

# Moléculas orgánicas en el medio interestelar —desde la astronomía a la bioquímica—

## Complex organic molecules —From astronomy to biochemistry—

ABRAHAM URZÚA C. 

Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.

**Autor de correspondencia:** Abraham Isaías Urzúa Castro

Correo: abraham.urzua.c@gmail.com

### RESUMEN

A la fecha se han descubierto cerca de 250 moléculas en el medio interestelar o en las regiones circunestelares, siendo muchas de estas, moléculas orgánicas complejas (COMs). La región donde se han descubierto gran parte de estas moléculas es la nube molecular de Sagitario B2 (Sgr B2), región más rica en moléculas de la Vía Láctea. Se han detectado moléculas de diferentes tipos como iones moleculares, radicales, moléculas en anillo y moléculas estables. Algunas de estas se forman por química en fase gaseosa y otras en la superficie de los granos de polvo interestelar. La detección de estas moléculas se ha logrado por medio de radiotelescopios en longitudes de onda milimétrica y submilimétrica. Se han detectado varias moléculas de interés biológico como precursores de azúcares, nucleobases, aminoácidos, fosfolípidos y hasta una molécula quiral. El descubrimiento de moléculas orgánicas complejas en el espacio no solo contribuye a entender la composición y evolución química del universo, sino que apoya la hipótesis de la “entrega exógena” en el origen de la vida.

**Palabras claves:** molécula orgánica, medio interestelar, astroquímica, astrobiología, origen de la vida.

### ABSTRACT

To date, about 250 molecules have been discovered in the interstellar medium or circumstellar shells, many of these are complex organic molecules (COMs). The region where a large part of these molecules have been discovered is the molecular cloud of Sagittarius B2 (Sgr B2), the region richest in molecules in Milky Way. Molecules of different types such as molecular ions, radicals, ring molecules and stable molecules have been detected. Some of these are formed by gas phase chemistry and others on the surface of interstellar dust grains. The detection of these molecules has been achieved by radiotelescopes at millimeter and submillimeter wavelengths. Several molecules of biological interest have been detected as precursors of sugars, nucleobases, aminoacids, phospholipids and even a chiral molecule. The discovery of complex organic molecules in space not only contributes to understanding the chemical composition and evolution of the universe, but also supports the hypothesis of “exogenous delivery” at the origin of life.

**Keywords:** organic molecule, interstellar medium, astrochemistry, astrobiology, origin of life.

## Introducción

El origen de la vida en la Tierra es una de las mayores incógnitas de la humanidad que hasta ahora no tiene respuesta. Sin embargo, en general se acepta que el origen de la vida es el resultado de la evolución química de moléculas orgánicas en la Tierra primitiva. Los resultados del famoso experimento de Miller y Urey en 1953 demostraron que algunas moléculas orgánicas prebióticas (aquellas relacionadas con el origen de la vida, por ejemplo, aminoácidos) se pueden formar a partir de moléculas más simples simulando las condiciones de una atmósfera primitiva compuesta principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) en ausencia de oxígeno (Mc Collom, 2013). Sin embargo, hoy se piensa que en la atmósfera primitiva predominaba más bien nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) lo que limita la formación de moléculas prebióticas en esas condiciones y abre nuevas posibilidades respecto al origen de éstas. Una de las hipótesis es la “entrega exógena” que sugiere que estas moléculas pudieron formarse en el espacio y posteriormente transportadas a la Tierra primitiva a través de cometas, asteroides, meteoritos y partículas de polvo interplanetario (Ohishi, 2019). Esta idea fue apoyada con el descubrimiento de las primeras moléculas orgánicas en el medio interestelar (Ohishi, 2016). La primera de estas fue  $\text{H}_2\text{CO}$  detectada en 1969. Luego, desde la década de los 70's hasta el día de hoy se han descubierto una gran variedad de moléculas orgánicas complejas (COMs, definidas como aquellas que tienen 6 o más átomos). Conocer por ejemplo cómo y dónde se originan las COMs puede ayudar a responder a la pregunta del origen de la vida. En este artículo se responderá a preguntas fundamentales sobre las COMs descubiertas en el medio interestelar, considerando

conceptos de astronomía hasta bioquímica, con especial énfasis en aquellas COMs de interés biológico, tales como precursores de azúcares, aminoácidos, nucleobases y fosfolípidos, los cuales se podrían relacionar con el origen de la vida.

## El medio interestelar

El medio interestelar (ISM) es el gas y polvo que llena el vacío entre los sistemas estelares en las galaxias (Snell, 2011). Debido a que el gas y polvo no se distribuyen de manera uniforme, el ISM presenta regiones con distinta densidad, temperatura y estado de ionización. El gas está compuesto mayoritariamente por hidrógeno, luego helio y otros elementos más pesados. El polvo, por su lado, consiste en granos compuestos por una mezcla de silicatos y carbono sólido (grafito, hidrocarburos y posiblemente material orgánico similar al de las rocas sedimentarias) y que en su superficie se acumulan sólidos en forma de hielo, principalmente agua y otras moléculas como el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) (Whittet, 2011). Los granos de polvo, como se verá más adelante, proporcionan un sustrato para importantes reacciones químicas superficiales.

### 1. ¿En qué regiones del medio interestelar se han descubierto moléculas orgánicas?

Se han descubierto COMs principalmente en nubes moleculares, que son regiones de gas y polvo interestelar en que la fase gaseosa es predominantemente molecular, siendo el componente más abundante el gas  $\text{H}_2$  (a diferencia de otras regiones del ISM que contienen principalmente gas ionizado) (Irvine, 2011). Se han descubierto moléculas en envolturas circunestelares alrededor

de estrellas evolucionadas, núcleos interestelares fríos, núcleos calientes y corinos —regiones transitorias que rodean a las protoestrellas masivas y de baja masa, respectivamente—, entre otras (Herbst y Van Dishoeck 2009).

La naturaleza de las moléculas depende si se encuentran en regiones frías o calientes, por ejemplo, en los núcleos fríos de la nube molecular de Tauro (TMC-1) se han encontrado moléculas orgánicas exóticas como iones, radicales y moléculas insaturadas (pobres en hidrógeno). En cambio, en los núcleos calientes de la nube molecular de Sagitario B2 (Sgr B2) en especial en el núcleo norte (N) donde hay formación estelar, se han descubierto la mayoría de las COMs reportadas, principalmente moléculas saturadas (ricas en hidrógeno) similares a las terrestres. Sgr B2 está ubicada a unos 120 parsecs (390 años luz) del centro de la Vía Láctea y es la región más rica en moléculas de nuestra galaxia (Herbst y Van Dishoeck, 2009). La amplia composición química en fase gaseosa de esta nube se debe principalmente a la evaporación de los mantos de hielo de los granos de polvo interestelar donde se forman la mayoría de las moléculas complejas (sección 4).

## 2. ¿Qué tipo de moléculas se han descubierto?

A la fecha se han detectado cerca de 250 moléculas en el ISM y en las regiones circunestelares. Un catálogo actualizado de todas las moléculas detectadas en el ISM se puede encontrar en Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS) (Catalog CDMS, 2021). Estas incluyen desde moléculas simples formadas por 2 a 5 átomos como el  $H_2$  y CO hasta moléculas complejas con 6 átomos o más como el metanol ( $CH_3OH$ ). La mayoría de las moléculas comple-

jas que se han descubierto son orgánicas, es decir, tienen carbono. A la fecha, los fulerenos  $C_{60}$  y  $C_{70}$  son las COMs más grandes detectadas, con 60 y 70 átomos de carbono, respectivamente. Por su lado, el 1-cianonaftaleno y 2-cianonaftaleno ( $C_{10}H_7CN$ ) del grupo de los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), son las moléculas más grandes formadas por átomos distintos (19 átomos en total).

Estas moléculas, además de su tamaño, se pueden clasificar en varias categorías: iones moleculares, radicales, moléculas en anillo y moléculas estables (Ohishi, 2019).

Los iones son muy importantes en las reacciones químicas ya que al tener carga eléctrica pueden interaccionar fácilmente con otros compuestos. El ion molecular más abundante en el universo es el hidrógeno molecular protonado ( $H_3^+$ ), iniciador de la química interestelar (Oka, 2006). Los radicales por su parte, al tener electrones desapareados también poseen un gran poder reactivo. Algunos de los radicales detectados en el ISM son del tipo  $C_nH$  (hasta ocho carbonos). En condiciones terrestres, tanto los iones moleculares como los radicales reaccionan de inmediato una vez que se forman, pero en el ISM donde la temperatura y densidad llega a ser tan baja, permanecen por un largo tiempo pudiendo ser detectados. Los iones y radicales son fundamentales en las primeras etapas de formación de COMs (sección 4).

Una de las moléculas en anillo más importantes es el benceno ( $C_6H_6$ ) descubierto en el 2001 (Cernicharo *et al.*, 2001). El benceno es clave para apoyar la formación de PAHs en el universo. Los PAHs son moléculas complejas formadas por muchos anillos de benceno y son protagonistas de la hipótesis del “Mundo de PAHs” en el origen de la vida (sección 5) (Platts, 2006).

Finalmente, las moléculas estables son las que se pueden encontrar en condiciones terrestres, estas incluyen a moléculas prebióticas y otras moléculas de interés biológico (Ohishi, 2019). Por lo general, las moléculas de esta categoría contienen elementos químicos que son comunes en los organismos vivos como H, C, N, y O. Aquí encontramos por ejemplo glicolaldehído ( $\text{CH}_2\text{O}-\text{HCHO}$ ) un azúcar simple, amino acetonitrilo ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$ ) un precursor de aminoácidos, etanolamina ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) un precursor de fosfolípidos, entre otros (sección 5).

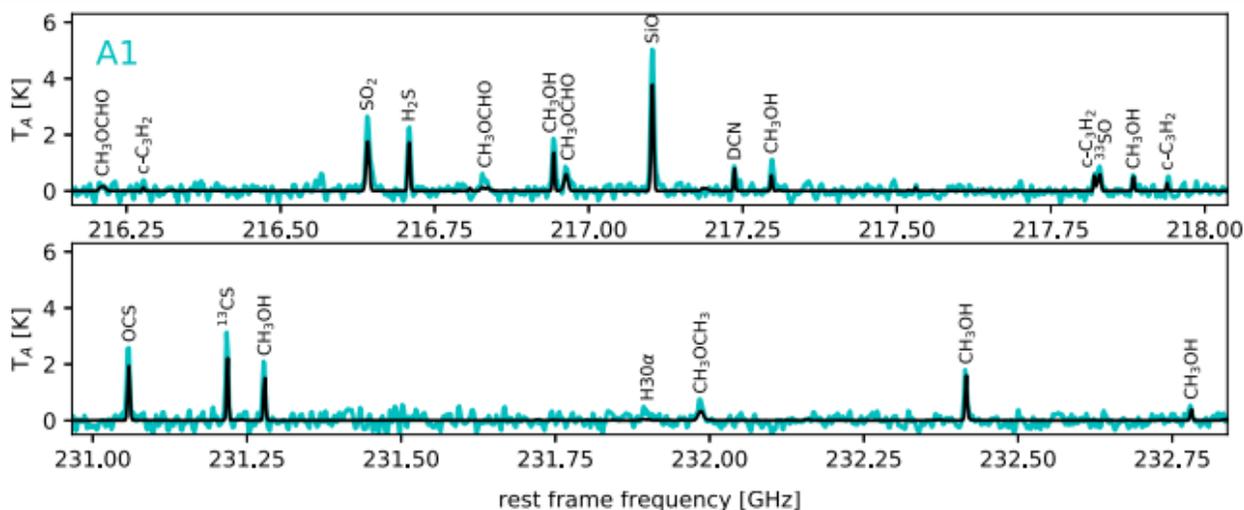
### 3. ¿Cómo se detectan moléculas en el medio interestelar?

Las COMs se detectan por espectroscopía, es decir, analizando las líneas de absorción/emisión de radiación electromagnética cuando un átomo o molécula transita entre distintos estados energéticos (Figura 1). Estas transiciones son propias para cada especie química y se representan como líneas en un espectro electromagnético. En el caso de las moléculas, éstas pueden presentar movimientos rotacionales y vibratorios (depen-

Figura 1:

Espectro electromagnético de la región A1 de la gran nube de Magallanes observada con el radiotelescopio ALMA con emisión de 1.3 mm. El análisis espectral se hace comparando las líneas observadas contra un espectro sintético teórico generado por un software a partir de líneas de emisión obtenidas en base de datos (por ejemplo, del catálogo CDMS). Para identificar las moléculas, las líneas del espectro observado deben estar presentes en el espectro sintético. En la figura se muestra el espectro observado (en cian) y el espectro sintético (en negro), en el eje Y se grafica la temperatura de la antena (TA) que se usa en radioastronomía para expresar la energía de las ondas de radio recibidas y en el eje X la frecuencia. Cada molécula puede presentar diferentes líneas de emisión (transiciones) dependiendo del rango frecuencia o longitud de onda analizada. Por ejemplo, se observa una línea de emisión a 232 GHz del éter dimetilico ( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ) y tres líneas del formiato de metilo ( $\text{CH}_3\text{OCHO}$ ) en este rango de frecuencia.

Imagen obtenida de Sewiño *et al.*, 2018.



diendo de la cantidad de energía que reciban) que resultan en estados cuánticos adicionales. Estos estados son baja energía, lo que se traduce en una menor frecuencia de los fotones absorbidos/emitidos. Por ejemplo, al caer una molécula de un estado vibracional a otro, libera un fotón de frecuencia infrarroja y si lo hace de un estado rotacional (menos energético que el vibracional), libera un fotón de ondas de radio que se observa en las regiones de menor frecuencia del espectro electromagnético.

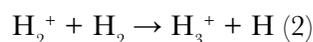
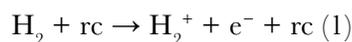
Cerca del 80% de las moléculas orgánicas en el ISM se han detectado utilizando técnicas de radioastronomía en los rangos de longitud de onda centimétrica, milimétrica y submilimétrica (McGuire, 2018). Los radiotelescopios que han descubierto la mayor cantidad de moléculas orgánicas son el IRAM 30 m, GBT 100 m, Nobeyama 45 m y NRAO/ARO 12 m (McGuire, 2018). Pero hay también otros que han hecho hallazgos interesantes, como ALMA en Chile que logró la primera detección extragaláctica del éter dimetilico ( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ) y formiato de metilo ( $\text{CH}_3\text{OCHO}$ ) en la gran nube de Magallanes (Sewilo *et al.*, 2018).

#### 4. ¿Cómo se forman moléculas orgánicas complejas en el medio interestelar?

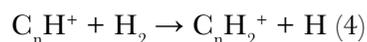
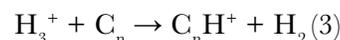
La formación de moléculas complejas ocurre en las regiones más densas de una nube molecular, ya que allí la probabilidad de colisiones entre moléculas es más alta en comparación a las regiones difusas (Sandford *et al.*, 2020). Desde un punto de vista químico, los mecanismos de formación se pueden clasificar en dos grupos principales: química en fase gaseosa y química en superficie de grano de polvo (Herbst y Van Dishoeck, 2009).

En fase gaseosa se han descrito reacciones de fotoionización y fotodisociación (interacción de una molécula con la radiación ionizante proveniente de rayos cósmicos, electrones y fotones UV) y reacciones entre dos especies que pueden ser neutrales (moléculas sin carga eléctrica) o ión-molécula (Figura 2). A modo de ejemplo, se describe a continuación la formación de radicales e iones moleculares en los núcleos fríos (10 - 100 K), los cuales son importantes para la formación de moléculas orgánicas más complejas (Herbst y Van Dishoeck, 2009).

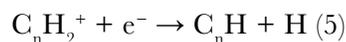
Cuando el  $\text{H}_2$  es bombardeado por rayos cósmicos (rc) que penetran en las regiones densas, se forma  $\text{H}_2^+$  (1) que posteriormente se hidrogena a  $\text{H}_3^+$  (2).



El  $\text{H}_3^+$  (iniciador de la química interestelar) puede reaccionar por ejemplo con una molécula neutra de la fase gaseosa (representada aquí como  $\text{C}_n$ , donde “n” es el número carbonos) generando un compuesto protonado (3) que por posteriores procesos de hidrogenación forma una molécula más compleja (4).



Cuando la hidrogenación deja de ser eficiente, el ión positivo interacciona con un electrón generando un radical del tipo  $\text{C}_n\text{H}$  (molécula pobre en hidrógenos) (5). En el ISM se han detectado radicales de este tipo hasta con 8 carbonos ( $n=8$ ).



En cuanto a los iones moleculares negativos, uno de los mecanismos de formación es la interacción



ocurre principalmente por evaporación del manto en las regiones más calientes de la nube molecular, a causa de los rayos UV provenientes de regiones de formación de estrellas (Ohishi, 2019).

También se pueden formar nuevas moléculas en los mantos de hielo por incidencia los rayos UV (fotoquímica UV) antes que se evapore completamente el manto, como ocurre con ciertos precursores de aminoácidos. También por reacciones posteriores entre las moléculas en el gas caliente cuando ya se ha alcanzado una temperatura suficiente (100-300 K) para evaporar completamente el manto (Herbst y Van Dishoeck 2009). Todos estos procesos de formación explicarían la enorme diversidad molecular detectada en fase gaseosa.

## 5. ¿Cuáles de las moléculas orgánicas detectadas se pueden relacionar con la vida?

Uno de los principales objetivos de la búsqueda de moléculas orgánicas en el espacio es hallar aquellas que puedan relacionarse con el origen de la vida en la Tierra. Actualmente se han detectado precursores de las principales macromoléculas de la vida como azúcares, aminoácidos, nucleobases, fosfolípidos, entre otros. A continuación, se mencionarán algunos.

En el año 2000 se detectó por primera vez Glicolaldehído ( $\text{CH}_2\text{OHCHO}$ ) en la nube molecular Sgr B2 (N) por el telescopio NRAO 12 m, en ese entonces nombrado el primer azúcar observado en el ISM (Hollis, Lovas y Jewell 2000). Este puede combinarse con otras moléculas para formar azúcares más complejos como la ribosa componente del ácido ribonucleico (ARN). El ARN es protagonista de la hipótesis del “mundo de ARN”

que sugiere que la vida en la Tierra comenzó con una molécula de ARN (o similar) que podía copiarse a sí misma. Además, a partir de este se forma el ácido desoxirribonucleico (ADN), biomolécula que almacena la información genética de un ser vivo. Años después se detectó Glicolaldehído cerca de una protoestrella tipo sol con el telescopio ALMA (Jørgensen *et al.*, 2012). A pesar de que estructuralmente el Glicolaldehído no es un azúcar como tal, es el compuesto más simple relacionado con los azúcares y su descubrimiento incentivó a buscar otras moléculas prebióticas en el espacio.

Las nucleobases, en particular las pirimidinas (citosina, timina y uracilo) y purinas (adenina y guanina) forman parte de la estructura de los ácidos nucleicos ARN y ADN. Se ha demostrado experimentalmente que la Cianamida ( $\text{NH}_2\text{CN}$ ) y Cianoacetileno ( $\text{HC}_3\text{N}$ ), ambas moléculas detectadas en el ISM, pueden reaccionar para formar purinas a través de un intermediario en presencia de amoníaco (Kaur, Ohri y Sharma, 2019). En cuanto a las pirimidinas, a pesar de que se han detectado en la materia orgánica de algunos meteoritos, su búsqueda no ha tenido éxito en el ISM (Ohishi, 2019). Sin embargo, se ha demostrado que en condiciones experimentales se pueden formar a partir de moléculas simples y abundantes en el ISM (agua, monóxido de carbono, amoníaco y metanol) cuando son expuestas a radiación UV a 10 K. De hecho, el espectro de varias de estas ya fue determinado experimentalmente (Oba *et al.*, 2019). Se espera que estos datos ayuden a identificar este tipo de moléculas en el ISM en futuras observaciones.

Los aminoácidos son los componentes de las proteínas, las cuales realizan funciones esenciales para la vida (estructura, metabolismo, transporte, etc.). La glicina ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ), el

aminoácido más simple se ha buscado durante mucho tiempo en el ISM sin éxito, por lo que la búsqueda se ha comenzado a centrar en sus precursores. Por ejemplo, la metilamina ( $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ), una de las primeras COMs detectadas en ISM, podría formar glicina al reaccionar con  $\text{CO}_2$  bajo irradiación UV en la superficie de los granos de polvo (Ohishi, 2019). No obstante, el hecho de no haber detectado glicina aún abre otras posibilidades. Por ejemplo, en el año 2008 se descubrió otro posible precursor directo de glicina en Sgr B2 (N), el amino acetonitrilo ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$ ) con el telescopio IRAM 30 m (Menten *et al.*, 2008). Al investigar experimentalmente la formación de glicina tanto en la fase gaseosa como en los mantos de los granos de polvo, ninguno de los mecanismos propuestos involucraba como precursor el amino acetonitrilo. Esto abre la posibilidad que la formación de aminoácidos podría ocurrir después, en cometas y meteoritos —de hecho, se han detectado decenas de aminoácidos formados por hidrólisis en la superficie de estos objetos—, y que solamente la formación de sus precursores ocurriría en el ISM (Menten *et al.*, 2008). También se descubrió cianuro de propilo ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{CN}$ ) en Sgr B2 (N) con el telescopio IRAM 30 m, primera molécula interestelar que posee un esqueleto de carbono ramificado, característica importante de algunos aminoácidos (Belloche *et al.*, 2009). Este hallazgo confirmó que las moléculas ramificadas son abundantes, lo que resulta ser una buena señal para la presencia de aminoácidos en el espacio.

En el 2021 se descubrió etanolamina ( $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ), primera molécula interestelar detectada en Sgr B2 con los telescopios IRAM 30 m y Yebes 40 m que es precursora de fosfolípidos (Rivilla *et al.*, 2021). Los fosfolípidos son componentes esenciales de las membranas celulares, las cuales funcionan como compartimentos para

mantener el material genético y la maquinaria metabólica de una célula separados del medio externo. Si bien el proceso de formación de la etanolamina no está claro, se piensa que las rutas involucrarían reacciones iniciales en fase gaseosa y posteriormente en la superficie de los granos de polvo. Después de formada pudo ser transportada a la Tierra primitiva en donde las condiciones permitieron la formación de fosfatidil-etanolamina, un fosfolípido muy abundante en las membranas celulares (Rivilla *et al.*, 2021).

Otro hallazgo interesante fue el descubrimiento del Óxido de propileno ( $\text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{O}$ ) en una región de formación estelar de Sgr B2, primera molécula quiral detectada de forma inequívoca en ISM (McGuire *et al.*, 2016). La quiralidad es la propiedad de una molécula de no ser superponible con su imagen especular (enantiómeros) y ocurre cuando un átomo de carbono está unido a cuatro grupos químicos diferentes. Esta propiedad es importante en astrobiología ya que los organismos vivos usan exclusivamente uno de los enantiómeros (L-aminoácidos y D-azúcares) para formar estructuras biológicas más complejas, lo que se denomina homoquiralidad. Este hallazgo da cuenta que moléculas similares podrían existir en ISM.

Finalmente, el benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) descubierto en el ISM es precursor de los PAHs, de los cuales se piensa que formaron parte del “océano primordial” en el origen de la vida y que son componentes ubicuos en el universo (Sandford *et al.*, 2020). La hipótesis del “Mundo de PAHs” plantea que estas moléculas funcionan como modelo estructural previo al “mundo del ARN” y explica la formación de los ácidos nucleicos (Platts, 2006). Esto se debe a que al ser capaces de rotar y formar entre ellos apilamientos organizados con una separación igual a la que existe en los nucleótidos

del ARN y ADN (0.34 nm), favorecen la unión de moléculas planas como las nucleobases y otras moléculas pequeñas, funcionando así como un andamiaje para que se forme un esqueleto de ácido nucleico. Otra propiedad que se les atribuye es que al ser moléculas anfipáticas, es decir, poseer una región hidrofóbica y una hidrofílica que se forma cuando se someten a radiación UV (los átomos de H se reemplazan por OH que los vuelven solubles en agua) serían potenciales estabilizantes de membrana celular similares al colesterol (Groen *et al.*, 2012).

## 6. ¿Molécula orgánica es indicador de vida?

Existe la idea que cuando se descubre una molécula orgánica compleja, al estar formada de carbono (átomo esencial para la química de la vida) se asocia con la vida, ya sea porque podría ser producida por algún organismo vivo o porque son similares a las que encontramos en la Tierra, sin embargo, esta afirmación debe ser tratada con cautela. Primero, los mecanismos que explican la síntesis de estas moléculas en el ISM son procesos abióticos, es decir, no hay participación de organismos vivos. Segundo, el paso de molécula orgánica a vida es aún desconocido, se requiere tiempo para que la vida surja y evolucione, y además que sus moléculas predecesoras se formen con una abundancia suficiente para que se acumulen y generen macromoléculas. Sin embargo, su presencia en el ISM si se puede relacionar con la vida de alguna manera. Por ejemplo, se sabe que la vida requiere tres sistemas básicos: un compartimento (por ejemplo, una membrana lipídica), una maquinaria metabólica (proteínas u otras moléculas con actividad catalítica) y moléculas que almacenen la información genética

(como ADN o ARN). Cualquier molécula que se detecte en el espacio y que forme parte de estos sistemas básicos apoyaría la hipótesis que las moléculas orgánicas complejas que formaron la vida tienen un origen exógeno y no necesariamente tienen que formarse en las condiciones de la Tierra primitiva. Una posibilidad es que luego de formarse con una abundancia suficiente en el ISM, se almacenaran en planetesimales y en cuerpos menores del Sistema Solar para luego ser transportadas a la Tierra primitiva (o cualquier planeta potencialmente habitable) donde estarían las condiciones adecuadas para que funcionen como “semillas” para que la vida surja y evolucione tal y como la conocemos. Por lo tanto, aunque hay que ser cautelosos en asociar de inmediato el descubrimiento de moléculas orgánicas con la vida, el hecho que sus precursores se encuentren en abundancia en el espacio sugiere que el origen de estos pudo ser interestelar.

## Conclusión

El descubrimiento de moléculas orgánicas complejas en el espacio no solo contribuye a entender la compleja composición y evolución química del universo, sino que da pie a interesantes hipótesis relacionadas con el origen de la vida en la Tierra, como la “entrega exógena”. Aunque no se conocen los mecanismos exactos que expliquen el salto desde molécula orgánica a vida propiamente tal, el hecho de haber descubierto sus precursores en regiones tan alejadas de la Tierra aporta información importante para formular nuevas teorías que requerirán de una perspectiva interdisciplinaria. Falta mucho por descubrir aún, ya que ninguna de las teorías importantes sobre nuestros orígenes ha podido ser aceptada o descartada de manera definitiva. Además, la

búsqueda de vida se basa en lo que conocemos en la Tierra y se desconoce la variedad de moléculas exóticas que podrían formarse en el ISM y que podrían dar origen a otras formas de vida en otros lugares del universo. Lo que sí es posible afirmar es que los ingredientes de la vida son abundantes en el espacio, lo que sugiere que ésta podría surgir en otros lugares del universo si se presentan las condiciones adecuadas.

## Agradecimientos

Al Astrónomo PhD. Juan Carlos Beamin por su contribución a mejorar este artículo de divulgación.

## Conflictos de interés

Nada que declarar.

## Referencias

- Belloche, A., R. T. Garrod, H. S.P. Müller, K. M. Menten, C. Comito, and P. Schilke. 2009. “Increased Complexity in Interstellar Chemistry: Detection and Chemical Modeling of Ethyl Formate and n-Propyl Cyanide in Sagittarius B2(N)”. *Astronomy and Astrophysics* 499 (1): 215–32. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811550>
- Catalog [CDMS Classic Documentation]. Accessed May 19, 2021. <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/>.
- Cernicharo, José, Ana M. Heras, A. G. G. M. Tielens, Juan R. Pardo, Fabrice Herpin, Michel Guélin, and L. B. F. M. Waters. 2001. “Infra-red Space Observatory’s Discovery of C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>, and Benzene in CRL 618”. *The Astrophysical Journal* 546 (2): L123–26. <https://doi.org/10.1086/318871>
- Groen, Joost, David W. Deamer, Alexander Kros, and Pascale Ehrenfreund. 2012. “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons as Plausible Prebiotic Membrane Components”. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 42 (4): 295–306. <https://doi.org/10.1007/s11084-012-9292-3>
- Jiao, He, Francis E. Toriello, Shahnewaz M. Em-tiaz, Thomas Henning, and Gianfranco Vidali. 2021. “Phase Transition of Interstellar CO Ice”. *The Astrophysical Journal Letters* 915 (1): L 23. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/AC0A7C>
- Herbst, Eric, and Ewine F. Van Dishoeck. 2009. “Complex Organic Interstellar Molecules”. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 47: 427–80. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101654>
- Hollis, J. M., F. J. Lovas, and P. R. Jewell. 2000. “Interstellar Glycolaldehyde: The First Sugar”. *The Astrophysical Journal* 540 (2): L107–10. <https://doi.org/10.1086/312881>
- Irvine, William M. 2011. “Molecular Cloud”. In *Encyclopedia of Astrobiology*, 1070–1070. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4\\_1010](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_1010)
- Jørgensen, Jes K., Cécile Favre, Suzanne E. Bisschop, Tyler L. Bourke, Ewine F. Van Dishoeck, and Markus Schmalzl. 2012. “Detection of the Simplest Sugar, Glycolaldehyde, in a Solar-Type Protostar with ALMA”. *Astrophysical Journal Letters* 757 (1): 4. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L4>
- Kaur, Sarabjeet, Ashita Ohri, and Purshotam Sharma. 2019. “Could Purines Be Formed from

- Cyanamide and Cyanoacetylene in a Prebiotic Earth Environment?”. *ACS Omega* 4 (7): 12771–81. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01169>
- McCullom, Thomas M. 2013. “Miller-Urey and beyond: What Have We Learned about Prebiotic Organic Synthesis Reactions in the Past 60 Years?”. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41 (May): 207–29. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133457>
- McGuire, Brett A., P. Brandon Carroll, Ryan A. Loomis, Ian A. Finneran, Philip R. Jewell, Anthony J. Remijan, and Geoffrey A. Blake. 2016. “Discovery of the Interstellar Chiral Molecule Propylene Oxide (CH<sub>3</sub>CHCH<sub>2</sub>O)”. *Science* 352 (6292): 1449–52. <https://doi.org/10.1126/science.aae0328>
- McGuire, Brett A. 2018. “2018 Census of Interstellar, Circumstellar, Extragalactic, Protoplanetary Disk, and Exoplanetary Molecules”. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 239: 17. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aae5d2>
- Menten, K M, C Comito, H S P Müller, P Schilke, J Ott, S Thorwirth, and C Hieret. 2008. “Astrophysics Detection of Amino Acetonitrile in Sgr B2(N)”. *A&A* 482: 179–96. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079203>
- Oba, Yasuhiro, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Naoki Watanabe, and Akira Kouchi. 2019. “Nucleobase Synthesis in Interstellar Ices”. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12404-1>
- Ohishi, Masatoshi. 2016. “Search for Complex Organic Molecules in Space”. *Journal of Physics: Conference Series* 728 (5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/728/5/052002>
- Ohishi, Masatoshi. 2019. “Prebiotic Complex Organic Molecules in Space”. *Astrobiology: From the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence*, 11–21. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3639-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3639-3_2)
- Oka, Takeshi. 2006. “Interstellar H<sub>3</sub><sup>+</sup>”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. National Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1073/pnas.0601242103>
- Platts, Simon Nicholas. 2006. “The ‘PAH World’: Discotic Polynuclear Aromatic Compounds as Mesophase Scaffolding at the Origin of Life”. <https://nla.gov.au/nla.cat-vn4225103>
- Rivilla, Víctor M, Izaskun Jiménez, Jim´ Jiménez-Serra, Jesús Jes´, Jesús Martín-Pintado, Carlos Briones, Lucas F Rodríguez-Almeida, et al. 2021. “Discovery in Space of Ethanolamine, the Simplest Phospholipid Head Group”. <https://doi.org/10.1073/pnas.2101314118>
- Sandford, Scott A., Michel Nuevo, Michel Nuevo, Partha P. Bera, Partha P. Bera, and Timothy J. Lee. 2020. “Prebiotic Astrochemistry and the Formation of Molecules of Astrobiological Interest in Interstellar Clouds and Protostellar Disks”. *Chemical Reviews* 120 (11): 4616–59. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00560>
- Sewilo, Marta, Remy Indebetouw, Steven B. Charnley, Sarolta Zahorecz, Joana M. Oliveira, Jacco Th van Loon, Jacob L. Ward, et al. 2018. “The Detection of Hot Cores and Complex Organic Molecules in the Large Magellanic Cloud”. *ArXiv*. arXiv. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa079>
- Snell, Ronald L. 2011. “Interstellar Medium”. In *Encyclopedia of Astrobiology*, 837–43. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4\\_801](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_801)
- Whittet, Douglas. 2011. “Interstellar Dust”. In *Encyclopedia of Astrobiology*, 832–35. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4\\_799](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_799)