

# Potencial del uso de microorganismos en procesos de terraformación

**Autor:** Rinardo Belmar, Víctor Alfonso (Graduado en Biología, Máster en Microbiología, Alumno Predoctoral).

**Público:** Microbiólogos. **Materia:** Microbiología y Ciencias del Espacio. **Idioma:** Español.

**Título:** Potencial del uso de microorganismos en procesos de terraformación.

## Resumen

La Terraformación constituye el conjunto de procesos hipotéticos de ingeniería planetaria encaminados a la modificación de las variables ambientales de un planeta, satélite u otro cuerpo planetario para transformarlo en habitable. En este sentido, la inoculación dirigida y meditada de microorganismos capaces de desarrollarse y prosperar bajo condiciones ambientales extremas, podrían contribuir a la modificación de estos entornos. El presente artículo recaba las principales variables ambientales a modificar durante el proceso de terraformación de un cuerpo planetario como es Marte y el potencial del uso de microorganismos en este proceso.

**Palabras clave:** ecopoiesis, Marte, microorganismos, terraformación.

**Title:** Potential for the use of microorganisms in terraforming processes.

## Abstract

Terraforming is the set of hypothetical planetary engineering processes aimed at modifying the environmental variables of a planet, satellite or other planetary body and to transform it into habitable. In this sense, the directed and meditated inoculation of microorganisms capable of developing and thriving under extreme environmental conditions, could contribute to the modification of these environments. This article collects the main environmental variables to be modified during the terraforming process of a planetary body such as Mars and the potential of the use of microorganisms in this process.

**Keywords:** ecopoiesis, Mars, microorganisms, terraforming.

Recibido 2018-06-02; Aceptado 2018-07-03; Publicado 2018-07-25; Código PD: 097003

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde sus albores, el ser humano se ha visto empujado de forma inexorable a satisfacer su sed de superación, a dar un paso que le llevase más lejos. Con la llegada de la era Espacial, el ser humano ha iniciado su viaje más largo, hacia la exploración, prospección y colonización del universo.

Este último aspecto ha sido ampliamente explotado en la literatura y filmografía de ciencia ficción, no obstante, los perjuicios derivados de una población humana creciente, y los desajustes ecológicos causados por actividades antrópicas, han motivado su interés científico (Lovelock & Allaby, 1984).

Es en los años 60 del pasado siglo, cuando en la literatura científica se plantean los primeros modelos teóricos de ingeniería que implican la modificación de un planeta, satélite u otro cuerpo planetario, encaminados a crear condiciones óptimas que permitan el establecimiento, evolución y permanencia estable de la biota terrestre transferida, así como de colonias humanas en un entorno habitable. Estos incluyen procesos físicos, químicos y/o biológicos que podrían ser útiles en la modificación de la atmósfera, temperatura y/o topografía de los mismos. A este conjunto de procesos hipotéticos de ingeniería planetaria se le conoce como terraformación, mientras que al proceso de evolución natural de un entorno previamente sin vida por la introducción deliberada de ecosistemas de tipo terrestre, se conoce como ecopoiesis (Haynes, 1990; Sagan, 1961).

En este sentido, la primera etapa de la cadena de procesos encaminados a generar una biosfera en un cuerpo planetario consiste en la inoculación dirigida y meditada de microorganismos, ya sean silvestres o modificados genéticamente, capaces de desarrollarse y prosperar bajo unas condiciones ambientales específicas. Como resultado de su versatilidad y flexibilidad metabólica y adaptativa, estos pueden intervenir de forma directa en la modificación de algunos parámetros y condiciones ambientales. Además, pueden desempeñar un papel vital en la generación de los ciclos biogeoquímicos y constituir la base para el establecimiento de los niveles ecológicos superiores una vez las condiciones ambientales fuesen similares a las de la Tierra (Boston, Todd & McMillen, 2004; Omelon 2008). Con una función doble, contribuyendo a su habitabilidad y

constituyendo el primer eslabón para el desarrollo de un sistema artificial de sucesión ecológica perdurable y autorregulado a nivel global, los microorganismos exhiben potencial de uso en procesos de terraformación.

Con la presente revisión bibliográfica se pretende recabar y presentar de forma sintética y generalista, las principales variables o componentes ambientales a modificar durante el proceso de terraformación de un cuerpo planetario en los que podrían estar implicados de forma eficaz microorganismos. Para ello, la revisión se enfocará principalmente en aquellos encaminados a la terraformación de Marte, dado su interés actual y mayor abundancia de modelos propuestos. Además, se exponen las implicaciones éticas que implica la terraformación, así como sus perspectivas de futuro.

Avanzar en la investigación y el diseño de la tecnología adecuada que permita la colonización de otros cuerpos planetarios, debe ser estimada en la medida de su importancia, pues redundaría en el beneficio y la perdurabilidad de las generaciones futuras y contribuye a la expansión de la vida en el universo.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Terraformación y Marte

Se han propuesto para su terraformación diversos planetas y satélites como son Venus, la Luna, Titán y Encélado, satélites de Saturno, las lunas de Jupiter, Europa, Calisto y Ganímedes, el planeta enano Ceres, e incluso Mercurio (Southam, Rothschild & Westall, 2007). No obstante, presentan mayores dificultades de aplicación de métodos de ingeniería planetaria eficaces o han sido poco tratados en la literatura científica.

El planeta Rojo, es por excelencia el principal cuerpo planetario candidato a ser terraformado. Esto se debe a que Marte exhibe numerosas similitudes con el planeta Tierra. En el pasado pudo albergar una atmósfera adecuada para el desarrollo de la vida, y temperaturas suaves que facilitarían la presencia de agua líquida en su superficie, hecho que responde a una localización en el límite de la región habitable del sistema Solar (McKay & Marinova, 2001; Graham, 2003).

Actualmente se conoce la presencia de grandes cantidades de agua en forma de hielo en el permafrost, justo por debajo de la superficie, hasta la latitud 60º, además también hay agua en los polos, mezclada con dióxido de carbono congelado. Por otra parte, el oxígeno molecular está presente en la atmósfera en cantidades muy bajas, pero se encuentra en grandes cantidades en los óxidos metálicos de la superficie, y en el suelo en forma de nitratos que podrían ser liberados mediante procesos químicos o biológicos. Por otro lado, Marte es uno de los planetas que, junto a Venus, presentan mayor proximidad a la Tierra, por lo que, a escalas temporales a corto y medio plazo, la tecnología puede aportar las herramientas necesarias para su terraformación, salvando las dificultades técnicas que supondría viajar a otros cuerpos planetarios más lejanos (Levin, 2003).

También presenta una serie de desventajas. Su gravedad es tan solo el 38% de la terrestre. Esto podría dificultar el retener la atmósfera y generar problemas de salud. En segundo lugar, la ausencia de magnetosfera impide mitigar la radiación solar y mantener la atmósfera. Por otro lado, la atmósfera marciana es delgada, lo que hace que la presión en la superficie sea muy baja (0.6 kPa) comparada con la de la Tierra (101.3 kPa). Además, la composición de gases difiere de la terrestre, con un 95% de CO<sub>2</sub>, 3% de nitrógeno, 1.6% de argón y pequeñas cantidades de oxígeno, agua y metano (Fogg, 1998).

### 2.2. Potencial de los microorganismos en terraformación

En definitiva, la terraformación de Marte implicaría dos grandes cambios que están relacionados: generar una atmósfera y calentarla. En este proceso a gran escala, los microorganismos podrían contribuir mediante diferentes estrategias a la modificación de parámetros que contribuyan a su habitabilidad. Las primeras ideas teóricas para terraformar Marte mediante el uso de biota terrestre modificada genéticamente aparecen en un artículo publicado en 1973 en la revista *Icarus*, donde el astrónomo Carl Sagan proponía la utilización de estos con el objetivo de reducir el albedo del planeta Rojo y de esta forma, transferir una mayor cantidad de radiación solar a la superficie, y evitar que se refleje de nuevo al espacio. Esta posibilidad, aunque exótica, abrió paso al desarrollo de otros enfoques que contemplasen con mayor profundidad su potencial de uso.

Boston, Todd y McMillen (2004), proponen como uno de los primeros pasos en la ecoepoiesis de Marte, el uso de microorganismos capaces de derivar autotróficamente el contenido inorgánico mineral del regolito y/o luz solar permitiendo un metabolismo que incrementara los gases de efecto invernadero. Esto permitiría el engrosamiento y calentamiento de su atmósfera. Este proceso se lograría mediante la siembra de organismos quimioautótrofos y fotoautótrofos anhidrobióticos o criófilos capaces de desarrollarse en las condiciones adversas de Marte. De forma paralela,

serían necesarios organismos capaces de resistir la elevada radiación UV que llega a la superficie planetaria. Organismos modificados genéticamente y otros silvestres como *Deinococcus radiodurans*, capaces de tolerar altas radiaciones UV, concentraciones elevadas de sal y fuerte desecación, sería propuestos para colonizar la superficie marciana en sus primeras fases de ecopoiesis (Rothschild & Cockell, 1999). No obstante, incluso una delgada capa de regolito sería capaz de absorber dicha radiación, por lo que la ecopoiesis, en sus primeros estadios, podría ser llevada a cabo también en un hábitat subsuperficial. Además, se podría hacer uso de arqueas metanógenas como acción complementaria a la producción de CO<sub>2</sub>, pues el CH<sub>4</sub> tiene un efecto invernadero 20 veces superior al del CO<sub>2</sub>.

Una vez fuese incrementándose la temperatura por la acción de estos microorganismos, el CO<sub>2</sub> presente en los polos y absorbido en el regolito marciano, sublimaría a gas debido al calentamiento global, incrementaría así la presión atmosférica a 30 kPa (0.30 atm), lo que eliminaría la necesidad de usar trajes presurizados.

Por otro lado, sería necesario aumentar los niveles de O<sub>2</sub> de la protoatmósfera. Si se siguiera la sucesión propuesta a la aparición de una atmosfera aerobia en la Tierra, serían necesarias en unas primeras etapas cianobacterias capaces de generar oxígeno en esta atmósfera emergente. El cultivo de fitoplancton, como las algas microscópicas *Microcalens spp.* y *Escillatoria spp.* que presentan una elevada productividad (100 mgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/día) capaces de crecer en arena bajo condiciones extremas o cianobacterias como las del género *Lyngbya*, podrían contribuir a convertir el CO<sub>2</sub> disuelto en oxígeno (Boston, Todd & McMillen, 2004; Morais, 2004; Rothschild & Cockell, 1999). Merece una especial mención la cianobacteria, *Chroococciopsis*, (Graham, 2003). La importancia de este microorganismo criptoendolítico radica en que representa un tipo de cianobacteria primitivo, probablemente muy similar a las que contribuyeron a la formación de una atmosfera aerobia terrestre. Del mismo modo, presenta una amplia variedad de ambientes extremos en los que es capaz de mantenerse viable y desarrollar su metabolismo, como son la extrema aridez, salinidad, altas concentración de nitrato, y tanto altas como bajas temperaturas. Estas características harían de este microorganismo una excelente elección como pionero a la hora de colonizar las rocas de la superficie de Marte (Friedmann & Friedmann, 1995).

Estas primeras etapas de colonización microbiana permitirían en desarrollo posterior de briófitos y líquenes, los cuales serían escogidos por su capacidad para resistir la elevada radiación y contribuir al incremento de O<sub>2</sub>. Esto facultaría el establecimiento final de plantas vasculares que terminarían de asentar las primeras fases del ecosistema.

Por otro lado, la actividad de estos microorganismos, junto a determinados procesos fotoquímicos, serían encargados del funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos en Marte (Thomas, 1995). El ciclo del carbono sería llevado a cabo por microorganismos fotosintéticos que utilizarían el CO<sub>2</sub> atmosférico y, eventualmente, microorganismos heterótrofos devolverían dicho CO<sub>2</sub> a la atmósfera mediante respiración. El oxígeno provendría de la fotosíntesis de cianobacterias y algas en un inicio y, posteriormente, por el desarrollo de organismos fotosintéticos superiores. Por otro lado, dado que no hay suficiente nitrógeno en la atmósfera de Marte, pero sí en el regolito en forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sería necesario un proceso de desnitrificación llevado a cabo por organismos desnitrificadores entre los que se proponen especies de los géneros *Pseudomonas* y *Alcaligenes* (Birch, 1992). Posteriormente serían necesarios procesos de fijación de nitrógeno llevados a cabo por organismos como *Paenibacillus polymyxa* (Hiscox & Thomas, 1995). Algunos aspectos sin resolver son referidos a la pérdida de compuestos como el fosfato junto a otros minerales no volátiles como el hierro, manganeso y magnesio, cuya pérdida podría suponer un problema para desarrollar y mantener un ecosistema de forma estable (Thomas, 1995).

En el caso de Venus, se proponen algunos aspectos principales a tener en cuenta para hacer dicho planeta habitable: reducir la temperatura de la superficie, eliminar la mayor parte de la atmósfera, añadir oxígeno a la atmósfera y reducir la duración del día a 24 horas.

Una vez más, Carl Sagan, fue pionero al publicar un artículo en la revista *Science* en 1961 titulado "*The Planet Venus*" donde imaginaba cultivar la atmósfera de Venus con algas, capaces de absorber el CO<sub>2</sub> y reducir el efecto invernadero. Posteriores estudios reflejaban que el planeta presentaba una atmósfera demasiado densa, y que, de ser las algas capaces de prosperar en dicho ambiente árido, todo el carbono que se fijara en forma orgánica sería liberado como CO<sub>2</sub> tan pronto como cayera a las regiones calientes inferiores.

En la actualidad no se han desarrollado estrategias teóricas para solventar estas limitaciones utilizando microorganismos. Sin embargo, se podría proponer utilizar bacterias modificadas genéticamente capaces de fijar carbono y convertirlo en compuestos orgánicos que redujesen la densa atmósfera de CO<sub>2</sub> presente en Venus. El problema aquí radica en la ausencia de H<sub>2</sub>, lo que dificultaría dicha fijación.

### 2.3. Aspectos éticos

La distinción entre 'vida' y 'naturaleza', son dos aspectos que en la Tierra están vinculados y cuya distinción ha sido meramente ortográfica hasta hace poco (McKay & Marinova, 2001). No obstante, cuando nos aventuramos más allá encontramos mundos que, aparentemente, carecen de vida. Es por eso que la distinción entre ambos términos se convierte en algo necesario cuando exploramos planetas como Marte o Venus, y es entonces cuando surge el dilema: ¿Debemos 'preservar' la naturaleza extraterrestre que pudiésemos encontrar o, por el contrario, es legítima la introducción de 'vida' terrestre en base al beneficio reportado para el ser humano? Este dilema surge a partir del descubrimiento de un planeta sin vida. Pero, ¿Cómo deberíamos proceder ante el descubrimiento de vida autóctona? Si bien el dilema parece mantener su estructura, las connotaciones son distintas, ya que no es lo mismo 'poblar' un planeta inerte que 'sustituir' la vida, por ejemplo, marciana, por vida terrestre.

La principal pregunta que debemos responder entonces es la siguiente: ¿Es moralmente correcto terraformar otros planetas? Encontramos frente a esto varias posturas opuestas. Una de ellas defiende el derecho del ser humano a modificar el Universo en tanto en cuanto le sea necesario. Es una postura antropocéntrica que justifica la transformación de otros ambientes de la misma manera que ha transformado la Tierra. La otra postura se denomina ecocentrista o biocentrista y defiende la preservación de otras formas de vida y 'tipos de naturaleza' distintos a los que podemos encontrar en la Tierra. Una postura alternativa e intermedia entre ambas defendería que "la terraformación sería aceptable sólo si podemos asegurar que el planeta no contiene ninguna forma de vida." De haberla, entonces se podría transformar el planeta de manera que se ayudara a dichas formas a desarrollarse y cohabitar con el ser humano (Schwartz, 2013).

### 2.4. Estado del arte y perspectiva

Aunque a día de hoy no existen proyectos de terraformación que impliquen el uso de microorganismos, NASA tiene planteados dos proyectos experimentales que, de resultar exitosos, permitirán un proceso de industrialización para la obtención de agua en la Luna y  $O_2$  en Marte mediante métodos no biológicos. El proyecto RESOLVE plantea mantener en 2018 un rover en la Luna que extraiga tanto hidrógeno como oxígeno y vapor de agua de la superficie, permitiendo así la generación de agua mediante la combinación de  $H_2$  y  $O_2$ . Por otro lado, un proyecto similar plantea enviar un rover en 2020 a Marte, que extraiga el  $CO_2$  de la atmósfera, filtre el polvo y procese dicha molécula para la obtención de oxígeno (Captain *et al.*, 2009).

En la actualidad se está estudiando el potencial de apoyo que podrían presentar los microorganismos en el mantenimiento de recintos habitables en otro planeta. Estos sistemas, son recogidos bajo un concepto menos ambicioso que el de terraformación, conocido como paraterraformación. Por otro lado, existe un gran interés por parte de las agencias espaciales en la investigación y desarrollo de los llamados Sistemas de Soporte de la Vida (*Life Support Systems*). Un conjunto de subsistemas biológicos y de ingeniería coordinados para permitir la vida en un ambiente extraño y hostil de forma sostenida. Eso significa la capacidad de producir biomasa comestible, purificar el agua, regenerar el oxígeno y reciclar los residuos, procesos donde los microorganismos cobrarían un papel vital (Holubnyak & Rygalov, 2009).

## 3. CONCLUSIONES

En el deseo y necesidad del ser humano por colonizar otros mundos, se han propuesto algunos planetas y satélites candidatos para su terraformación, siendo el que exhibe mayor número de modelos teóricos propuestos el planeta Marte, candidato por excelencia dadas sus características planetarias.

Aunque nuestro conocimiento sobre Marte y otros cuerpos planetarios ha aumentado drásticamente, todavía es limitada. Además, carecemos de la tecnología y protocolos de actuación necesarios para llevar a cabo un proceso de terraformación.

Si bien es cierto que el uso de microorganismos como único mecanismo de terraformación no parece inicialmente una medida considerada, es una parte esencial en los procesos de ecopoiesis, en los cuales, la ecología y biología sintética pueden aportar fórmulas que conviertan su uso en una realidad futura. Futuras investigaciones deben encaminar sus esfuerzos al desarrollo de microorganismos modificados genéticamente, ya sea para potenciar sus capacidades naturales para desarrollar sus actividades metabólicas bajo condiciones hostiles, o la producción dirigida de microorganismos que sean capaces de desarrollarse bajo condiciones ambientales extremas específicas (Saei, Omid & Barzegari, 2013).

Una de las dificultades a las que se enfrenta estos estudios, es la imposibilidad de hacer estudios empíricos y probar la capacidad de los microorganismos propuestos en condiciones simuladas a las planteadas. Una vez solventadas, los microorganismos pueden cobrar un interés firme como herramienta en procesos de terraformación.

En cuanto a los aspectos éticos, la terraformación no debe considerarse derivada de una conducta humana destructiva del planeta Tierra, si no entenderla como medio para alcanzar un desarrollo sostenible ante una población humana creciente. De no ser así, sería inadecuado invertir en el desarrollo de nuevos ecosistemas en otros planetas, descuidando preservar ecosistemas ya existentes y cayendo en conductas que llevarían a un mismo escenario de caos ambiental y social de forma cíclica.

Hoy nos hallamos sumidos en la víspera de un nuevo amanecer, “el gran logro” de la expansión humana. En un futuro, el avance tecnológico facultará, si los principios éticos lo permiten, la terraformación y/o el establecimiento de colonias marcianas, solucionando el detrimento de recursos naturales ante una población creciente. Es imperativo, por tanto, avanzar en la investigación y exploración del universo, como pieza clave para esclarecer sus enigmas y con miras de rendir en el beneficio y la perdurabilidad de las generaciones presentes y futuras.

### Bibliografía

- Boston, P.J., Todd, P y McMillen, K.R., “Robotic Lunar Ecopoiesis Test Bed: Bringing the Experimental Method to Terraforming”. *American Institute of Physics*. 2004. Vol. 699, pp. 975–983.
- Captain, J., Quinn, J., Moss, T. y Weis, K. “RESOLVE’s Field Demonstration on Mauna Kea, Hawaii 2010”, *AIAA Space 2010 Conference*, Sept. 1, 2010, Anaheim, CA., USA.
- Fogg, M.J. “Terraforming Mars: A Review of Current Research”. *Advances in Space Research*. 1998. Vol 22, nº 3, pp. 415-420.
- Friedmann, E.I. y Friedmann, R.O. “A primitive cyanobacterium as pioneer microorganism for terraforming mars”. *Advances in Space Research*. 1995. Vol. 15, pp. 243–246.
- Graham, J.M. “Stages in Terraforming of Mars: the Transition to Flowering Plants”. *American Institute of Physics*. 2003. Vol. 654, pp. 1284–1291.
- Haynes, R.H. “Etablierung von Lieben auf dem Mars durch gerichtete Panspermie: Technische und ethische Probleme der Okopoese”, *Biologisches Zentralblatt*. 1990. Nº 109, pp. 193-205.
- Hiscox, J.A y Thomas, D.J. “Genetic Modification and Selection of Microorganisms for Growth on Mars”. *Journal of the British Interplanetary Society*. 1995. Vol. 48, pp. 419–426.
- Holubnyak, Y. y Rygalov, V. “Theoretical Analysis of Stability for Hybrid Life Support Systems with Catalytic Incineration of Deadlock Products (Experiences with Russian BIOS-3 Project)”. *SAE Technical Paper*. 2009.
- Levin, G.V. “Odyssey gives evidence for liquid water on Mars”. *Instruments, Methods and Missions for Astrobiology VII*. 2003. Vol. 5163.
- Lovelock, J.B. y Allaby, M. 1984. *The Greening of Mars*. Warner Books, Inc., 666 Fifth Ave., Nueva York, 215 pp.
- Morais, A. “Use of Gravity Simulator in the International Space Station for Mars Terraformation”. *American Institute of Physics*. 2004. Vol 699, nº1, pp. 961-966.
- Omelon, C.R. “Endolithic Microbial Communities in Polar Desert Habitats”. *Geomicrobiology Journal*. 2008. Vol 25, nº7-8, pp. 404-414.
- Rothschild, L.J. y Cockell, C.S. “Radiation: microbial evolution, ecology, and relevance to Mars missions”. *Mutation Research*. 1999. Vol. 430, pp. 281–291.
- Saei, A.A., Omid, A.A. y Barzegari, A. “Screening and genetic manipulation of green organisms for establishment of biological life support systems in space”. *Bioengineered*. 2013. Vol. 4, pp. 65–71.
- Sagan, C. “The planet Venus”. *Science*. 1961. Vol. 133, nº 3456, pp. 849-858.
- Sagan, C. “Planetary Engineering on Mars”. *Icarus*. 1973. nº 20, pp. 513-514.
- Schwartz, J.S.J. “On the moral permissibility of terraforming”. *Ethics & The Environment*. 2013. Vol. 18, pp. 1–34.
- Southam, G., Rothschild, L.J. y Westall, F. “The Geology and Habitability of Terrestrial Planets: Fundamental Requirements for Life”. *Space Science Review*. 2007. Vol. 129, pp. 7-34.
- Thomas, D.J. “Biological Aspects of the Ecopoiesis and Terraformation of Mars: Current Perspectives and Research”. *Journal of the British Interplanetary Society*. 1995. Vol. 48, pp. 415–418.