La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.01

Edición Especial / Special Issue
Quiralidad a diferentes escalas

Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$ como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica

Chiral symmetry breaking in $NaClO_3$ crystals as a model for the study of biological homochirality

Hugo I. Cruz-Rosas*[1,4], María E. Noble-Terán[2,4], José-Manuel Cruz[3,4], Heidi García Quintana[2], Marleen Alejandra Chávez Vidal[2], Fátima del C. Ramírez Hernández[2] y Thomas Buhse[2,4,†]

[1]*Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. [*https://ror.org/01tmp8f25*]*
[2]*Centro de Investigaciones Químicas – IICBA, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México. [*https://ror.org/03rzb4f20*]*
[3]*Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. [*https://ror.org/04eexme77*]*
[4]*Red Interdisciplinaria de Investigaciones en Quiralidad (RiiQ), México.*

*Autor para correspondencia: quetzal@ciencias.unam.mx

Manuscrito recibido el 26 de marzo de 2026. Aceptado, tras revisión el 06 de julio de 2026. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

Los seres vivos están constituidos por moléculas quirales. En ausencia de influencias asimétricas, las reacciones químicas que producen moléculas quirales generan proporciones estadísticamente equivalentes de los enantiómeros izquierdo y derecho (estado racémico). Sin embargo, los sistemas biológicos muestran una marcada preferencia por uno de los enantiómeros. El caso paradigmático es el uso predominante de aminoácidos levógiros (L) en la síntesis de proteínas y de azúcares pentosas dextrógiras (D) en la síntesis de ácidos nucleicos (DNA y RNA). Los mecanismos de cristalización asimétrica del clorato de sodio ($NaClO_3$) constituyen un modelo experimental para estudiar el posible origen de esta asimetría molecular y su relevancia para los sistemas biológicos. En el presente artículo revisamos los mecanismos responsables de la formación de cristales quirales de $NaClO_3$, incluyendo los procesos de amplificación y desracemización, así como sus posibles aplicaciones en la obtención de compuestos enantioméricamente puros. Asimismo, analizamos la relación entre la asimetría observada en estos sistemas inorgánicos y la homoquiralidad biológica. Finalmente, discutimos la hipótesis de que procesos de cristalización asimétrica pudieron ocurrir en la Tierra prebiótica e influir en la dinámica molecular asociada con el origen de la vida. Concluimos que los sistemas basados en $NaClO_3$ constituyen un modelo útil para comprender los mecanismos físicos capaces de generar y amplificar asimetrías quirales a partir de condiciones inicialmente simétricas.

Palabras clave: Homoquiralidad, cristalización asimétrica, desracemización, clorato de sodio ($NaClO_3$), origen de la vida.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

Living systems are composed of chiral molecules. In the absence of asymmetric influences, chemical reactions that generate chiral molecules produce statistically equivalent proportions of left- and right-handed enantiomers (the racemic state). However, biological systems exhibit a marked preference for one enantiomer over the other. The paradigmatic example is the predominant use of L-amino acids in protein synthesis and D-pentose sugars in the synthesis of nucleic acids (DNA and RNA). The asymmetric crystallization mechanisms of sodium chlorate ($NaClO_3$) provide an experimental model for investigating the possible origin of this molecular asymmetry and its relevance to living systems. In this article, we review the mechanisms responsible for the formation of chiral $NaClO_3$ crystals, including amplification and deracemization processes, as well as their potential applications in the production of enantiomerically pure compounds. We also examine the relationship between the chiral asymmetry observed in these inorganic systems and biological homochirality. Finally, we discuss the hypothesis that asymmetric crystallization processes may have occurred on the prebiotic Earth and influenced the molecular dynamics associated with the origin of life. We conclude that $NaClO_3$-based systems provide a useful model for understanding the physical mechanisms capable of generating and amplifying chiral asymmetries from initially symmetric conditions.

Keywords: Homochirality, asymmetric crystallization, deracemization, sodium chlorate ($NaClO_3$), origin of life.

Forma sugerida de citar: Cruz-Rosas, H. I., et al. (2026). Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$ como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida.* Vol. 44(2):13-26. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.01.

Orcid IDs:

Hugo I. Cruz-Rosas: https://orcid.org/0000-0003-2451-544X
María E. Noble-Terán: https://orcid.org/0000-0002-6435-5551
José-Manuel Cruz: https://orcid.org/0000-0003-3306-5137
Heidi García Quintana: https://orcid.org/0009-0009-1879-0649
Marleen Alejandra Chávez Vidal: https://orcid.org/0009-0006-9550-8561
Fátima del C. Ramírez Hernández: https://orcid.org/0009-0009-2852-1709
Thomas Buhse: https://orcid.org/0000-0001-5082-0873

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

La quiralidad es una propiedad geométrica que permite a ciertos objetos o sistemas existir en dos formas que son imágenes especulares no superponibles, análogas a las manos izquierda y derecha (ver Figura 1).

En el caso de moléculas y cristales quirales, estas formas se denominan enantiómeros. Los enantiómeros pueden distinguirse por su interacción con la luz linealmente polarizada, ya que son capaces de rotar el plano de polarización en sentidos opuestos. Esta propiedad se denota como $(+)$ o $(-)$, dependiendo de si la rotación es en sentido horario o antihorario, respectivamente. Esta propiedad dio origen a los términos levógiro (L) y dextrógiro (D); sin embargo, en la química moderna las designaciones L y D no describen la rotación óptica, sino que corresponden a una nomenclatura estructural relativa basada en la proyección de Fischer del gliceraldehído.



Figura 1. Quiralidad en la anatomía de los gasterópodos. El giro dextral (hacia la derecha) en la concha de la mayoría de especies de caracoles define una asimetría quiral, pues los individuos cuyas conchas presentan giros sinistrales (hacia la izquierda) son menos frecuentes. Esta inversión en el giro de la concha es originada por mutaciones que alteran la anatomía del animal desde las primeras segmentaciones del desarrollo embrionario.

Por otra parte, la configuración absoluta de una molécula quiral se define mediante el sistema R/S (*rectus*/*sinister*), el cual se asigna de acuerdo con las reglas de prioridad de Cahn–Ingold–Prelog (Cleaves, 2023). Estas reglas establecen un orden de los sustituyentes alrededor de un centro quiral en función del número atómico (Z) de los átomos directamente unidos, y, en caso de empate, mediante la comparación progresiva de los átomos siguientes en la cadena. A partir de este ordenamiento se determina la disposición espacial de los grupos alrededor del centro quiral.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

En la Figura 2 puede verse un ejemplo de la asignación de la configuración absoluta R/S según estas reglas para el ácido láctico. En ambos enantiómeros, el sustituyente de menor prioridad es $-H$ ($Z = 1$), por lo que se orienta hacia atrás de la molécula. La siguiente prioridad la tiene el $-CH_3$, seguido del $-CO_2H$, pues el número atómico del C es $Z = 6$, el cual está presente en ambos sustituyentes unidos directamente al centro quiral (carbono alfa). Ante este empate se comparan los siguientes átomos: el hidrógeno tiene un $Z = 1$ y el oxígeno un $Z = 8$, por lo que $-CH_3$ (C unido a H, H, H) tiene menor prioridad que $-CO_2H$ (C unido a O, O, H). Finalmente, el $-OH$ es el sustituyente de mayor prioridad, pues $Z = 8$ para el oxígeno unido al centro quiral. De este modo, las prioridades quedan: $OH > CO_2H > CH_3 > H$. Por lo tanto, el recorrido $OH \rightarrow CO_2H \rightarrow CH_3$ en sentido antihorario corresponde a la configuración *S*, mientras que en sentido horario corresponde a la configuración *R*.

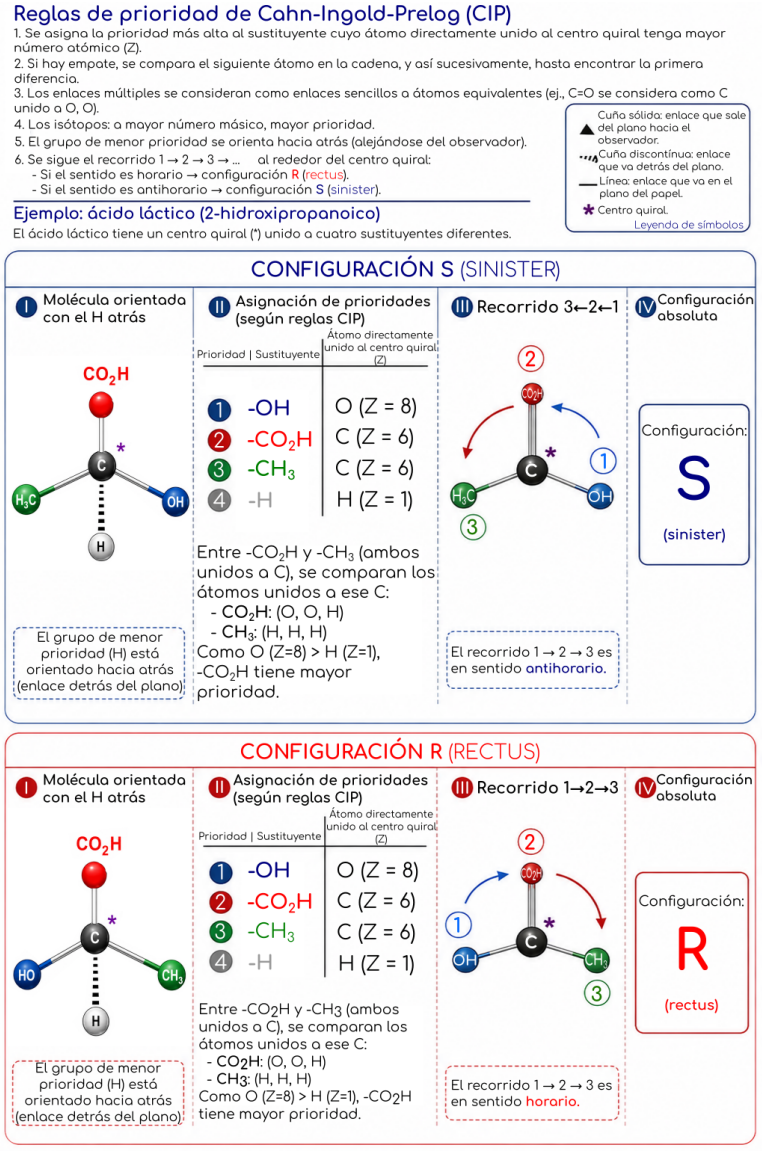


Figura 2. Determinación absoluta de las configuraciones R/S para el ácido láctico, según las reglas de Cahn–Ingold–Prelog.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Así, en los sistemas biológicos, la homoquiralidad es una propiedad de asimetría funcional relacionada con el flujo de información a nivel celular (Carroll, 2009; Cruz-Rosas y cols., 2020). Se trata de una característica distintiva de la vida que se extiende a diferentes niveles de la organización biológica (Cruz-Rosas y cols., 2022; Inaki y cols., 2016). Durante los mecanismos de síntesis de biopolímeros informacionales, los ribosomas solo reconocen los L-aminoácidos (excepto la glicina, que es aquiral), mientras que la ARN-polimerasa y la ADN-polimerasa solo reconocen los nucleótidos que presentan D-ribosa y D-desoxirribosa, lo que se conoce como biohomoquiralidad. No obstante, se ha reportado la presencia de D-aminoácidos y de L-azúcares desempeñando papeles relevantes en algunos procesos biológicos (Bitchagno y cols., 2022; Forsman y Leino, 2011; Fuchs y cols., 2005; Genchi, 2017). Los casos en donde se ha logrado la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos espejo —es decir, polimerizando D-aminoácidos y L-nucleótidos— ocurren en condiciones de laboratorio, donde ha sido indispensable el uso de enzimas sintéticas también espejo (Harrison y cols., 2023; Young y cols., 2019).

De este modo, la homoquiralidad presente en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos no se mantiene de manera estricta fuera de estos procesos. Sin embargo, el sesgo en el uso de uno de los enantiómeros de las moléculas quirales sí es una característica constante de los sistemas biológicos (Franco-Rodríguez y cols., 2023). De igual forma, existen sistemas inorgánicos que presentan asimetría quiral, exhibiendo sesgos a favor de la configuración derecha o izquierda que van desde las fuerzas débiles en el interior de los átomos hasta el sentido de giro en las galaxias espirales como la Vía Láctea (Pavlov y Klabunovskii, 2014), lo cual evidencia una asimetría quiral general en la naturaleza.

La condición estable, desordenada y más probable de un sistema quiral es la racémica, que en una reacción química se refiere al estado equimolar de ambos enantiómeros (50% izquierdos y 50% derechos). Es evidente, por lo tanto, que la biohomoquiralidad es una condición de asimetría y orden molecular en la biología. Incluso los sistemas biológicos no vivos, como los virus, necesitan ser homoquirales para interactuar con las células que infectan.

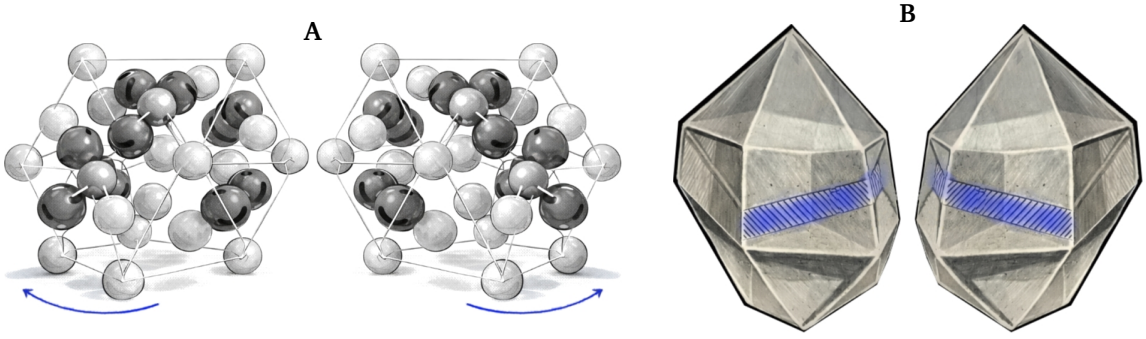


Figura 3. Esquema ilustrativo de quiralidad observada en cristales. A) Enantiómeros donde la quiralidad emerge como consecuencia del arreglo en el espacio de las unidades químicas. B) Enantiómeros en donde la quiralidad se observa en bandas inclinadas sobre la superficie de una de sus caras.

Por su parte, en los sistemas cristalinos de compuestos inorgánicos, donde el orden molecular sigue un patrón periódico, la quiralidad no reside necesariamente en las unidades químicas individuales, sino que emerge como una propiedad colectiva del arreglo espacial de la red del cristal y de su grupo de simetría (Flack, 2003; Valentín-Pérez y cols., 2022). Estos arreglos pueden ocurrir en forma de hélices a favor o en contra del movimiento de las manecillas del reloj, como en el clorato de sodio ($NaClO_3$) (Dickinson y Goodhue, 1921); o formando bandas en una o varias caras del cristal que pueden inclinarse hacia la izquierda o la derecha respecto al punto de referencia del observador, como en el caso del tartrato de amonio y sodio en sus caras hemiédricas (Gal, 2011) (Figura 3). En estos casos, cada versión del cristal obtenido resulta una imagen especular de la otra, por lo que se les denomina

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

enantiomorfos (Flack, 2003). Un aspecto relevante es que esta quiralidad se da a nivel supramolecular, incluso con relativa independencia de la quiralidad de las unidades que componen la red cristalina; tal es el caso del ya referido clorato de sodio, una molécula aquiral que da paso a una red helicoidal quiral. Este ejemplo demuestra que la quiralidad es una propiedad emergente que depende del arreglo espacial de los componentes de un sistema. Así, la quiralidad puede observarse a diferentes escalas de organización en la naturaleza, sin que esta propiedad exista necesariamente en la escala anterior.

La emergencia de la quiralidad en un sistema molecular depende de fuerzas fisicoquímicas y procesos que pudieron haber incidido en la Tierra prebiótica para influir en el origen o en las primeras etapas evolutivas de la vida, determinando desde muy temprano el posterior desarrollo hacia la biohomoquiralidad actual. Por lo tanto, el estudio de estas fuerzas y procesos que dan paso a la quiralidad en arreglos moleculares puede aportar claves sobre el proceso que condujo al desarrollo de los sistemas vivos. Más aún, las investigaciones centradas en los mecanismos que inducen la asimetría quiral en sistemas moleculares son de sumo interés para entender el origen y funcionamiento de los procesos biológicos que presentan quiralidad; esto tiene implicaciones no solo teóricas para el origen de la vida, sino también prácticas.

Ejemplo de esto es el desarrollo de terapias médicas basadas en el hecho de que la biohomoquiralidad representa un orden estructural fundamental en los seres vivos que permite el reconocimiento estereoespecífico entre biomoléculas. Este principio ha sido aprovechado para el diseño de nanomateriales quirales capaces de reconocer selectivamente estructuras moleculares de interés biomédico, con aplicaciones en diagnóstico, liberación dirigida de fármacos y terapias médicas (Sun y cols., 2026; Zhao y cols., 2024). El desarrollo de fármacos específicos también es un campo de desarrollo basado en la quiralidad molecular de los sistemas vivos, donde se busca minimizar los efectos secundarios y potenciar los efectos deseados en el organismo por medio del estereoisómero con la actividad fisiológica adecuada (Nguyen y cols., 2006).

Con estos objetivos, diversos grupos de investigación emplean modelos moleculares simples, como la formación de cristales quirales, para entender de qué formas puede inducirse la ruptura de la simetría quiral e investigar sus implicaciones en la biología. Sobre esta base, en el presente trabajo mostramos la relevancia del estudio de la cristalización del $NaClO_3$, así como los mecanismos de ruptura de su simetría quiral como un modelo experimental sencillo y útil para aproximarnos a las posibles condiciones de asimetría en las que se ensamblaron los primeros sistemas vivos.

2 El Clorato de Sodio ($NaClO_3$): un modelo experimental

El clorato de sodio es una sal inorgánica aquiral que cristaliza formando conglomerados quirales. Esta quiralidad no reside en las unidades químicas individuales, sino que emerge como consecuencia del arreglo tridimensional de los iones Na^+ y ClO_3^- en la red cristalina. En particular, el cristal pertenece a un grupo espacial quiral ($P2_13$), en el que las unidades estructurales se organizan a lo largo de ejes helicoidales, dando lugar a estructuras enantiomorfas de mano izquierda o derecha (Buhse y cols., 2021; Flack, 2003; Florent y cols., 2023).

Una consecuencia importante de esta disposición es que los cristales presentan actividad óptica, es decir, son capaces de rotar el plano de polarización de la luz linealmente polarizada. Como resultado, cuando se observan con lentes polarizadas, los cristales de distinta lateralidad interactúan de forma diferente con la luz, permitiendo distinguir visualmente entre conglomerados quirales opuestos.

Si las placas polarizadas están inicialmente cruzadas (en planos paralelos pero desfasadas de manera perpendicular, a 90° una con respecto de la otra) y se gira la placa superior (analizadora) hacia la derecha, la luz polarizada atravesará la mezcla de cristales y entonces los L-cristales del $NaClO_3$ se verán más luminosos que los D-cristales; si el giro es hacia la izquierda, se invertirá la tonalidad de los conglomerados, es decir, los D-cristales se observarán con más brillo. Lo anterior se ilustra en la Figura 4 con las flechas girando a la derecha e izquierda y el correspondiente resultado en el par de cristales: las imágenes inferiores muestran, cada una, las tonalidades de los conglomerados L o D,

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

debido a que cada enantiomorfo interactúa de forma diferente con el sentido de la luz polarizada que atraviesa la mezcla de cristales.

No existe una relación directa entre el giro horario o antihorario de la lente con la quiralidad de cada enantiomorfo, por lo que este no representa un método para determinar la configuración de cada conglomerado, sino que se trata de una técnica para discernir entre los cristales de una mano y de otra, e incluso entre cristales aquirales (Niinomi y cols., 2014).

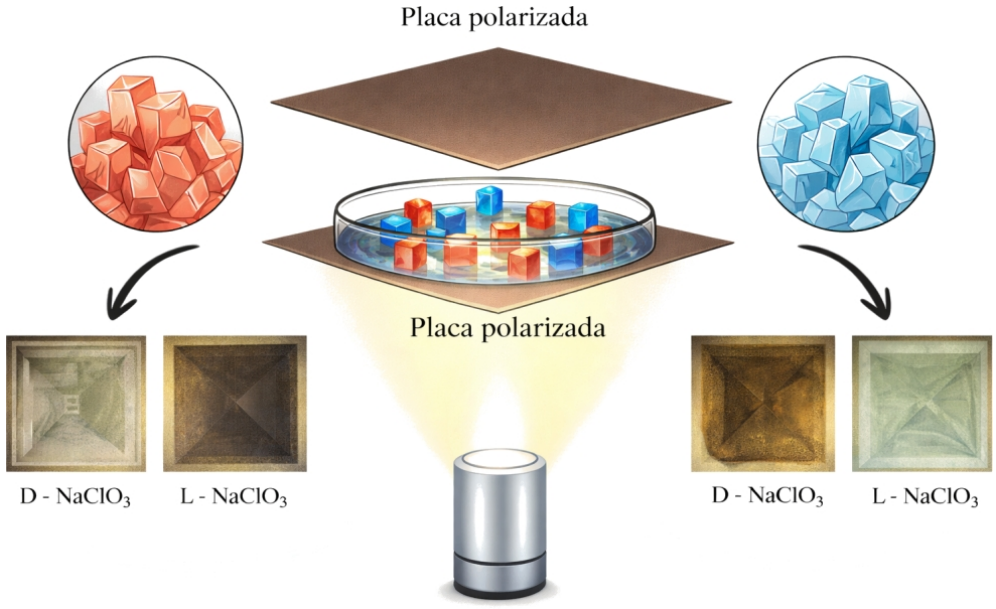


Figura 4. Interacción asimétrica de los cristales L y D del $NaClO_3$ con la luz polarizada linealmente. Cuando la placa polarizada superior se gira en sentido horario (derecha) con respecto de la placa polarizada inferior, los cristales L-$NaClO_3$ se observan más luminosos. Cuando el giro relativo de la placa polarizada superior es antihorario (izquierda), ahora son los cristales D-$NaClO_3$ los que se observan luminosos. Imagen original: Heidi García Quintana. Los colores solo son ilustrativos.

Un comportamiento interesante en la cristalización del $NaClO_3$ es que al preparar una solución sobresaturada a partir de cristales previamente formados —ya sea que estuviese compuesta únicamente por cristales izquierdos, únicamente por derechos o por una mezcla racémica—, la quiralidad asociada a la red cristalina se pierde por completo tras la disolución. Como resultado, la formación de nuevos cristales da paso a una mezcla racémica. Esto demuestra que el racemato es el estado de equilibrio de la dinámica, al cual se regresa de manera recurrente. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, dicho equilibrio puede romperse, lo que conduce a un crecimiento no racémico en el que predomina alguno de los cristales enantiomorfos (Buhse y cols., 2021; Noble-Terán y cols., 2023).

3 Ruptura de la simetría quiral y crecimiento no racémico

El crecimiento no racémico se refiere a cualquier proceso que resulta en un exceso significativo de un enantiómero sobre el otro (en este caso, un enantiomorfo de cierta mano o lateralidad sobre el otro). Existen mecanismos que pueden causarlo, tanto estocásticos (aleatorios) como deterministas.

3.1 El efecto de la conglomeración espontánea y la desracemización de Viedma

La desracemización de Viedma opera sobre la formación espontánea de cristales quirales resultantes de una dinámica de conglomeración, fragmentación

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

y reciclaje, donde un núcleo quiral induce la incorporación (adsorción) de unidades estructurales compatibles con la configuración del enantiomorfo en formación, dando paso a cristales con una quiralidad definida. La cristalización del $NaClO_3$ genera, en reposo, conglomerados de mano izquierda y de mano derecha en un estado simétrico (racémico). A partir de esta conglomeración espontánea, el mecanismo de desracemización de Viedma (Viedma, 2005) permite obtener una población homoquiral de cristales (100 % de enantiomorfos de la misma lateralidad) a partir de una disolución sobresaturada y racémica.

El sistema se somete a un ciclo continuo de disolución y crecimiento de los conglomerados. Esto puede inducirse de dos maneras: la primera es por medio de la ruptura mecánica de los cristales mediante esferas de vidrio que actúan como molino bajo la agitación del sistema; esto causa que los conglomerados pequeños se disuelvan al ser menos estables, favoreciendo así un proceso de maduración de Ostwald en el cual el material disuelto se incorpora a los cristales de mayor tamaño (los "alimenta") y promueve su crecimiento (Noorduin y cols., 2009). La otra vía es mediante fluctuaciones térmicas, donde los ciclos de calentamiento y enfriamiento inducen la disolución y el crecimiento de los cristales, respectivamente (Noorduin y cols., 2008).

La clave de este mecanismo radica en que los iones de $NaClO_3$ pasan de formar parte del cristal a la fase acuosa (al disolverse) para volver a ser adsorbidos por alguno de los dos enantiomorfos. Esta interconversión sólido-líquido-sólido es reversible y no presenta preferencia alguna para formar cristales de una quiralidad en particular, pues el $NaClO_3$ es aquiral en disolución y sus unidades iónicas (Na^+ y ClO_3^-) pueden incorporarse a cualquiera de los enantiomorfos. Sin embargo, debido a fluctuaciones estocásticas, en un momento dado puede haber un ligero exceso a favor de una lateralidad. Al continuar el ciclo de disolución y crecimiento de cristales, aquellos enantiomorfos que se encuentren en una mayor proporción tendrán mayor probabilidad de adsorber los iones liberados por los cristales que se hallen por debajo de un tamaño crítico (Noorduin y cols., 2008). Esta dinámica representa una ruptura de la simetría en la formación de ambos enantiomorfos y un asa de retroalimentación positiva que conduce a la desaparición completa del enantiomorfo minoritario y a la obtención de una población homoquiral de cristales (Noble-Terán y cols., 2023).

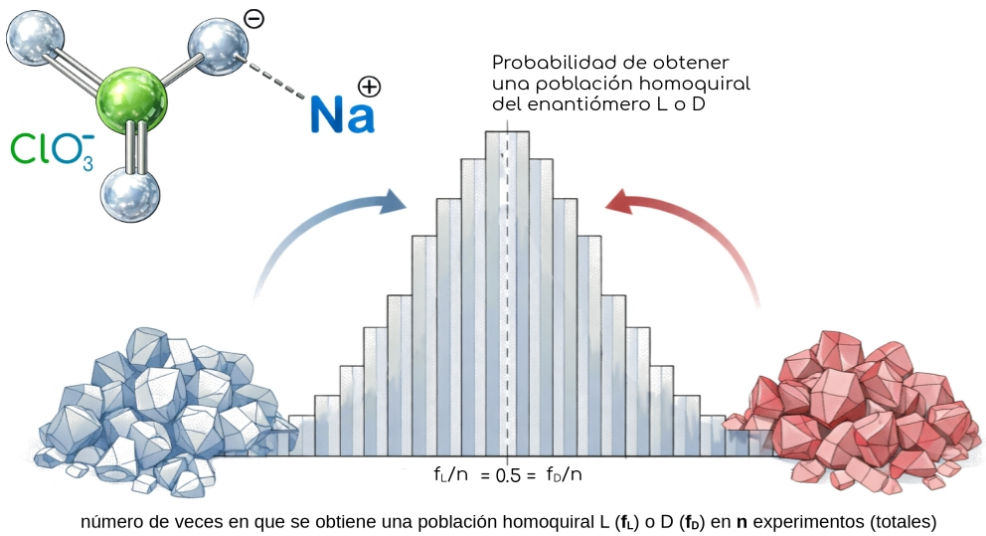


Figura 5. Ejemplo de distribución binomial. Se muestra un histograma idealizado con probabilidades simétricas para obtener poblaciones homoquirales de cristales izquierdos y cristales derechos, cuya máxima probabilidad para ambos es de 50 %. Los colores solo son ilustrativos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El mecanismo de Viedma es estocástico, dando paso a poblaciones homoquirales del enantiomorfo izquierdo o del derecho en una distribución de probabilidad binomial, sin preferencia por alguna lateralidad (Kondepudi y cols., 1990; Viedma, 2005) (Figura 5). Sin embargo, es posible controlar la dirección en la ruptura de la simetría quiral, volviendo determinista al sistema, ya sea por medio de un sentido unidireccional en la agitación de la solución (Ribó y cols., 2001) o empleando iniciadores quirales —también llamados semillas quirales—, como lo son cristales del mismo compuesto o moléculas disueltas en el medio (Putman y Armstrong, 2022). En este sentido, el control sobre la lateralidad del estado homoquiral obtenido tiene implicaciones no solo teóricas para el origen de la vida, sino también prácticas, por ejemplo, en las industrias alimentaria y farmacéutica.

3.2 Ruptura de la simetría por nucleación secundaria

Este mecanismo, observado en sales como el $NaClO_3$, se basa en el crecimiento de cristales a partir de otros que se han formado previamente. En la nucleación primaria, la formación estocástica de los primeros cristales da paso a una mezcla racémica de estos (Kondepudi y cols., 1990).

Cuando los cristales iniciales continúan creciendo en la disolución, pueden inducir una nucleación secundaria: pequeños fragmentos desprendidos de los cristales parentales funcionan como nuevos núcleos para la cristalización, heredando su estructura y, por lo tanto, su quiralidad (Noorduin y cols., 2008). Este mecanismo puede representar un recurso de asimetría si un cristal de mano izquierda o uno de mano derecha se vuelve ligeramente más grande o activo al incorporar más iones a su red cristalina, por lo que generará más núcleos secundarios de la misma quiralidad. Los nuevos cristales, a su vez, generarán más núcleos de cristalización con la misma lateralidad, siendo así un proceso autocatalítico.

Este efecto en cascada puede conducir rápidamente a la predominancia de un solo enantiomorfo en el medio de cristalización. Bajo condiciones adecuadas, estos mecanismos pueden crear poblaciones de cristales con purezas enantioméricas cercanas al 100 % (Viedma, 2005).

4 Algunas implicaciones para las industrias farmacéutica y alimenticia

La obtención de sustancias enantioméricamente puras en la industria farmacéutica es relevante ya que, como se ha mencionado antes, los sistemas biológicos presentan un uso y reconocimiento estereoespecífico de las moléculas quirales. Como consecuencia, los enantiómeros de un mismo fármaco pueden presentar propiedades farmacológicas diferentes en el organismo.

Existen varios ejemplos, siendo uno de los más famosos el caso de la talidomida, que causa malformaciones en el desarrollo embrionario si se administra el *S*-enantiómero, aunque ambos enantiómeros se interconvierten en condiciones fisiológicas, racemizando *in vivo*, lo que dificulta su uso como compuesto enantioméricamente puro (Hutt y Tan, 1996). Otro ejemplo es el del ibuprofeno, donde el *S*-enantiómero es la forma fisiológicamente activa en los humanos (y, en general, en los mamíferos). Este antiinflamatorio puede obtenerse como un racemato, donde el *R*-enantiómero (derecho) es fisiológicamente inactivo, pero es convertido al *S*-enantiómero en el plasma sanguíneo. Si se administra la mezcla racémica, la dosis efectiva se eleva ya que el *R*-enantiómero se convierte parcialmente en la forma activa *S* en el organismo por enzimas hepáticas, lo que puede generar daño renal (Nguyen y cols., 2006).

En muchos casos, la obtención de fármacos enantiopuros se realiza mediante síntesis enantioselectiva o resolución quiral. Desde un punto de vista alternativo, los procesos de cristalización quiral pueden ser explorados como posibles métodos para la separación de enantiómeros; sin embargo, la mayoría de los compuestos orgánicos quirales, incluido el ibuprofeno, cristalizan como compuestos racémicos (tanto el *S*- como el *R*-ibuprofeno forman parte de la misma red del cristal) y no como conglomerados, lo que limita la aplicación directa de estos métodos. Las investigaciones en los mecanismos de nucleación asimétrica, como el mecanismo de Viedma o la cristalización secundaria, constituyen un campo abierto para la búsqueda de procedimientos industriales para obtener conglomerados de estas sustancias con elevada pureza enantiomérica.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La situación es similar en la industria de los alimentos, pues las moléculas quirales son reconocidas de manera diferente según el enantiómero por parte de los quimiorreceptores sensoriales. Debido a que el olfato y el gusto están estrechamente relacionados, podemos encontrar varios ejemplos, desde el clásico reconocimiento del limoneno, donde suele afirmarse que el $S(-)$-limoneno es percibido como el aroma a limón, mientras que el $R(+)$-limoneno provoca el reconocimiento del aroma a naranja (Brenna y cols., 2003). Sin embargo, la validez de este ejemplo tan difundido ha sido cuestionada. En un estudio acerca de las características de los aromas, se argumenta que el $R(+)$-limoneno es el terpeno presente en el aceite de todos los frutos cítricos (limón y naranja incluidos), y que la obtención del $S(-)$-limoneno a partir de la cáscara del limón pudo haberse contaminado con citral, lo que produjo el resultado reportado como el aroma a limón, siendo un artefacto del método empleado y un error que se ha mantenido en la literatura científica (Sell, 2014).

Dejando por ahora a un lado este debate acerca del limoneno, las moléculas quirales orgánicas siempre se encuentran en proporciones asimétricas en los seres vivos. El mentol, obtenido de especies de plantas herbáceas del género *Mentha*, es producido de manera natural como $(-)$-mentol, que corresponde a la configuración $1R,3R,4S$, pues tiene tres centros quirales. Esta notación indica que cada uno de los tres centros quirales de la molécula presenta una configuración absoluta R o S que describe la disposición tridimensional de los sustituyentes alrededor de cada centro quiral, dando paso a 8 isómeros estructurales. El $(-)$-mentol es el responsable del sabor y la sensación de frescura al ser reconocido por los quimiorreceptores sensoriales de las mucosas. El $(+)$-mentol, que corresponde a la configuración $1S,3S,4R$, es percibido como un sabor artificial, similar a medicina, y además interfiere con el reconocimiento del $(-)$-mentol por los quimiorreceptores cuando se administran juntos.

A pesar de que la obtención de $(-)$-mentol a partir de la extracción del aceite de la menta (principalmente de la especie *Mentha canadensis*) es el principal recurso de este monoterpenoide, su síntesis industrial ocurre mediante precursores quirales como el $(+)$-limoneno, o aquirales como el β-pineno, y la ulterior obtención del compuesto puro mediante la cristalización del $(-)$-mentol (Kamatou y cols., 2013). En este sentido, la investigación de los mecanismos de formación de cristales con elevada pureza enantiomérica, como el mecanismo de Viedma o la cristalización secundaria, representa un área que puede dar paso a nuevos procesos que sean factibles para esta actividad económica.

5 Implicaciones para el origen de la quiralidad biológica

En lo que se refiere al origen de la biohomoquiralidad, tanto el mecanismo de Viedma como la nucleación secundaria demuestran que procesos simples basados en ciclos de cristalización y disolución sobre fluctuaciones estadísticas pueden conducir a estados homoquirales en sistemas inorgánicos. Esto pudo significar la presencia de sitios o localidades con asimetría quiral sobre superficies minerales en la Tierra prebiótica, o bien en el medio donde los primeros sistemas vivos se ensamblaron y comenzaron su proceso evolutivo. La transferencia del sesgo quiral de los cristales inorgánicos a moléculas orgánicas como los aminoácidos y los azúcares es un campo de investigación que puede enmarcarse dentro del principio de simetría de Curie: "Cuando ciertas causas producen ciertos efectos, los elementos de simetría de las causas deben ser encontrados en los efectos producidos" (citado por Chalmers, 1970). De este modo, la asimetría quiral inorgánica impondría restricciones geométricas a las dinámicas, sesgando los sistemas moleculares orgánicos en favor de alguno de los enantiómeros.

La ruptura de la simetría quiral en la cristalización del $NaClO_3$ demuestra que existen procesos simples, independientes de las dinámicas biológicas, que conducen a estados homoquirales. Esta asimetría en sistemas inorgánicos pudo contribuir a determinar la asimetría quiral en la biología en uno de dos escenarios generales: el primero, como una condición previa al origen de la vida; el segundo, como un factor ambiental que influyó en el proceso evolutivo durante las primeras etapas posteriores al origen de los sistemas vivos. En ambos casos, una hipótesis que conecta estos fenómenos con la vida propone que los cristales quirales pudieron actuar como los primeros agentes de selección y amplificación de la quiralidad molecular, ya sea antes o después del origen de la vida.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El crecimiento no racémico de minerales quirales o de compuestos orgánicos prebióticos (como aminoácidos que forman conglomerados) pudo proporcionar los primeros entornos locales en la Tierra primitiva con un exceso enantiomérico significativo. A diferencia de otras hipótesis, como la panspermia molecular (Bonner, 1991; Bonner y Rubenstein, 1987; Rubenstein y cols., 1983) o la de Oparin–Haldane (Schopf, 2024), la ruptura de la simetría quiral en la cristalización del $NaClO_3$ no necesitó de un rayo cósmico o de una fuente de luz polarizada circularmente para inducir un crecimiento asimétrico; la fluctuación estadística y la posterior amplificación fueron suficientes.

Uno de los mecanismos más sencillos es que las superficies cristalinas con asimetría quiral hubieran funcionado como superficies de reacción, presentando una interacción asimétrica —debido a afinidades en la geometría molecular— hacia uno de los enantiómeros de las moléculas orgánicas. Por ejemplo, un cristal homoquiral podría favorecer la unión y polimerización de aminoácidos (como los *L*-aminoácidos) o de azúcares (como la *D*-ribosa y la *D*-desoxirribosa). Esto habría llevado a la formación de los primeros oligopéptidos u oligonucleótidos con un sesgo quiral que luego, una vez que la vida molecular se volvió autónoma, perpetuó esta asimetría inicial (Vogl, 2011).

Diversos grupos de investigación han reportado la adsorción selectiva de uno de los enantiómeros por parte de una superficie mineral con asimetría quiral. Algunos ejemplos son la adsorción preferente de *L*-aminoácidos por parte de superficies como la calcita (Hazen y cols., 2001), o la adsorción selectiva de *D*-ribosa sobre superficies minerales (Delidovich y cols., 2014).

En este mismo sentido, la amplificación cruzada pudo jugar un papel relevante. Un pequeño exceso de *L*-aminoácidos o *D*-ribosa, generado quizás por una población homoquiral de cristales inorgánicos, podría haber sido amplificado posteriormente por otros mecanismos (como la catálisis asimétrica en superficies minerales o en sistemas de reacciones autocatalíticas como la reacción de Soai), hasta llegar a la homoquiralidad que observamos actualmente (Barron, 2008).

6 Conclusión: asimetría inorgánica y asimetría biológica

La cristalización del $NaClO_3$ en conglomerados enantiomorfos evidencia que, a partir de un sistema molecular aquiral, la quiralidad puede emerger a nivel supramolecular. Además, la nucleación secundaria y la desracemización de Viedma demuestran que una condición inicial racémica puede generar un estado de homoquiralidad pura mediante procesos fisicoquímicos simples (cristalización, disolución, energía mecánica o térmica). No se necesita una influencia asimétrica externa inicial, sino únicamente fluctuaciones estadísticas, lo que podría representar un mecanismo abiótico para inducir la ruptura de la simetría quiral en moléculas orgánicas —particularmente en los aminoácidos y los azúcares pentosas (como la ribosa y la desoxirribosa)— y determinar el sesgo quiral en los sistemas biológicos.

Por lo tanto, es plausible que en la Tierra prebiótica, en las superficies de minerales sometidas a ciclos de humedad y temperatura, o en sistemas hidrotermales, procesos de cristalización análogos a la desracemización de Viedma actuaran como el punto de inflexión que sesgó la dinámica hacia la prevalencia de los *L*-aminoácidos o *D*-azúcares. Aunque estos mecanismos explican la generación y amplificación de la asimetría quiral en sistemas físicos simples, la transición hacia su incorporación y fijación en sistemas químicos autorreplicantes constituye aún un problema en el estudio del origen de la vida. No obstante, el escenario aquí presentado pudo ser parte de aquel que transformó la asimetría de la química abiótica en la asimetría funcional de los seres vivos, esto último en el sentido de que los organismos mantienen sus procesos biológicos básicos debido a que se encuentran organizados sobre la base de su condición homoquiral (Cruz-Rosas y cols., 2022; Cruz-Rosas y Miramontes, 2021).

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer a nuestro mentor, colega y amigo Thomas Buhse, quien falleció durante la elaboración del presente escrito. Asimismo, queremos agradecer a los dos revisores anónimos por los comentarios y sugerencias realizados para mejorar el manuscrito inicial. Agradecemos a todo

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

el equipo de *La Granja* por el manejo académico y editorial del presente artículo.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación en ciencia básica: CBF-2025-G-28 "Cinética y dinámica de las desracemizaciones tipo Viedma: Fundamentos de la ruptura espontánea de la simetría quiral", financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Ruptura de la simetría quiral en cristales de $NaClO_3$ como modelo para el estudio de la homoquiralidad biológica», se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa exclusivamente para generar y/o editar las imágenes que acompañan al presente manuscrito. La versión final de dichos elementos visuales es producto de la edición manual por parte de los autores. Estas herramientas no fueron empleadas para el análisis, interpretación de datos, generación de resultados, elaboración de conclusiones ni sustitución del criterio académico y científico de los autores.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

H.I.C.R.: Conceptualización, supervisión, visualización, escritura-borrador original, escritura-revisión y edición. **M.E.N.T.:** Supervisión, visualización, escritura-revisión y edición. **J.M.C.:** Supervisión, visualización, escritura-revisión y edición. **H.G.Q.:** Visualización, escritura-revisión y edición. **M.A.C.V.:** Visualización, escritura-revisión y edición. **F.C.R.H.:** Visualización, escritura-revisión y edición. **T.B.:** Supervisión, visualización, escritura-revisión y edición.

Referencias

Barron, L. D. (2008). Chirality and life. *Space Science Reviews*, *135*, 187–201. Online: https://doi.org/10.1007/s11214-007-9254-7

Bitchagno, G. T. M., Nchiozem-Ngnitedem, V.-A., Melchert, D., y Fobofou, S. A. (2022). Demystifying racemic natural products in the homochiral world. *Nature Reviews Chemistry*, *6*, 806–822. Online: https://doi.org/10.1038/s41570-022-00431-4

Bonner, W. A. (1991). Terrestrial and extraterrestrial sources of molecular homochirality. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, *21*(5), 407–420. Online: https://doi.org/10.1007/BF01808311

Bonner, W. A., y Rubenstein, E. (1987). Supernovae, neutron stars and biomolecular chirality. *BioSystems*, *20*(1), 99–111. Online: https://doi.org/10.1016/0303-2647(87)90025-6

Brenna, E., Fuganti, C., y Serra, S. (2003). Enantioselective perception of chiral odorants. *Tetrahedron: Asymmetry*, *14*, 1–42. Online: https://doi.org/10.1016/S0957-4166(02)00713-9

Buhse, T., Cruz, J.-M., Noble-Terán, M. E., Hochberg, D., Ribó, J. M., Crusats, J., y Micheau, J.-C. (2021). Spontaneous deracemizations. *Chemical Reviews*, *121*, 2147–2229. Online: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00819

Carroll, J. D. (2009). A new definition of life. *Chirality*, *21*(3), 354–358. Online: https://doi.org/10.1002/chir.20590

Chalmers, A. F. (1970). Curie's principle. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *21*, 133–148. Online: https://doi.org/10.1093/bjps/21.2.133

Cleaves, H. J. (2023). Cahn–ingold–prelog rules. En *Encyclopedia of astrobiology* (pp. 450–450). Cham: Springer. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6_295

Cruz-Rosas, H. I., y Miramontes, P. (2021). Spatial information in the emergence of life. *Frontiers in Genetics*, *12*, 672780. Online: https://doi.org/10.3389/fgene.2021.672780

Cruz-Rosas, H. I., Noble-Terán, M. E., Cruz, J. M., y Buhse, T. (2022). Quiralidad biológica: la asimetría funcional de la vida. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, *18*(45),

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1–9. Online: https://doi.org/10.30973/inventio/2022.18.45/3

Cruz-Rosas, H. I., Riquelme, F., Ramírez-Padrón, A., Buhse, T., Cocho, G., y Miramontes, P. (2020). Molecular shape as a key source of prebiotic information. *Journal of Theoretical Biology*, *499*, 110316. Online: https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2020.110316

Delidovich, I. V., Simonov, A. N., Taran, O. P., y Parmon, V. N. (2014). Catalytic formation of monosaccharides: from the formose reaction towards selective synthesis. *ChemSusChem*, *7*, 1833–1846. Online: https://doi.org/10.1002/cssc.201400040

Dickinson, R. G., y Goodhue, E. A. (1921). The crystal structures of sodium chlorate and sodium bromate. *Journal of the American Chemical Society*, *43*, 2045–2055. Online: https://doi.org/10.1021/ja01442a008

Flack, H. D. (2003). Chiral and achiral crystal structures. *Helvetica Chimica Acta*, *86*, 905–921. Online: https://doi.org/10.1002/hlca.200390109

Florent, S. R., Couvrat, N., Bilot, C., Marinel, S., Malo, S., y Coquerel, G. F. (2023). *The solid solution between $NaClO_3$ and $NaBrO_3$ revisited.* Online: https://doi.org/10.20944/preprints202306.1610.v1 (Preprint)

Forsman, J. J., y Leino, R. (2011). L-pentoses in biological and medicinal applications. *Chemical Reviews*, *111*, 3334–3357. Online: https://doi.org/10.1021/cr1002563

Franco-Rodríguez, F. C., Gonzáles-Morales, H., Heredia-Barbero, A., Montoya, L., y Reyes-Medina, Y. (2023). Quiralidad en las ciencias naturales: un acercamiento a distintas escalas. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, *37*, 8–22. Online: https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.01

Fuchs, S. A., Berger, R., Klomp, L. W. J., y de Koning, T. J. (2005). D-amino acids in the central nervous system in health and disease. *Molecular Genetics and Metabolism*, *85*, 168–180. Online: https://doi.org/10.1016/j.ymgme.2005.03.003

Gal, J. (2011). Louis pasteur, language, and molecular chirality. i. background and dissymmetry. *Chirality*, *23*, 1–16. Online: https://doi.org/10.1002/chir.20866

Genchi, G. (2017). An overview on D-amino acids. *Amino Acids*, *49*, 1521–1533. Online: https://doi.org/10.1007/s00726-017-2459-5

Harrison, K., Mackay, A. S., Kambanis, L., Maxwell, J. W. C., y Payne, R. J. (2023). Synthesis and applications of mirror-image proteins. *Nature Reviews Chemistry*, *7*, 383–404. Online: https://doi.org/10.1038/s41570-023-00493-y

Hazen, R. M., Filley, T. R., y Goodfriend, G. A. (2001). Selective adsorption of L- and D-amino acids on calcite: implications for biochemical homochirality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*(10), 5487–5490. Online: https://doi.org/10.1073/pnas.101085998

Hutt, A. J., y Tan, S. C. (1996). Drug chirality and its clinical significance. *Drugs*, *52*, 1–12. Online: https://doi.org/10.2165/00003495-199600525-00003

Inaki, M., Liu, J., y Matsuno, K. (2016). Cell chirality: its origin and roles in left–right asymmetric development. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *371*, 20150403. Online: https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0403

Kamatou, G. P. P., Vermaak, I., Viljoen, A. M., y Lawrence, B. M. (2013). Menthol: a simple monoterpene with remarkable biological properties. *Phytochemistry*, *96*, 15–25. Online: https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2013.08.005

Kondepudi, D. K., Kaufman, R. J., y Singh, N. (1990). Chiral symmetry breaking in sodium chlorate crystallization. *Science*, *250*, 975–976. Online: https://doi.org/10.1126/science.250.4983.975

Nguyen, L. A., He, H., y Pham-Huy, C. (2006). Chiral drugs: an overview. *International Journal of Biomedical Science*, *2*(2), 85–100. Online: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23674971/

Niinomi, H., Miura, H., Kimura, Y., Uwaha, M., Katsuno, H., Harada, S., ... Tsukamoto, K. (2014). Emergence and amplification of chirality via achiral–chiral polymorphic transformation in sodium chlorate solution growth. *Crystal Growth & Design*, *14*, 3596–3602. Online: https://doi.org/10.1021/cg500527t

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Noble-Terán, M. E., Cruz, J., Cruz-Rosas, H. I., Buhse, T., y Micheau, J. (2023). A complex reaction network model for spontaneous mirror symmetry breaking in viedma deracemizations. *ChemPhysChem*, *24*, e202300318. Online: https://doi.org/10.1002/cphc.202300318

Noorduin, W. L., Meekes, H., van Enckevort, W. J. P., Millemaggi, A., Leeman, M., Kaptein, B., … Vlieg, E. (2008). Complete deracemization by attrition-enhanced ostwald ripening elucidated. *Angewandte Chemie International Edition*, *47*, 6445–6447. Online: https://doi.org/10.1002/anie.200801846

Noorduin, W. L., Vlieg, E., Kellogg, R. M., y Kaptein, B. (2009). From ostwald ripening to single chirality. *Angewandte Chemie International Edition*, *48*, 9600–9606. Online: https://doi.org/10.1002/anie.200905215

Pavlov, V., y Klabunovskii, E. (2014). Homochirality origin in nature: possible versions. *Current Organic Chemistry*, *18*(1), 93–114. Online: https://doi.org/10.2174/13852728113179990033

Putman, J. I., y Armstrong, D. W. (2022). Recent advances in the field of chiral crystallization. *Chirality*, *34*, 1338–1354. Online: https://doi.org/10.1002/chir.23492

Ribó, J. M., Crusats, J., Sagués, F., Claret, J., y Rubires, R. (2001). Chiral sign induction by vortices during the formation of mesophases in stirred solutions. *Science*, *292*, 2063–2066. Online: https://doi.org/10.1126/science.1060835

Rubenstein, E., Bonner, W. A., Noyes, H. P., y Brown, G. S. (1983). Supernovae and life. *Nature*, *306*(5939), 118. Online: https://doi.org/10.1038/306118a0

Schopf, J. W. (2024). Pioneers of origin of life studies—darwin, oparin, haldane, miller, oró—and the oldest known records of life. *Life*, *14*(10), 1345. Online: https://doi.org/10.3390/life14101345

Sell, C. S. (2014). Analysis and characterisation of odour. En *Chemistry and the sense of smell* (pp. 188–208). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. Online: https://doi.org/10.1002/9781118522981.ch3

Sun, L., Zhang, Y., Yang, Z., Zhang, Y., Dong, Q., Zhang, Z., y Zhang, Q. (2026). Recent advances in synthesis and biomedical applications of structurally chiral plasmonic nanomaterials. *Coordination Chemistry Reviews*, *556*, 217660. Online: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2026.217660

Valentín-Pérez, A., Rosa, P., Hillard, E. A., y Giorgi, M. (2022). Chirality determination in crystals. *Chirality*, *34*, 163–181. Online: https://doi.org/10.1002/chir.23377

Viedma, C. (2005). Chiral symmetry breaking during crystallization: complete chiral purity induced by nonlinear autocatalysis and recycling. *Physical Review Letters*, *94*, 065504. Online: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.065504

Vogl, O. (2011). Chiral crystallization and the origin of chiral life on earth. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, *49*, 1299–1308. Online: https://doi.org/10.1002/pola.24548

Young, B. E., Kundu, N., y Sczepanski, J. T. (2019). Mirror-image oligonucleotides: history and emerging applications. *Chemistry – A European Journal*, *25*, 7981–7990. Online: https://doi.org/10.1002/chem.201900149

Zhao, L.-X., Chen, L.-L., Cheng, D., Wu, T.-Y., Fan, Y.-G., y Wang, Z.-Y. (2024). Potential application prospects of biomolecule-modified two-dimensional chiral nanomaterials in biomedicine. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, *10*, 2022–2040. Online: https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.3c01871

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.