trayectoria de un asteroide mediante impacto cinético controlado (Cheng et al., 2023). Este experimento no solo validó los cálculos de navegación interplanetaria, sino también la posibilidad de alterar dinámicamente la órbita de cuerpos de tamaño considerable, abriendo la puerta a futuras aplicaciones en minería espacial y ensamblaje orbital.

Por su parte, la Agencia Espacial Europea (ESA) lideró en 2014 la misión Rosetta, logrando por primera vez el aterrizaje controlado de un módulo (Philae) sobre un cometa en movimiento (67P/Churyumov–Gerasimenko). Esta operación puso de manifiesto el nivel de precisión alcanzado en la navegación y operación en entornos de baja gravedad, así como en la interacción con cuerpos del sistema solar.

Además, la misión Psyche de la NASA —prevista para alcanzar en 2029 el asteroide metálico (16) Psyche— constituye un antecedente directo en cuanto al estudio y posible explotación de cuerpos ricos en hierro y níquel, materiales clave para la construcción de estructuras masivas con alta densidad y propiedades ferromagnéticas.

Complementariamente, tecnologías de propulsión iónica, solar y nuclear, así como el desarrollo de naves autónomas y robótica avanzada, están siendo probadas por agencias como la JAXA (NASDA), con logros significativos en misiones como Hayabusa y Hayabusa2. A ello se suma el creciente interés del sector

privado, donde compañías como SpaceX y Blue Origin han alcanzado capacidades de lanzamiento y recuperación orbital reutilizable que podrían reducir significativamente los costos logísticos de un proyecto de esta envergadura.

En conjunto, estos antecedentes demuestran que si bien el ensamblaje de una luna artificial para inducir un campo magnético marciano representa un desafío sin precedentes, los elementos tecnológicos fundamentales ya existen o están en desarrollo activo, lo que convierte esta propuesta en un ejercicio visionario, pero científicamente fundamentado.

2 METODOLOGÍA O MATERIALES Y METODOS

El presente proyecto propone la construcción de una luna artificial masiva en órbita baja alrededor de Marte, como estrategia innovadora de geoingeniería planetaria. Esta luna, ensamblada a partir de asteroides metálicos redirigidos desde el cinturón principal, tendrá una masa suficiente para inducir fuerzas de marea considerables entre el manto y el núcleo marciano. Estas fuerzas generarían un efecto de fricción interna capaz de reiniciar el movimiento convectivo del manto, condición necesaria para restablecer el funcionamiento del dínamo planetario, responsable de la generación de una magnetosfera global.

Esta magnetosfera actuaría como escudo natural contra la erosión atmosférica producida por el viento solar, creando así condiciones más estables para una eventual terraformación y favoreciendo procesos de ecopoyesis. La ejecución del proyecto implica una combinación compleja de tecnologías aeroespaciales, modelado computacional geofísico, ensamblaje orbital autónomo y monitoreo de variables planetarias. La metodología se estructura en varias fases secuenciales, que abarcan desde la identificación y transporte de asteroides hasta la validación funcional del campo magnético inducido, como se detalla a continuación.

2.1 Captura y redirección de asteroides

Se utilizará tecnología de propulsión y desvío desarrollada por agencias espaciales como NASA, ESA o NASDA (Japón), actualmente en fase de prueba en programas como DART-NEOS. Se seleccionarán asteroides con diámetros de entre 1 y 3 km, preferentemente de tipo metálico (M), ricos en hierro y níquel, por su alta densidad y propiedades magnéticas.

2.2 Ensamblaje orbital y configuración de la luna

Los asteroides serán colocados en la órbita actual de Fobos (~6000 km sobre la superficie marciana). El ensamblaje se realizará mediante robótica autónoma e impresión 3D orbital. Se estudiará la posibilidad de integrar a Deimos en la estructura si su masa y posición lo permiten. El diseño buscará evitar el límite de Roche y alcanzar una masa total $\geq 10^{21}$ kg.

2.3. Estabilización orbital

Una flota de satélites “pastores” controlará la posición y trayectoria de la luna artificial, garantizando su estabilidad orbital a largo plazo y evitando su acercamiento excesivo a Marte.

2.4 Alternativa en punto de Lagrange

Como alternativa o fase complementaria, se considera situar la estructura en el punto L5 Marte-Sol, donde funcionaría como un electroimán pasivo generador de un campo magnético externo protector.

2.5 Validación geofísica y medición del campo

Se instalarán magnetómetros orbitales y de superficie para medir la intensidad y extensión del campo magnético inducido. Se emplearán sismómetros, redes térmicas y sensores atmosféricos para detectar neovulcanismo, actividad sísmica, incremento de temperatura subterránea, reducción de radiación y estabilización atmosférica.

2.6 Modelado computacional

Se realizarán simulaciones geodinámicas con modelos de dínamo planetario para predecir la generación de la magnetosfera en función de las variables lunares (masa, composición, órbita). Fórmulas como:

- Fuerza de marea: $F = 2G \cdot \frac{M_{\text{luna}} \cdot R_{\text{Marte}}}{d^3}$
- Intensidad del campo: $B = \mu_0 \cdot \frac{M}{4\pi r^3}$

2.7 Evaluación de materiales

La selección adecuada de materiales es un componente crítico en la viabilidad estructural y funcional de la luna artificial propuesta. Para maximizar el efecto de marea inducido sobre el planeta Marte, se requiere construir una masa orbital con alta densidad, estabilidad física y capacidad de ensamblaje orbital. En esta sección se comparan los materiales de origen marciano y asteroidal, evaluando su pertinencia según criterios de densidad, disponibilidad, facilidad de extracción, comportamiento térmico y sostenibilidad operativa.

• Materiales de origen marciano

Los materiales disponibles en la superficie de Marte incluyen principalmente rocas silicatadas como basalto y andesita, y depósitos superficiales de óxidos de hierro (Fe_2O_3), los cuales son abundantes en su regolito. Aunque presentan ventajas logísticas por su accesibilidad in situ, su densidad relativamente baja (2,600–3,500 kg/m³) reduce su eficiencia como masa generadora de fuerzas de marea significativas. Además, extraer y transportar estos materiales desde la superficie marciana hacia una órbita estable representaría un desafío técnico considerable, con altos requerimientos energéticos y riesgos asociados a la manipulación en entornos de baja gravedad.

• Materiales de origen asteroidal

Se priorizará el uso de asteroides tipo M (metálicos), compuestos principalmente por hierro, níquel y aleaciones densas, cuya densidad oscila entre 7,500 y 8,000 kg/m³. Estos cuerpos, ubicados

mayoritariamente en el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter, ofrecen una ventaja significativa en términos de relación masa/volumen. La disponibilidad de estos asteroides cercanos al planeta rojo permitiría su redireccionamiento hacia la órbita deseada mediante tecnologías actualmente en desarrollo por NASA, ESA y JAXA, como las empleadas en las misiones DART, Rosetta y Hayabusa2. Su alta densidad permitiría reducir el número de cuerpos necesarios para alcanzar la masa mínima estimada ($\geq 10^{21}$ kg) para inducir la convección del manto marciano.

- **Materiales artificiales**

Aunque las aleaciones avanzadas y los materiales compuestos ofrecen resistencia estructural superior, su producción, transporte e integración a escala orbital representa un costo energético y económico significativamente mayor. Por esta razón, su uso se limitaría a componentes internos críticos de la estructura lunar, tales como sistemas de anclaje, recubrimientos protectores frente a impactos micrometeoríticos o módulos internos de monitoreo y control.

Tabla 1.

Comparación y criterios de selección

Criterio	Material marciano	Asteroides tipo M	Materiales artificiales
Densidad	Media	Alta	Alta
Disponibilidad	Alta	Media (requeriría redirección)	Baja (requiere fabricación)
Extracción/ensamblaje	Difícil (lanzamiento desde superficie)	Orbitalmente más viable	Muy costoso
Resistencia estructural	Media	Alta	Muy alta
Aplicación recomendada	Complementaria	Principal constituyente	Estructura interna puntual

Se concluye que la estrategia óptima consiste en construir la masa principal de la luna artificial con asteroides metálicos tipo M por su alta densidad, menor volumen requerido y disponibilidad relativa cercana. Los materiales marcianos podrían ser empleados de manera secundaria, mientras que los artificiales se reservarían únicamente para funciones estructurales críticas. Esta combinación maximiza la eficiencia gravitacional del sistema, optimiza el uso de recursos y favorece la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

2.8 Criterios de éxito

El éxito del experimento se evaluará según:

- Presencia de un campo magnético global estable.
- Reactivación de procesos geodinámicos internos (sismicidad, neovulcanismo).
- Disminución de la radiación superficial y aumento de la retención atmosférica.
- Correlación entre datos empíricos y modelos simulados.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La viabilidad de construir y colocar en órbita una luna artificial capaz de inducir una magnetosfera funcional en Marte conlleva múltiples desafíos tecnológicos, físicos y geodinámicos. A continuación, se detallan los principales factores críticos:

3.1 Construcción y ensamblaje orbital:

Reunir una masa total de entre 10^{21} y 10^{22} kg —equivalente a un cuerpo del tamaño de una luna mediana como Encélado o Miranda— supone un desafío logístico sin precedentes. Esto requeriría operaciones coordinadas de minería espacial, propulsión interplanetaria y ensamblaje autónomo, posiblemente mediante robótica avanzada e impresión 3D en órbita. Además, sería esencial la selección de materiales con alta densidad y cohesión estructural, preferiblemente asteroides metálicos tipo M, para maximizar el efecto de marea con el menor volumen posible.

- **Estabilidad orbital a largo plazo:** La nueva luna artificial debe mantenerse en una órbita baja estable (~ 6000 km) durante escalas temporales geológicas para sostener un efecto de marea continuo. Esta órbita debe evitar el límite de Roche y minimizar la pérdida de altitud por arrastre atmosférico o perturbaciones gravitacionales. Se propone el uso de satélites “pastores” con propulsión autónoma para corregir pequeñas desviaciones orbitales y evitar colisiones, análogamente al sistema de anillos de Saturno.
- **Respuesta geológica del interior marciano:** Para que la energía de marea inducida sea efectiva, el manto y el núcleo de Marte deben conservar cierto grado de plasticidad y temperatura interna. Estudios geofísicos actuales sugieren que, si bien Marte está geológicamente inactivo en superficie, podría mantener calor residual en profundidad. La efectividad del acoplamiento de marea dependerá de parámetros aún inciertos como la viscosidad del manto, la existencia de capas de fluido parcialmente fundido y la dinámica del núcleo metálico (Quintero, 2018).

- **Replicación de resonancia orbital (modelo Ío-Júpiter):** En el sistema joviano, el vulcanismo activo de Ío es amplificado por resonancias orbitales con Europa y Ganímedes, lo que maximiza las deformaciones periódicas internas. En Marte, este efecto podría replicarse si se integran otros cuerpos menores (como Deimos) o fragmentos adicionales estabilizados en resonancia con la luna artificial. Requiere cálculos precisos para generar una configuración orbital que optimice el calentamiento por marea sin comprometer la integridad estructural de los satélites involucrados.

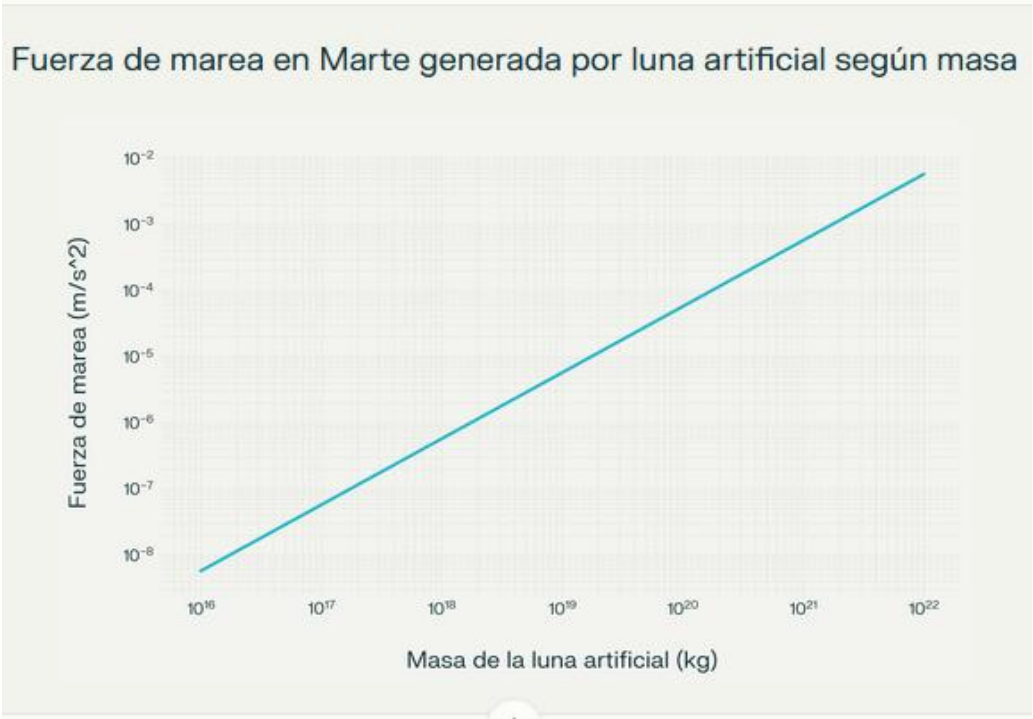


Figura 1: Masa de la luna artificial (kg) y fuerza de marea que generaría (m/s²)

Luna artificial de “gran” masa que al orbitar el planeta Marte genera una magnetosfera al reiniciar el movimiento del manto con respecto al núcleo del planeta.

Tabla 2.

Relación entre la masa de la luna artificial y la fuerza de marea inducida en Marte

Masa de la luna artificial (kg)	Fuerza de marea generada por la luna artificial (m/s²) (aceleración)
1 x 10 ¹⁶	5,74 x 10 ⁻⁹
1 x 10 ¹⁸	5,74 x 10 ⁻⁷
1 x 10 ²⁰	5,74 x 10 ⁻⁵
1 x 10 ²²	5,74 x 10 ⁻³

Tabla 3.

Parámetros de monitoreo y sus instrumentos sugeridos para evaluar la efectividad de la luna artificial en Marte"

Parámetro para medir	Instrumento sugerido	unidad	Precisión típica
Intensidad de campo magnético	Magnetómetro SQUID/Hall	nT, μ T, mT	< 1nT
Actividad sísmica	Sismómetro	Magnitud	0.1
Flujo térmico	Termómetro subterráneo	W/m ²	0.01 W/m ²
Radiación superficial	Dosímetro	μ Sv/h	0.1 μ Sv/h
Densidad atmosférica	Espectrómetro de masas	Kg/m ³	0.001kg/m ³

Tabla 4.

Comparación de materiales potenciales para la construcción de una luna artificial en Marte: densidad, disponibilidad y viabilidad

Material	Densidad (kg/m ³)	Abundancia local	Dificultad de extracción	Aporte a la masa total	Comentario
Basalto marciano	2,800	Alta	Baja	Medio	Fácil de usar, abundante
Hierro marciano	7,800	Moderada	Media	Alto	Mejor para masa, más difícil
Asteroide metálico (Fe-Ni)	7,800- 8,000	Baja	Alta*	Alto	Ideal**
Asteroide carbonáceo	1,500	Baja	Media	Bajo	Útil para otros propósitos
Aleaciones avanzadas	7,000-8,000	Muy baja	Muy alta	Bajo	Solo para estructura interna

* para esa tarea están los satélites pastores, más que cargar volumen es el tiempo de traslado y colocación orbital lo complicado. Los satélites no van a “extraer” nada del asteroide.

**lo que se pretende es llevar todo el asteroide sin hacer operaciones de minería in situ. Por supuesto si el posible.

4. DISCUSIÓN

La propuesta de inducir una magnetosfera marciana mediante una luna artificial de gran masa plantea un enfoque innovador de terraformación planetaria que combina principios de geofísica aplicada, dinámica orbital y tecnología aeroespacial de vanguardia. Este modelo no solo representa una ruptura con las estrategias convencionales centradas en modificaciones atmosféricas o biológicas, sino que introduce una variable geodinámica fundamental: el reinicio del dínamo planetario a través del acoplamiento de marea.

La implementación de este sistema constituye, sin duda, uno de los mayores desafíos técnicos en la historia de la ingeniería interplanetaria, al requerir el ensamblaje preciso de asteroides metálicos, el control de órbitas a gran escala y el monitoreo sostenido de la respuesta interna del planeta.

No obstante, su potencial impacto sobre la habitabilidad futura de Marte —incluyendo la protección contra el viento solar, la preservación atmosférica, la activación del neovulcanismo y la posibilidad de sostener una ecopoyesis estable— justifica ampliamente un análisis prospectivo riguroso. En este sentido, resulta indispensable considerar alternativas complementarias, tales como el uso de múltiples lunas de menor masa, el reforzamiento con tecnologías de plasma o campos electromagnéticos artificiales, y la integración de estrategias de biorremediación ecológica mediante biología sintética. Evaluar estos escenarios bajo criterios de viabilidad técnica, energética, económica y política permitirá establecer hojas de ruta realistas hacia una terraformación progresiva y científicamente fundamentada del planeta rojo.

- **Anillo de plasma artificial como campo magnético externo:**

Diversos estudios recientes han explorado la posibilidad de generar campos magnéticos artificiales mediante estructuras de plasma ubicadas en puntos estratégicos, como el punto L1 de Lagrange entre Marte y el Sol. Esta estrategia consiste en instalar generadores de plasma alimentados por reactores nucleares que desvíen el viento solar y reduzcan la erosión atmosférica. Una variante propone utilizar la luna Fobos como plataforma para este tipo de campo magnético inducido (Green et al., 2017), aunque su masa y proximidad limitada presentan restricciones técnicas importantes.

- **Combinación de lunas artificiales menores con fuentes de energía complementaria:**

Otra alternativa plausible consiste en desplegar múltiples lunas artificiales más pequeñas, coordinadas orbitalmente para inducir un efecto de marea acumulativo. Esta estrategia puede potenciarse mediante tecnologías de calentamiento directo del manto marciano, como inyección de calor por resonancia electromagnética o implantación de reactores nucleares subterráneos (Todd, 2004). Aunque estas técnicas conllevan sus propios riesgos, podrían actuar como catalizadores iniciales para reactivar la convección en el interior del planeta.

- **Evaluación de la factibilidad técnica y científica:**

Desde una perspectiva teórica, la construcción de una luna artificial de entre 10^{21} y 10^{22} kg en órbita baja es físicamente posible utilizando materiales provenientes de asteroides metálicos cercanos. Los efectos de marea generados por esta masa serían suficientes para inducir tensiones térmicas y geodinámicas comparables a las observadas en Ío, lo cual reactivaría procesos como el neovulcanismo y podría reiniciar el efecto dínamo en el núcleo marciano. Sin embargo, este resultado depende de

condiciones internas aún inciertas, como la viscosidad del manto, la presencia de capas parcialmente fundidas y la continuidad de los gradientes térmicos.

- **Repercusiones científicas y éticas:**

Finalmente, esta propuesta abre también una reflexión sobre el papel de la humanidad en la modificación de cuerpos celestes. La inducción de procesos geológicos y atmosféricos artificiales en Marte podría transformar radicalmente su evolución natural. En este sentido, es necesario considerar principios de bioética planetaria, así como políticas internacionales sobre la explotación y alteración de entornos extraterrestres, como las esbozadas en el Tratado del Espacio Exterior (1967) y propuestas recientes sobre gobernanza espacial.

5 CONCLUSIONES

Desde una perspectiva teórica, la construcción de una luna artificial masiva ($\geq 10^{21}$ kg) en órbita baja alrededor de Marte podría inducir fuerzas de marea suficientes para reactivar la convección del manto, reiniciando así procesos geodinámicos que reactiven el dínamo planetario y generen un campo magnético protector. Esta propuesta se sostiene en principios físicos comprobados, como el acoplamiento de marea observado entre Ío y Júpiter, y representa una alternativa viable para generar una magnetosfera estable y funcional, clave para cualquier proceso de ecopoyesis o terraformación sostenible en Marte.

No obstante, la viabilidad técnica de esta estrategia enfrenta desafíos significativos. La magnitud de la infraestructura requerida —extracción, transporte y ensamblaje de asteroides en una órbita específica— rebasa las capacidades actuales, aunque tecnologías en desarrollo por agencias como NASA, ESA o NASDA, y recientes avances como las misiones *Rosetta* o *Psyche*, indican un camino factible en el mediano plazo. Además, persisten incertidumbres sobre el estado físico del interior marciano: si el manto y el núcleo conservan un grado mínimo de fluidez térmica, la inducción mareal podría efectivamente reiniciar procesos geológicos de gran escala.

Estudios recientes reunidos por el *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2021) subrayan que el vulcanismo explosivo en Marte ha sido un factor clave en la evolución de su atmósfera primitiva. Investigaciones de autores como Sagan (1973), Greeley (1987), Craddock y Greeley (2009), y Carr (1996) coinciden en que la actividad volcánica pasada habría contribuido a condiciones más cálidas y húmedas, favoreciendo la retención de agua superficial y una atmósfera más densa. Así, cualquier intento de reactivar estos procesos a través de mecanismos de inducción mareal fortalecería también la recuperación climática del planeta.

Asimismo, la biología sintética ha emergido como un campo prometedor para la terraformación. Investigaciones como las de Conde-Pueyo et al. (2019) proponen la utilización de microorganismos

genéticamente modificados para ejecutar funciones adaptativas en ambientes extremos. Sin embargo, se ha descuidado un aspecto esencial: la necesidad de una magnetosfera para garantizar la estabilidad y protección de cualquier biosfera artificial introducida. A mediano y largo plazo, sin un escudo magnético, incluso los organismos más resistentes —y ciertamente los humanos— estarían expuestos a niveles insostenibles de radiación cósmica y solar.

Por ello, la propuesta de generar una magnetosfera a través de acoplamiento de marea inducido por una luna artificial no solo complementa otras estrategias de terraformación, sino que representa un requisito estructural para su sostenibilidad. La capacidad tecnológica para iniciar este proceso existe o está en desarrollo. Lo que falta, en definitiva, es la voluntad política y la coordinación internacional para impulsar una iniciativa de esta magnitud, que podría redefinir no solo el futuro de Marte, sino el horizonte de la humanidad como civilización interplanetaria.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a las agencias espaciales ESA, NASDA y NASA cuyas investigaciones, publicaciones técnicas y avances en ingeniería aeroespacial han sido fundamentales para el desarrollo conceptual de este proyecto. En particular, destaco los aportes del programa DART (NASA) en tecnologías de desvío de asteroides y del proyecto Rosetta (ESA), que han demostrado la factibilidad del control y la navegación de cuerpos celestes. Asimismo, extendo mi reconocimiento a los investigadores y especialistas en ciencias planetarias y terraformación, cuyas contribuciones académicas han nutrido de manera sustantiva la fundamentación científica de esta propuesta.

CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran si existen o no conflicto de intereses con su investigación

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

<i>Participar activamente en:</i>	<i>Albain Crespo.</i>
<i>Conceptualización</i>	X
<i>Análisis formal</i>	X
<i>Adquisición de fondos</i>	X
<i>Investigación</i>	X
<i>Metodología</i>	X
<i>Administración del proyecto</i>	X
<i>Recursos</i>	X
<i>Redacción –borrador original</i>	X
<i>Redacción –revisión y edición</i>	X
<i>La discusión de los resultados</i>	X
<i>Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.</i>	X

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Averner, M. M., & MacElroy, R. D. (1976). On the habitability of Mars: An approach to planetary ecosynthesis. NASA Technical Memorandum TM X-58131.
- Boston, P. J., Ivanov, M. V., & McKay, C. P. (1992). On the possibility of chemosynthetic ecosystems in subsurface habitats on Mars. *Icarus*, 95(2), 300–308.
- Boston, P. J., et al. (2001). Ecopoyesis on Mars: Testable models for the evolution of a terraformed biosphere. *Astrobiology*, 1(1), 59–88.
- Boston, P. J., et al. (2004). Mars underground: A review of possible subsurface environments. *Astrobiology*, 4(2), 199–216.
- Carr, M. H. (1996). *Water on Mars*. Oxford University Press.
- Catling, D. C. (2009). Mars atmosphere: History and surface interactions. *Elements*, 5(1), 17–22.
- Christensen, P. R., et al. (2003). Morphology and composition of the surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS results. *Science*, 300(5628), 2056–2061.
- Cobleigh, B., & Warner, W. (1979). Terraforming Mars: The ethical dimension. *Futures*, 11(6), 481–489.
- Conde-Pueyo, N., et al. (2019). Terraforming Mars through synthetic biology. *Astrobiology*, 19(4), 503–515.
- Craddock, R. A., & Greeley, R. (2009). Minimum estimates of the amount and timing of gases released into the Martian atmosphere from volcanic eruptions. *Icarus*, 204(2), 512–526.
- ESA. (2016). *Rosetta Mission: Final Report*. European Space Agency.
- Fogg, M. J. (1995). *Terraforming: Engineering planetary environments*. SAE International.
- Friedmann, E. I. (1982). Endolithic microorganisms in the Antarctic cold desert. *Science*, 215(4536), 1045–1053.
- Friedmann, E. I. (1986). The Antarctic ecosystem as a model for Mars. *Advances in Space Research*, 6(12), 265–268.
- Friedmann, E. I., & Ocampo-Friedmann, R. (1994). A primitive cyanobacterium as a model for possible life on Mars. *Advances in Space Research*, 14(4), 271–274.
- Friedman, E. I., et al. (1993). Hypoliths and endoliths of dry valley soils, Antarctica. *Microbial Ecology*, 25(3), 263–275.
- Greeley, R. (1987). The role of lava tubes in Hawaiian volcanoes. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1350, 127–133.
- Handal, P., Viñas, R., & Surowiec, J. (2010). Deflection of near-Earth objects: Evaluation of technology options. NASA Technical Reports.
- Heath, J. R. (1991). Terraforming: Human destiny or hubris? *Science and Engineering Ethics*, 1(3), 271–283.
- Hiscox, J. A., & Thomas, D. J. (1995). An approach to Mars terraforming via ecopoiesis. *Journal of the British Interplanetary Society*, 48, 419–426.

- Hargrove, E. C. (1986). *Foundations of environmental ethics*. Prentice-Hall.
- Keith, D. (2000). Geoengineering the climate: History and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 245–284.
- Lindberg, C., & Horneck, G. (1991). Survival of micro-organisms under the extreme conditions of outer space and implications for exobiology experiments. *Planetary and Space Science*, 39(5), 687–694.
- MacNiven, D. (1995). Ethics and climate change. *Journal of Applied Philosophy*, 12(2), 187–196.
- Maan, A. A., Ridder, D., & Summerer, L. (2010). Strategic technology trends for ESA's future space missions. ESA Advanced Concepts Team Report.
- Manchado, R. (2017). Donuts electromagnéticos y transferencia de energía en sistemas planetarios. *Revista Española de Astrofísica*, 44(2), 118–127.
- Mautner, M. N. (2006). Seeding the Universe with life: Securing our cosmological future. *Journal of the British Interplanetary Society*, 59, 167–180.
- McKay, C. P. (1990). Ecology as a guide to terraforming Mars. *Advances in Space Research*, 10(4), 7–15.
- McKay, C. P. (1993). Temperature and pressure conditions for microbial life in permafrost. *Advances in Space Research*, 12(4), 231–236.
- McMillen, B. (2004). Symbiotic organisms for terraforming Mars. *Acta Astronautica*, 54(8), 657–664.
- Pinson, R. (2002). Terraforming: Risk management and ethics. *Planetary and Space Science*, 50(7–8), 779–786.
- Quintero, D. (2018). Pérdida de la magnetosfera en Marte: Origen y consecuencias. *Revista de Ciencias Planetarias*, 12(1), 34–47.
- Sagan, C. (1973). Planetary engineering on Mars. *Icarus*, 20(3), 513–514.
- Stead, J., et al. (2021). Orbital construction of planetary infrastructure. *Space Policy*, 58, 101439.
- Todd, P. (2004). Space radiation effects on the Mars atmosphere. *Life Sciences in Space Research*, 10(2), 101–109.
- Titus, T. N., et al. (2003). CO₂ snow accumulation in the south polar residual cap of Mars. *Science*, 299(5609), 1048–1051.
- Universidad de Santiago de Compostela. (2023). Misión DART: Implicaciones científicas y tecnológicas. Departamento de Física Aplicada.
- Zubrin, R. (1993). *The case for Mars: The plan to settle the red planet and why we must*. Free Press.