

Geometrías que importan: La quiralidad en los compuestos con metales de transición

Geometries that Matter: Chirality in Transition Metals Compounds

Manuel Alejandro Roque-Ramires, Juan Carlos Temich-Escribano, Samanta Ortiz-Rojas y Ronan Le Lagadec*

Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán C.P. 04510, Ciudad de México, México

*Correspondencia: ronan@unam.mx (Ronan Le Lagadec)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v17i4.1345>

Recibido: 02 de septiembre de 2023; Aceptado: 06 de noviembre de 2023

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. David Morales-Morales

Resumen

En este artículo, se discuten algunos conceptos sobre la quiralidad, tanto en compuestos orgánicos como en complejos de los metales de transición, haciendo énfasis en esta última clase de derivados. Dado que los centros metálicos pueden adoptar diferentes geometrías, la forma en la que se arreglan en el espacio y generan quiralidad es diferente del clásico ejemplo del carbono en la química orgánica. La quiralidad en los compuestos de coordinación se debe a los ligantes, ya sea por la presencia de un átomo quiral en su estructura, o bien, por su conformación espacial, generando en estos casos una quiralidad asociada al metal, la cual será el principal enfoque de este texto. Por otra parte, las aplicaciones principales de los complejos con quiralidad centrada en el metal están asociadas a la catálisis asimétrica, por lo que se describen algunos ejemplos relevantes.

Palabras clave: catálisis asimétrica, quiralidad, química organometálica, metales de transición, simetría

Abstract

In this article, concepts about chirality in both organic compounds and transition metal complexes are discussed, emphasizing the latter class of derivatives. Since metal centers can adopt different geometries, the way they arrange themselves in space and generate chirality differs from the classical example of carbon in organic chemistry. The chirality in coordination compounds is due to the

ligands, either because of the presence of a chiral atom in their structure, or because of their spatial conformation, generating in this case a chirality associated with the metal, which will be the main focus of this text. On the other hand, the main applications of complexes with metal-centered chirality are associated with asymmetric catalysis, so relevant examples are described.

Keywords: asymmetric catalysis, chirality, organometallic chemistry, transition metals, symmetry.

1. Introducción

Un viaje a través de la quiralidad

Al estudiar y adentrarse en el mundo de la química, es importante entender que los átomos y moléculas no se encuentran en dos dimensiones, a pesar de que es la forma en que generalmente se dibujan, sino que se existen en tres dimensiones (Fig. 1). En este mundo tridimensional, el estudio de cómo los átomos y moléculas están localizados en el espacio se conoce como estereoquímica (Ouellette y Rawn, 2019). Esta distribución espacial es sumamente importante, ya que afecta las propiedades y reactividad de las moléculas (Ghosez, 1995).



Figura 1. Modelos tridimensionales de moléculas encontradas en la vida cotidiana.

Figure 1. Three-dimensional representations of common molecules.

¿Cuántas veces se mencionan la palabra quiralidad y su clásica definición: “imágenes especulares no superponibles”? Pero... ¿realmente se entiende el significado de estas palabras? La quiralidad es la propiedad geométrica de un objeto rígido que no es superponible a su imagen especular (su reflejo en el espejo). Se dice que estos objetos no poseen elementos de simetría, como un plano en el espejo, un centro de inversión o un eje de rotación-reflexión. Estos objetos que no presentan ningún elemento de simetría se conocen como objetos asimétricos (Moss, 1996). Para poder entender mejor lo que es la quiralidad se puede empezar con el ejemplo de nuestras manos. En principio, podría parecer que son iguales, pero no existe manera en la que al colocar una mano encima de la otra, los dedos y las palmas sean completamente iguales a los de la otra mano. La mano derecha es el reflejo de la izquierda y *viceversa* (Bentley, 2010). Nuestro propio planeta Tierra, con sus polos achatados, su movimiento de rotación y sus diferentes océanos y continentes, es quiral (asimétrica). Cualquier objeto irregular que no posea planos de simetría (o centros de inversión) es quiral (Gómez- Hortigüela, 2020) (Fig. 2).

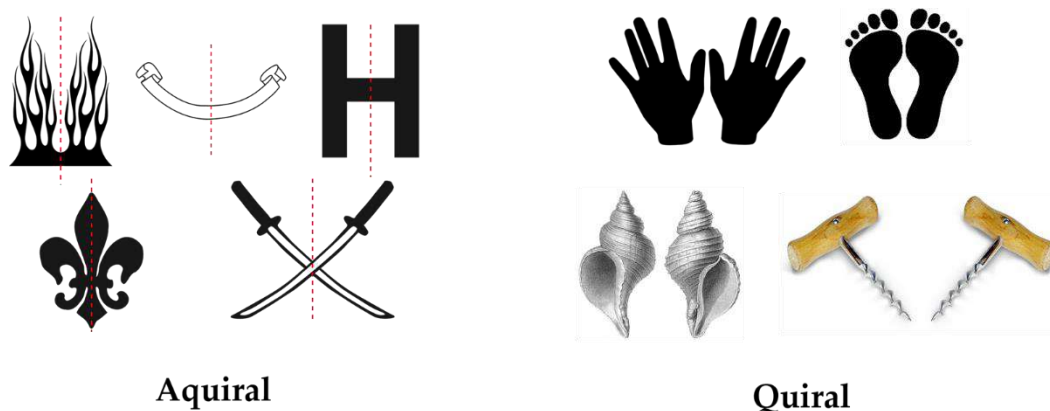


Figura 2. Objetos aquirales (izquierda) y quirales (derecha). Imágenes de Wikimedia Commons.

Figure 2. Non-chiral (left) and chiral (right) objects. Images from Wikimedia Commons.

Cuando esta idea se traslada a la química, particularmente a la química orgánica (el estudio los compuestos basados en carbono), la quiralidad se define en términos de los centros asimétricos dentro de una molécula. Esto implica que las imágenes especulares de una molécula quiral nunca serán iguales, sin importar qué operaciones de simetría se apliquen. Es decir, las imágenes especulares corresponden a dos moléculas diferentes llamadas enantiómeros. Un ejemplo es el caso del átomo de carbono enlazado a cuatro átomos en una geometría tetraédrica (Fig. 3). Sin embargo, es importante mencionar que, si bien asociamos el término de quiralidad a los átomos de carbono, no es exclusivo y átomos distintos del carbono pueden ser centros quirales (por ejemplo, nitrógeno, fósforo o azufre) (Wallentin *et al.*, 2009). ¿Cómo diferenciamos los enantiómeros entre sí? Esto se responde con el concepto de configuración absoluta, la cual es una descripción inequívoca del arreglo espacial de los átomos que forman los enantiómeros. Dos enantiómeros poseen configuraciones absolutas opuestas. Para determinar si un enantiómero es *R* ó *S* (*R* y *S* se refieren a *rectus* y *sinister*, del latín para derecha e izquierda, respectivamente), pensemos nuevamente en el átomo de carbono enlazado a cuatro sustituyentes diferentes como centro quiral. Ahora, se asignan prioridades a los cuatro sustituyentes alrededor del átomo de carbono en función de las reglas de Cahn-Ingold-Prelog, de manera que si los sustituyentes de mayor a menor prioridad siguen un giro en el sentido de las manecillas del reloj tenemos un enantiómero *R*, en caso contrario tenemos un enantiómero *S* (Fig. 3), (Wade, 2017). La prioridad se establece según el número atómico del átomo sustituyente, es decir un átomo tiene prioridad sobre otros de número atómico menor. Si existe coincidencia en el número atómico del átomo, se avanza a lo largo de la cadena de cada sustituyente.

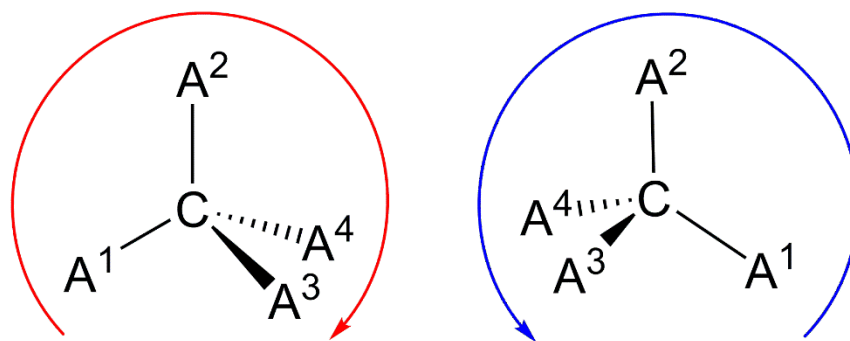


Figura 3. Asignación de los enantiómeros *R* (izquierda) y *S* (derecha) para un átomo de carbono quiral.
Figure 3. Example of the assignment of enantiomers *R* (left) and *S* (right) for a chiral carbon atom.

Cuando una molécula tiene dos o más centros quirales se dice que es un diastereoisómero, es decir que no es superponible con su imagen especular (Fig. 4). Asimismo, los compuestos *meso* se definen como compuestos que poseen centros asimétricos, pero son aquirales debido a la presencia de un plano de simetría. Las estructuras del ácido tartárico en la Fig. 5 ejemplifican estos conceptos (Moss, 1996; Wade, 2017).

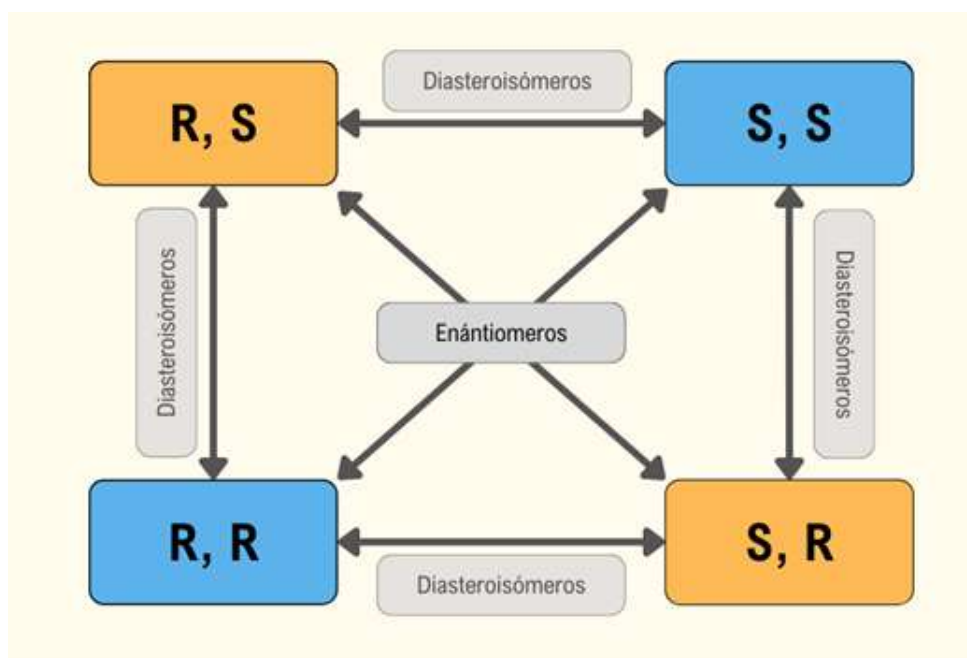


Figura 4. Relación entre los enantiómeros y los diastereoisómeros.
Figure 4. Relation between enantiomers and diastereomers.

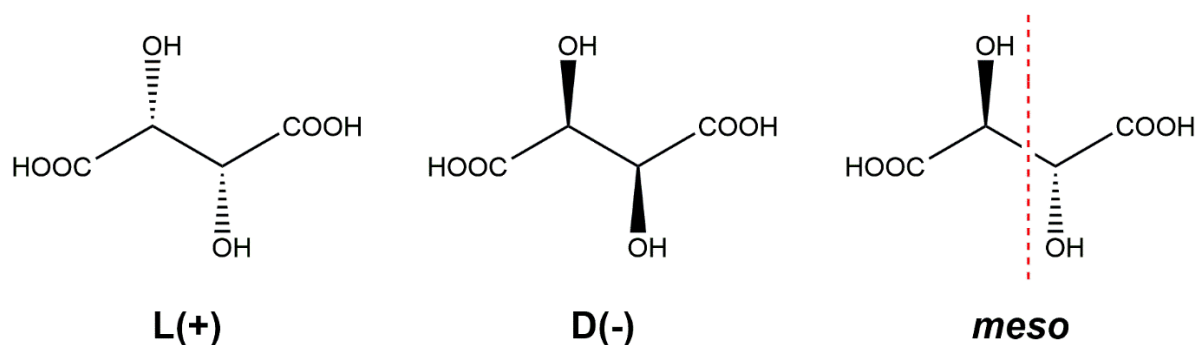


Figura 5. Estructuras posibles del ácido tartárico, un compuesto con dos centros quirales.

Figure 5. Possible structures of tartaric acid, a compound bearing two chiral centers.

Otra pregunta importante que puede surgir es, ¿por qué es importante diferenciar los enantiómeros entre sí? Porque los enantiómeros pueden tener propiedades y reactividad diferentes, particularmente sus propiedades biológicas (Wallentin *et al.*, 2009). Un ejemplo es el limoneno, uno de los principales componentes encontrados en los frutos cítricos. La estructura del limoneno tiene un centro quiral y, por lo tanto, dos enantiómeros (Fig. 6). El *R*-limoneno presenta un aroma a naranja, mientras que el *S*-limoneno presenta un aroma a limón (Nikfar y Behboudi, 2014). Esto es un claro ejemplo de cómo los enantiómeros presentan propiedades diferentes.

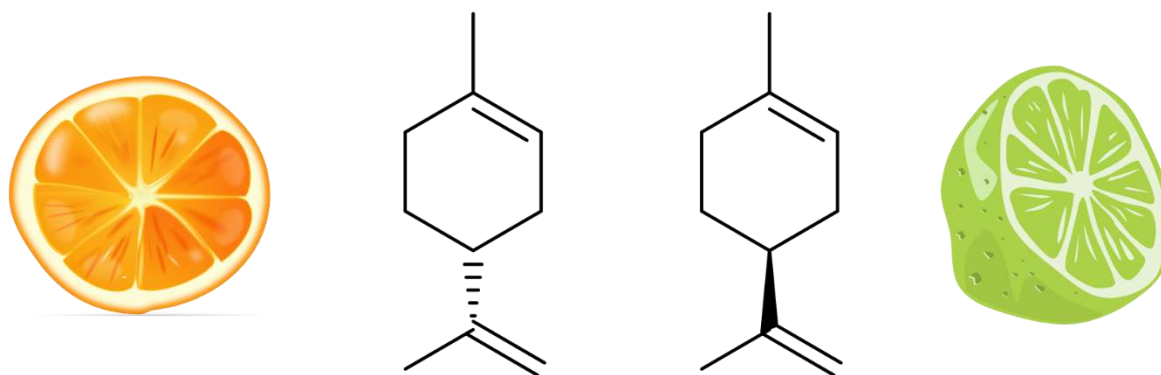


Figura 6. Estructura del *R*-limoneno (izquierda) y el *S*-limoneno (derecha). Imágenes de Pixabay

Figure 6. Structure of *R*-limonene (left) and *S*-limonene (right). Images from Pixabay

Hasta ahora se han mencionado compuestos quirales con un esqueleto basado en carbono, es decir, moléculas orgánicas. ¿Qué pasa cuando tenemos metales en un compuesto? Estos complejos con metales de transición pueden exhibir una variedad de geometrías alrededor del centro metálico más allá de la geometría tetraédrica del carbono y por lo tanto también presentar quiralidad (Fig. 7).

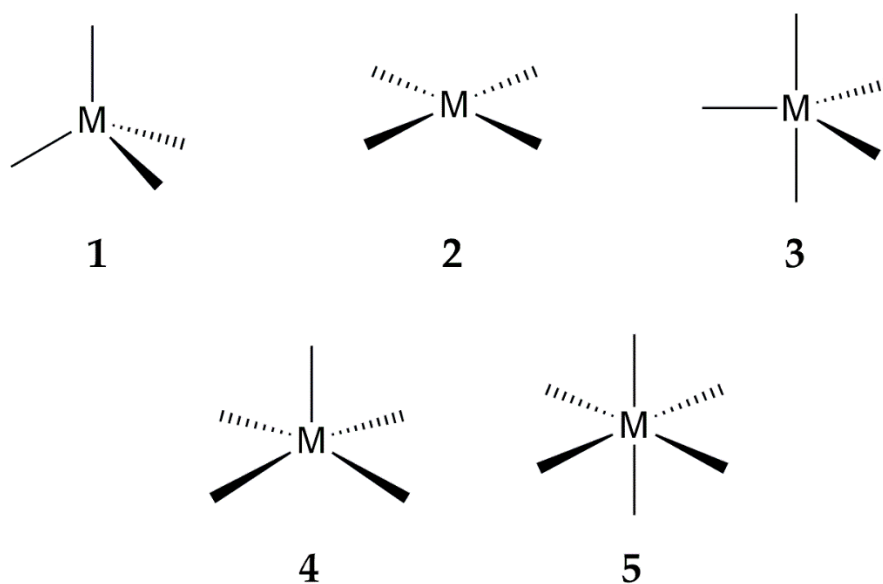


Figura 7. Geometrías encontradas en compuestos con metales de transición: tetraédrica (1), cuadrada plana (2), bipirámide trigonal (3), pirámide de base cuadrada (4) y octaédrica (5).

Figure 7. Geometries found in transition metal compounds: tetrahedral (1), square planar (2), trigonal bipyramidal (3), square pyramidal (4), and octahedral (5).

Un complejo metálico está compuesto del metal rodeado por moléculas orgánicas llamadas ligantes, por lo que existen dos formas de tener complejos metálicos quirales. La primera consiste en la presencia de un ligante quiral, como se observa en la Fig. 8 (Yen Wong *et al.*, 2018).

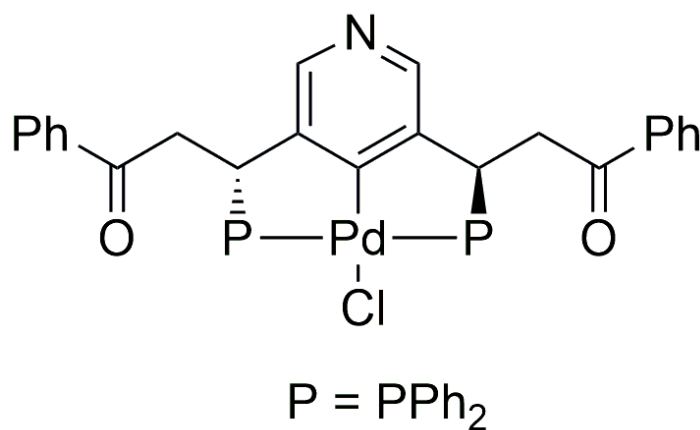


Figura 8. Complejo de paladio con átomos de carbono quirales sobre el ligante (Yen Wong *et al.*, 2018).

Figure 8. Palladium complex with chiral carbon atoms on the ligand (Yen Wong *et al.*, 2018).

La otra forma se debe a un centro metálico quiral que no necesariamente tiene ligantes con átomos de carbono quirales. El arreglo espacial de los ligantes alrededor del centro metálico genera moléculas que no poseen elementos de simetría, por lo tanto, son complejos quirales. Debido al número de ligantes y geometrías posibles, la quiralidad puede generarse de múltiples maneras. Por ejemplo, un centro metálico rodeado de cuatro ligantes diferentes en una geometría tetraédrica se asemeja al átomo de carbono asimétrico. El complejo de rutenio en la Fig. 9 tiene cuatro ligantes distintos. Sin embargo, no se presenta estrictamente una geometría tetraédrica, ya que alrededor del rutenio hay seis sitios de coordinación ocupados. En este ejemplo, el ligante areno ocupa tres sitios de coordinación dando lugar a una geometría conocida como banco de piano, que puede llegar a considerarse pseudotetraédrica al considerar al benceno como un solo ligante y generar quiralidad como en el caso del carbono en química orgánica. Los descriptores *R* o *S* también pueden usarse para diferenciar los enantiómeros formados (Fernández *et al.*, 1999; Amouri y Gruselle, 2008).

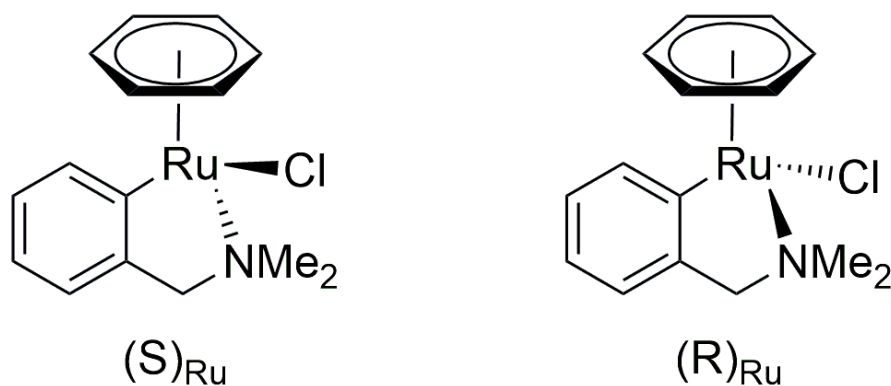


Figura 9. Complejos de rutenio pseudotetraédricos quirales (Fernandez *et al.*, 1999).

Figure 9. Pseudotetrahedral ruthenium chiral complexes (Fernandez *et al.*, 1999).

Un segundo ejemplo se encuentra en complejos octaédricos cuando el centro metálico está enlazado a dos o tres ligantes bidentados. Esta quiralidad llamada helicoidal viene asociada a un giro o rotación alrededor de un eje, el cual dependiendo de la disposición en el espacio de dichos ligantes puede ser hacia la izquierda o hacia la derecha (Fig. 10). En este caso el descriptor que se usan para los enantiómeros es Δ o Λ , dependiendo del sentido del giro. Este tipo de quiralidad se da mayoritariamente en complejos metálicos, pero también existe en moléculas orgánicas (Fig. 10), (Amouri y Gruselle, 2008).

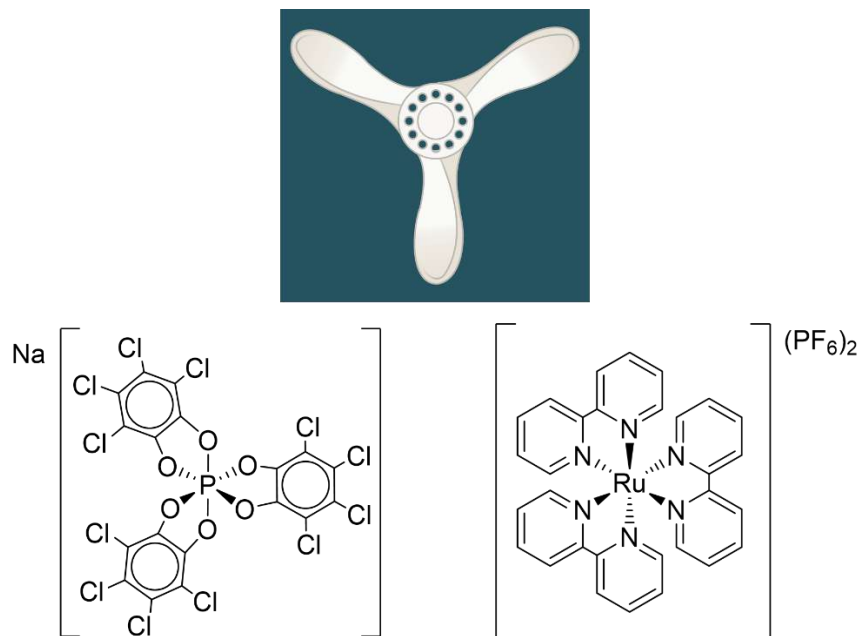


Figura 10. Ejemplos de compuestos con quiralidad helicoidal (derecha): anión orgánico (izquierda) y complejo de rutenio (derecha). Imagen de una hélice (arriba). Imagen de la hélice de Pixabay.

Figure 10. Examples of compounds with helical chirality: organic ion (left) and ruthenium complex (right). Image of a propeller (top). Image of the propeller from Pixabay.

La quiralidad axial se encuentra usualmente en complejos tetracoordinados con una geometría plana cuadrada. Un ejemplo de estos complejos quirales se observa en la Fig. 11. Aquí, la quiralidad resulta de una conformación particular relacionada con la posición de los ligandos situados a lo largo del eje de la molécula. También, puede originarse por dos ligandos monodentados en posición *trans*, es decir separados por 180 grados, con sustituyentes voluminosos que impide su libre rotación, generando la quiralidad. Los descriptores utilizados para diferenciar a los enantiómeros son aR y aS (Amouri y Gruselle, 2008).

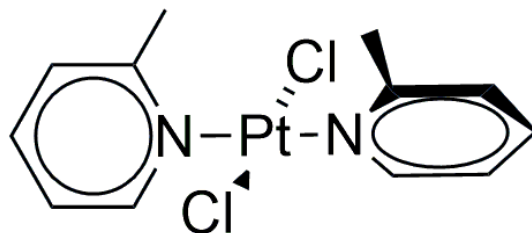


Figura 11. Complejo cuadrado plano de platino con quiralidad axial.
Figure 11. A square planar platinum complex that presents axial chirality.

Continuando con el recorrido, se encuentra la quiralidad planar. Este tipo de quiralidad resulta del rompimiento de la simetría derivada de la presencia de un plano. El caso típico es de los metalocenos heterodisustituidos (Fig. 12). La presencia de los sustituyentes rompe la simetría que existiría en la molécula derivada de un plano y genera compuestos quirales. Los descriptores para los enantiómeros en esta clase de quiralidad son pR y pS (Amouri y Gruselle, 2008). También la encontramos en complejos ciclotalados aromáticos en donde se pierde el plano de simetría por sustitución del ligante mediante una coordinación π de otro fragmento metálico. En este último caso, nuestro grupo de investigación ha obtenido varios derivados con quiralidad planar con complejos de níquel, paladio, platino y rutenio (Espinosa-Jalapa *et al.*, 2013; Roque-Ramires *et al.*, 2020).

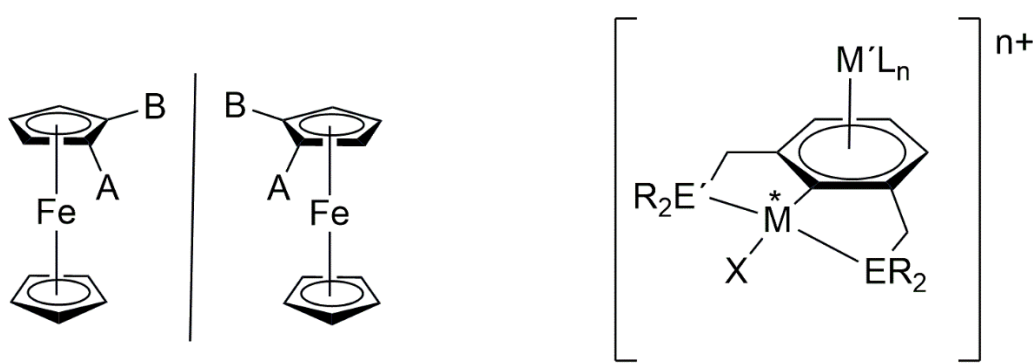


Figura 12. Complejos con quiralidad planar: ferroceno heterodisustituido (izquierda) y complejo bimetalico (derecha).

Figure 12. Complexes with planar chirality: heterodisubstituted ferrocene (left) and a bimetallic complex (right).

La obtención de enantiómeros puros es relevante en muchas aplicaciones, en particular en la síntesis de fármacos. Una de las formas en las que se puede llevar a cabo la preparación de estas moléculas orgánicas de interés es a través de la catálisis. La catálisis es el aumento de la velocidad de una reacción química debido a la adición de una sustancia conocida como catalizador. Los complejos con metales de transición son ampliamente utilizados como catalizadores, ya que es posible llevar a cabo modificaciones estructurales con el fin de tener mayor actividad en una gran variedad de reacciones (Bochmann, 2015).

La catálisis asimétrica es un tipo de catálisis en la que un catalizador dirige la formación de un compuesto quiral a partir de sustratos aquirales, de manera que se favorezca la selectividad hacia uno de los enantiómeros o diaestereoisómeros. Sin embargo, este proceso requiere de catalizadores quirales (Ghosez, 1995). Existen dos formas de tener este tipo de complejos: *i*) a través del uso de ligantes con átomos de carbonos quirales, o *ii*) por una quiralidad centrada en el metal. Muchas veces la obtención de ligantes quirales enantiopuros no es sencilla e involucra muchos pasos o purificaciones complejas. Por lo tanto, el uso de complejos con un centro metálico quiral en procesos

asimétricos ha tomado fuerza ya que su síntesis puede resultar más sencilla (Steinlandt *et al.*, 2023). La selectividad del proceso asimétrico y su efectividad se mide a través del exceso enantiomérico (abreviado como *ee*), el cual es una relación de la cantidad que se obtiene de cada uno de los posibles enantiómeros. Entre mayor sea este valor, más selectivo es el proceso hacia alguno de los enantiómeros. Otra técnica que permite determinar la pureza de los productos obtenidos es el dicroísmo circular que se basa en la interacción de los isómeros con la luz polarizada.

A continuación, se discutirán algunas reacciones representativas del uso de complejos quirales en catálisis. El grupo de investigación de Takahashi describió uno de los primeros estudios sobre el uso de un catalizador quiral sin ligantes quirales usando una familia de complejos de rutenio con quiralidad planar en dos reacciones asimétricas (aminación alílica y alquilación alílica) (Fig. 13). Los rendimientos fueron entre 75 % y 90 %, con valores de exceso enantiomérico arriba del 90 % (Matsushima *et al.*, 2001).

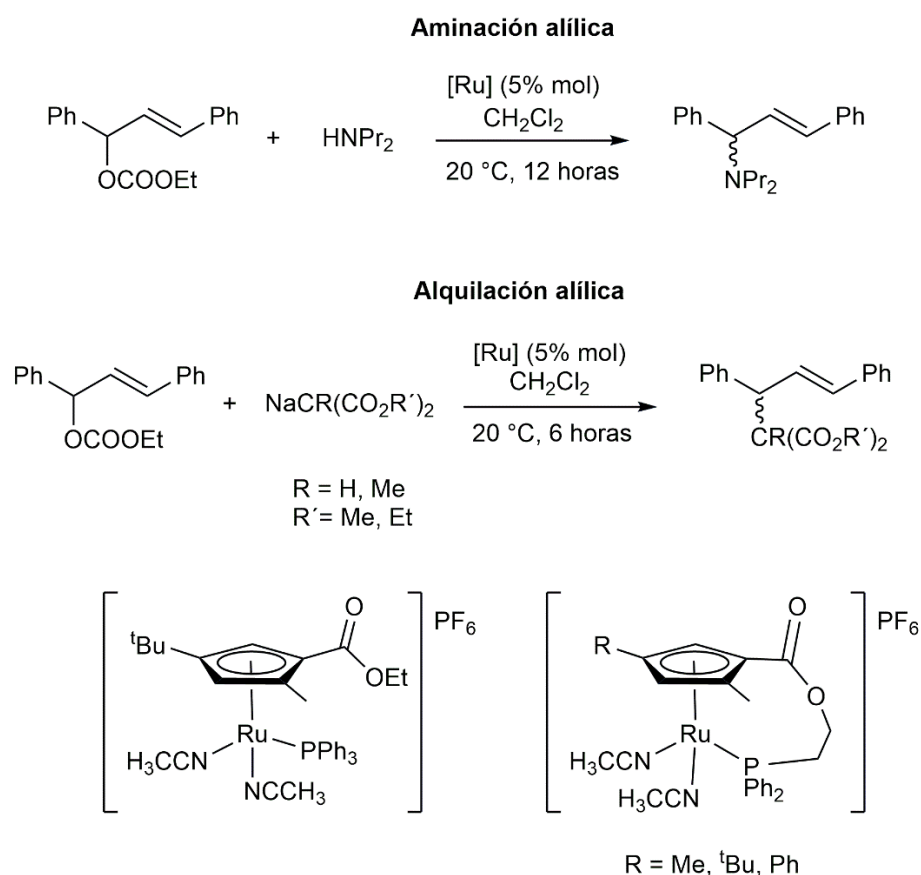


Figura 13. Complejos de rutenio con quiralidad planar usados en catálisis asimétrica (Matsushima *et al.*, 2001).

Figure 13. Ruthenium complexes with planar chirality used in asymmetric catalysis (Matsushima *et al.*, 2001).

Recientemente, el grupo de Gladysz publicó un estudio donde se utilizan con éxito complejos pseudotetraédricos quirales en series de reacciones de adición nucleofílica (Fig. 14). Sin embargo, los excesos enantioméricos obtenidos fueron moderados (Mukherjee *et al.*, 2020).

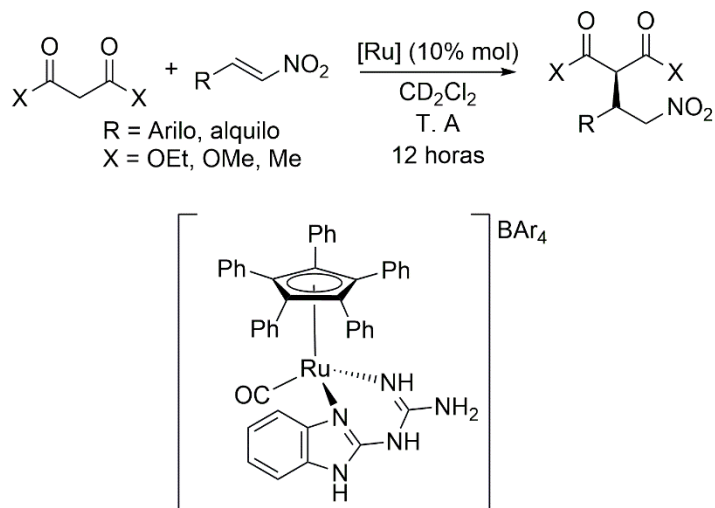


Figura 14. Complejo de rutenio pseudotetraédrico usado en catálisis asimétrica (Mukherjee *et al.*, 2020).

Figure 14. Pseudotetrahedral ruthenium complex used in asymmetric catalysis (Mukherjee *et al.*, 2020).

También, complejos con quiralidad helicoidal han sido estudiados en catálisis asimétrica. Por ejemplo, el grupo de Meggers ha usado exitosamente en una variedad de procesos asimétricos catalizadores quirales de iridio (Larionov *et al.*, 2017), hierro (Hong *et al.*, 2019) y rutenio (Zhou *et al.*, 2019) (Fig. 15).

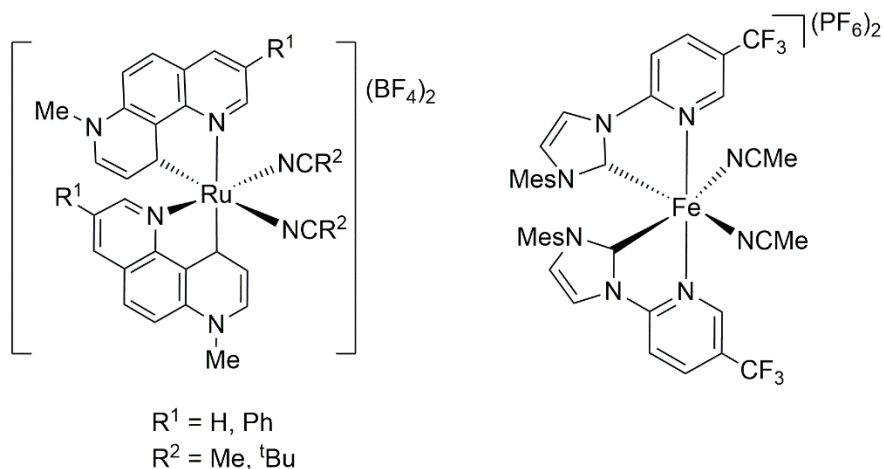


Figura 15. Complejos con quiralidad helicoidal de rutenio (izquierda) y hierro (derecha) usados en catálisis asimétrica.

Figure 15. Ruthenium (left) and iron (right) complexes with helical chirality used in asymmetric catalysis.

Nuestro grupo de investigación ha incursionado en el desarrollo de complejos con quiralidad planar, con posibles aplicaciones en procesos asimétricos. Se obtuvieron complejos heterobimetálicos quirales de níquel, paladio y platino al coordinar un fragmento con hierro o rutenio (Fig. 16, arriba). En la Fig. 16 (abajo), se muestran los espectros de dicroísmo circular de enantiómeros de los complejos de Pd/Ru (izquierda) y Pt/Ru (derecha). Se observan un espectro azul y otro rojo, cada uno corresponde a uno de los enantiómeros.

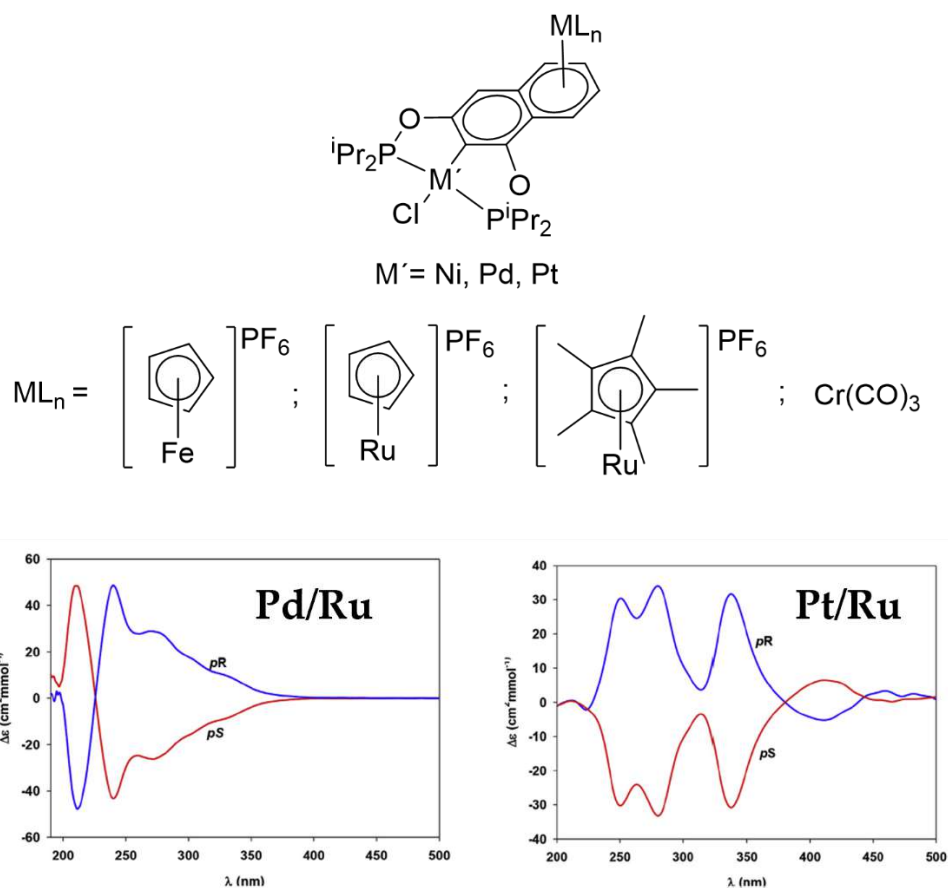


Figura 16. Complejos bimetalicos de níquel, paladio y platino obtenidos por nuestro grupo de investigación (arriba). Espectros de dicroísmo circular de los complejos enantiopuros (abajo). Espectros de dicroísmo circular obtenidos de Espinosa-Jalapa *et al.*, 2017.

Figure 16. Nickel, palladium, and platinum bimetallic complexes obtained by our research group (top). Circular dichroism spectra for enantiopure complexes (bottom). Circular dichroism spectra obtained from Espinosa-Jalapa *et al.*, 2017.

A través de algunos ejemplos, quisimos introducir el concepto de quiralidad en química inorgánica, así como describir la variedad de tipos de quiralidad que pueden presentar los complejos de metales de transición. Asimismo, esperamos haber resaltado la importancia y las posibles aplicaciones de los complejos quirales.

2. Conclusiones y perspectivas

Debido a la preparación a menudo compleja de ligantes quirales, el número de publicaciones sobre el desarrollo de métodos para la obtención de complejos de metales de transición con quiralidad centrada en el metal ha crecido de manera importante en los últimos años. Conocer los diferentes tipos de quiralidad, entender sus conceptos básicos, y las estereoquímicas generadas es crucial para diseñar nuevas moléculas y estrategias sintéticas. Asimismo, es de particular importancia continuar evaluando las aplicaciones de nuevos complejos metálicos quirales como catalizadores activos en procesos asimétricos, así como en otras áreas del conocimiento tales como la química de los materiales o la química medicinal.

Agradecimiento

Agradecemos el apoyo financiero de la DGAPA - UNAM (Proyecto PAPIIT IN-211522) para el desarrollo de nuestros trabajos de investigación sobre complejos quirales.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses para la publicación de este artículo.

3. Referencias

- Amouri, H. & Gruselle, M. (2008). *Chirality in Transition Metal Chemistry: Molecules, Supramolecular Assemblies and Materials*. John Wiley & Sons.
- Bauer, E. B. (2012). Chiral-at-metal complexes and their catalytic applications in organic synthesis. *Chem. Soc. Rev.* 41(8): 3153 – 3167. <https://doi.org/10.1039/C2CS15234G>
- Bentley, R. (2010). Chiral: A Confusing Etymology. *Chirality* 22 (1): 1–2. <https://doi.org/10.1002/chir.20699>
- Bochmann, M. (2015). *Organometallics and catalysis. An introduction*, First Edition, Oxford University Press. ISBN: 9780199668212.
- Espinosa-Jalapa, N.A., Hernández-Ortega, S., Le Goff, X. F., Morales-Morales, D., Djukic, J.P. & Le Lagadec, R. (2013). Coordination of 12-Electron Organometallic Fragments to the Arene Ring of Nonsymmetric Group 10 POCOP Pincer Complexes. *Organometallics* 32(9): 2661–2673. <https://doi.org/10.1021/om400147x>
- Espinosa-Jalapa, N.A., Roque Ramires, M. A., Toscano, R. A., Djukic, J. P. & Le Lagadec, R. (2017). Preparative resolution of stable enantio-enriched POCOP-based planar chiral pincer complexes. *J. Organomet. Chem.* 845: 125 – 134. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2017.04.007>

- Fernandez, S., Pfeffer, M., Ritleng, V. & Sirlin, C. (1999). An Effective Route to Cycloruthenated N-Ligands under Mild Conditions. *Organometallics* 18(12): 2390–2394. <https://doi.org/10.1021/om9901067>
- Flack, H. D. (2003). Chiral and Achiral Crystal Structures. *Helv. Chim. Acta* 86(4): 905–921. <https://doi.org/10.1002/hlca.200390109>
- Ghosez, L. (1995). Strategies for Asymmetric Synthesis. What is the Role of Heterogeneous Catalysis? In: G. Jannes, Vincent Dubois (Eds.) *Chiral Reactions in Heterogeneous Catalysis* (pp 21-28). Springer.
- Gómez-Hortigüela, L. (2020). La quiralidad. El mundo al otro lado del espejo. Catarata. ISBN: 978-84-9097-939-6.
- Hong, Y., Jarrige, L., Harms, K. & Meggers, E. (2019). Chiral-at-Iron Catalyst: Expanding the Chemical Space for Asymmetric Earth-Abundant Metal Catalysis. *J. Am. Chem. Soc.*, 141(11): 4569–4572. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b01352>
- Larionov, V. A., Cruchter, T., Mietke, T. & Meggers, E. (2017). Polymer-Supported Chiral-at-Metal Lewis Acid Catalysts. *Organometallics* 36(8): 1457 – 1460. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.7b00016>
- Matsushima, Y., Onitsuka, K., Kondo, T., Mitsudo, T. & Takahashi, S. (2001). Asymmetric Catalysis of Planar Chiral Cyclopentadienylruthenium Complexes in Allylic Amination and Alkylation. *J. Am. Chem. Soc.* 123(42): 10405 – 10406. <https://doi.org/10.1021/ja016334l>
- Moss, G.P. (1996) Basic terminology of stereochemistry (IUPAC Recommendations). *Pure Appl. Chem.* 68(12): 2193 – 2222. <https://doi.org/10.1351/pac199668122193>
- Mukherjee, T., Ghosh, S. K., Wititsuwannakul, T., Bhuvanesh, N. & Gladysz, J. A. (2020). Chiral-at-Metal Ruthenium Complexes with Guanidinobenzimidazole and Pentaphenylcyclopentadienyl Ligands: Synthesis, Resolution, and Preliminary Screening as Enantioselective Second Coordination Sphere Hydrogen Bond Donor Catalysts. *Organometallics*, 39(8): 1163–1175. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.0c00073>
- Nikfar, S., Behboudi, A. F. (2014). Encyclopedia of Toxicology (3rd Ed.). Philip Wexler (Ed.) Elsevier. ISBN: 9780123864543
- Ouellette, R. J. & Rawn, J. D. (2019). Organic Chemistry: Structure, Mechanism, Synthesis (2nd Ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04004-4>
- Roque-Ramires, M. A., Shen, L. & Le Lagadec, R. (2020). Synthesis of Non-Symmetric Ruthenium(II) POCOP Pincer Complexes and Their Bimetallic Derivatives by π -Coordination of Arenophile Fragments. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2020(28): 2700 – 2708. <https://doi.org/10.1002/ejic.202000425>
- Steinlandt, P. S., Zhang, L. & Meggers, E. (2023). Metal Stereogenicity in Asymmetric Transition Metal Catalysis. *Chem. Rev.* 123(8): 4764 – 4797. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00724>
- Wade, L. G. (2017). Química Orgánica. Volumen 1. Pearson. ISBN: 6073238479
- Wallentin, C. J., Orentas, E., Wärmarm, K. & Wendt, O. F. (2009). Chirality, a never-ending source of confusion. *Z. Kristallogr. Cryst. Mater.* 224(12): 607 – 608. <https://doi.org/10.1524/zkri.2009.1230>

Wititsuwannakul, T., Mukherjee, T., Hall, M. B. & Gladysz, J. A. (2020). Computational Investigations of Enantioselection in Carbon–Carbon Bond Forming Reactions of Ruthenium Guanidinobenzimidazole Second Coordination Sphere Hydrogen Bond Donor Catalysts. *Organometallics* 39(8): 1149 – 1162. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.0c00072>

Yen Wong, E. H., Yu-Xiang J., Li, Y., Pullarkat, S. A. & Pak-Hing L. J. (2018). Catalytic asymmetric synthesis of Pt-and Pd-PCP pincer complexes bearing a para-N pyridinyl backbone. *J. Organomet. Chem.*, 862: 22 – 27. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2018.03.010>

Zhou, Z., Chen, S., Hong, Y., Winterling, E., Tan, Y., Hemming, M., Harms, K., Houk, K. N. & Meggers, E. (2019). Non-C2-Symmetric Chiral-at-Ruthenium Catalyst for Highly Efficient Enantioselective Intramolecular C(sp³)-H Amidation. *J. Am. Chem. Soc.*, 141(48): 19048–19057. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b09301>

2023 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>