

Química más allá de la Tierra: catálisis homogénea rumbo a Marte

Nuria Fernández Díaz y Leonor Delgado Harriero.

Este trabajo explora el papel de la catálisis homogénea en la generación de oxígeno, agua y combustibles a partir de los recursos disponibles en Marte y la Luna. Se analiza cómo las condiciones extremas del espacio influyen en los mecanismos catalíticos y qué adaptaciones estructurales serían necesarias para mantener su actividad. Los avances en este campo podrían ser esenciales para el desarrollo de sistemas autosuficientes que faciliten la colonización humana fuera de la Tierra.

Palabras Claves— Catálisis, Colonización, Complejos metálicos, Marte, Oxígeno.

1. INTRODUCCIÓN

La catálisis homogénea es un proceso en el que el catalizador y los reactivos comparten la misma fase, acelerando reacciones de forma eficiente y selectiva sin consumirse.

Su importancia en la química moderna radica en la sostenibilidad y precisión que permite en procesos complejos, lo que la hace especialmente útil en entornos extraterrestres donde los recursos son limitados. Un ejemplo destacado es MOXIE, un dispositivo del tamaño de una batería de coche que "respira" dióxido de carbono de la atmósfera marciana y lo convierte en oxígeno, suficiente para cubrir las necesidades respiratorias de la tripulación y como oxidante de combustible para vehículos de ascenso. Aprovechando recursos in situ, se reduce la dependencia de suministros desde la Tierra, haciendo las expediciones más sostenibles.

MOXIE demuestra que es posible generar gran parte del propelente necesario para misiones humanas en Marte, y su desarrollo, liderado por el Laboratorio de Propulsión de la NASA, abre camino a futuras tecnologías químicas avanzadas. Este trabajo plantea cómo la catálisis homogénea podría transformar el dióxido de carbono y el agua marciana en productos útiles, acercando la colonización sostenible del planeta rojo.

2. SISTEMAS CATALÍTICOS Y SU FUNCIONAMIENTO

2.1. Catálisis homogénea y su funcionamiento

En la catálisis homogénea, el catalizador y los reactivos se encuentran en la misma fase (generalmente fase líquida), lo que favorece el contacto entre ellos y favorece la reacción.

En este tipo de catálisis, el catalizador suele ser un metal de transición o un complejo metálico disuelto en el mismo medio que los reactivos. Se emplean con frecuencia metales como el Rutenio, Níquel, Hierro y Cobalto, los cuales son muy eficaces ya que pueden cambiar fácilmente de estado de oxidación y formar complejos metálicos con distintas moléculas.

La principal diferencia de este tipo de catálisis con la catálisis heterogénea es que en esta última, los reactivos y el catalizador están en diferentes fases.

En la catálisis heterogénea es más fácil de separar al final de la reacción, la homogénea destaca por su mayor control y selectividad

2.2. Condiciones extremas en Marte y la Luna.

Las condiciones físicas en Marte y la Luna son extremadamente hostiles para la química convencional. En Marte, la presión es de aproximadamente 0.6 kPa, la atmósfera está formada principalmente por dióxido de carbono y las temperaturas varían entre -125 y 20 °C.

En la Luna, la ausencia de atmósfera provoca grandes fluctuaciones térmicas, con extremos de frío y calor. Estos factores afectan directamente a los catalizadores homogéneos, pudiendo causar desactivación, degradación y daños por radiación.

Estudios del Instituto Max Planck han simulado estas condiciones usando catalizadores de Ni, Fe y Co, mostrando que algunos complejos logran mantener su actividad. Estos resultados demuestran que, con modificaciones adecuadas, los catalizadores homogéneos podrían funcionar incluso en entornos de baja presión y temperaturas extremas.

2.3 Catalizadores homogéneos resistentes a condiciones extraterrestres

La adaptación de los catalizadores es clave para mantener su actividad en condiciones extremas. Los ligandos pincer, que rodean y estabilizan al metal central, aumentan la resistencia de los complejos frente a desactivación y degradación. Entre las estrategias más efectivas se encuentran el encapsulamiento, el uso de líquidos iónicos como medio de reacción y el refuerzo estructural de los ligandos para proteger el centro metálico.

Un ejemplo reciente de la Universidad de Tokio (2023) muestra que complejos de Ru con ligandos pincer pueden convertir eficientemente CO₂ en formiato, incluso bajo condiciones desafiantes. Estas modificaciones resultan especialmente relevantes para entornos como Marte, donde la baja presión y la radiación intensa pueden comprometer la estabilidad de los catalizadores. Estos resultados sugieren que los catalizadores homogéneos pueden optimizarse para entornos extraterrestres mediante modificaciones en sus ligandos, permitiendo reacciones más selectivas y estables.

3. Avances científicos hasta el momento

3.1 Aplicaciones potenciales

La principal aplicación sería la producción de oxígeno, inspirada en MOXIE pero utilizando catálisis homogénea. MOXIE utiliza una pila de electrólisis de óxido sólido para separar el dióxido de carbono en oxígeno y monóxido de carbono.

Utilizando la catálisis inspirada en MOXIE, obtendríamos: **Electrocatalisis de CO₂**: la clave es usar catalizadores para facilitar la descomposición del CO₂ en O₂ y CO que puede ser combustible.

Electrólisis a alta temperatura: MOXIE es un ejemplo de SOEC, en la Tierra se investigan SOECs más eficientes para procesos industriales usando la energía de fuentes renovables para dividir el CO₂ de fuentes industriales.

A partir de la producción de oxígeno, se investigan catalizadores moleculares de iridio o complejos organometálicos en fase líquida para liberar hidrógeno de portadores como el ácido fórmico, que luego podría reaccionar con el oxígeno de MOXIE para formar agua.

Table 1. Seven oxygen-producing cycles successfully completed by MOXIE in 2021. Sols are martian days, counted from Perseverance landing on 18 February 2021 (sol 0). "FM" refers to the flight model of MOXIE, on Mars, to distinguish from Earth-based engineering model (EM), on which all runs are verified before being executed on the FM.

| Run | Mission (sol) | Date | Time | Pressure (Pa) | Temperature (K) | Duration of O ₂ production (min) | O ₂ produced (g) | O ₂ total (g) |
|---------|---------------|------------------|-------|---------------|-----------------|---|-----------------------------|--------------------------|
| FM OC9 | 60 | 20 April 2021 | Night | 751 | 201 | 59 | 5.4 | 5.4 |
| FM OC10 | 81 | 12 May 2021 | Night | 768 | 199 | 74 | 6.9 | 12.3 |
| FM OC11 | 100 | 1 June 2021 | Day | 757 | 256 | 71 | 6.9 | 19.2 |
| FM OC12 | 155 | 27 July 2021 | Night | 737 | 201 | 96 | 8.9 | 28.1 |
| FM OC13 | 176 | 17 August 2021 | Night | 720 | 199 | 82 | 8.1 | 36.2 |
| FM OC14 | 241 | 24 October 2021 | Night | 651 | 206 | 73 | 6.9 | 43.1 |
| FM OC15 | 276 | 29 November 2021 | Day | 631 | 253 | 74 | 6.8 | 49.9 |

Figura 1. Tabla de ciclos de producción completados

3.2. Eficiencia de los experimentos.

El experimento MOXIE, enviado por la NASA a Marte en 2021, ha demostrado la capacidad de producir oxígeno directamente en la atmósfera marciana a partir del dióxido de carbono. Hasta ahora, ha generado hasta 122 gramos de oxígeno, suficiente para que un perro pequeño respire durante una hora, alcanzando una pureza de 98% en su mejor rendimiento.

MOXIE separa el oxígeno del monóxido de carbono y mide su pureza antes de liberarlo, operando a temperaturas cercanas a 800 °C gracias a su diseño con aerogel y oro, que protege sus componentes internos.

El éxito de MOXIE confirma que es posible aprovechar recursos locales en Marte, reduciendo la necesidad de transportar oxígeno desde la Tierra. Aunque no habrá una secuela directa, los resultados permiten planear dispositivos más grandes y eficientes, marcando un paso decisivo hacia la sostenibilidad y autonomía de la exploración marciana.

CONCLUSIONES

La catálisis homogénea se perfila como una herramienta esencial para la química del futuro, capaz de acelerar reacciones de manera eficiente y selectiva incluso en entornos extremos como Marte o la Luna. Investigaciones demuestran que es posible aprovechar los recursos locales para cubrir necesidades vitales y reducir la dependencia de suministros desde la Tierra.

Las investigaciones sobre la estabilidad de catalizadores bajo baja presión, radiación y temperaturas extremas evidencian que se puede mantener la actividad catalítica en condiciones hostiles. Estos avances confirman que la catálisis homogénea puede adaptarse para funcionar de manera estable y selectiva en entornos extraterrestres, transformando recursos en productos útiles.

Así, la química avanzada no solo mejora procesos en la Tierra, sino que se convierte en un motor estratégico para la sostenibilidad, la exploración y la futura colonización de Marte, abriendo un horizonte donde la transformación de recursos locales permitirá misiones humanas más eficientes, autónomas y sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan su agradecimiento a todos los lectores por su atención e interés en el tema, así como a la Universidad de Huelva por brindar un espacio destinado a la divulgación de proyectos científicos y a la difusión de información de interés.

REFERENCIAS

- [1] nasa – moxie (mars oxygen in-situ resource utilization experiment) on perseverance. Información general y resultados del experimento de generación de oxígeno en marte.
<https://www.nasa.gov/solar-system/nasas-oxygen-generating-experiment-moxie-completes-mars-mission/>
<https://science.nasa.gov/resource/mars-oxygen-isru-experiment-instrument-for-mars-2020-rover-is-moxie>
- [2] j.s. dalton, applied homogeneous catalysis with organometallic compounds, wiley, capítulos sobre catálisis homogénea y catálisis por metales de transición, 2002.
- [3] g. Van koten, k. Kirchner, m. E. Moret (eds.), metal–ligand cooperativity: catalysis and the pincer metal platform, topics in organometallic chemistry, springer, 2021.
- [4] f.j. gómez, “pincer complexes: applications in catalysis,” scielo, 2004.
- [5] r.s. nicole, “recent progress with pincer transition metal catalysts for homogeneous catalysis,” catalysts, vol. 10, nº 7, 2020.
- [6] j.s. dalton, “synthesis of a redox-active nnp-type pincer ligand and its application to electrocatalytic CO_2 reduction,” frontiers in chemistry, 2019.
- [7] wikipedia – homogeneous catalysis. https://en.wikipedia.org/wiki/homogeneous_catalysis



Nuria Fernández Díaz y
Leonor Delgado Harriero
Grado en Química

4º Curso

Asignatura: Introducción a la
Catálisis Homogénea