

POLÍMEROS DE COORDINACIÓN Y SU APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES

COORDINATION POLYMERS AND APPLICATION IN SENSIG OF POLLUANTS

ANTONIO TÉLLEZ LÓPEZ^{1, 2}

VÍCTOR SÁNCHEZ MENDIETA²

RESUMEN

Los polímeros de coordinación (PCs) son compuestos metal-orgánicos que pueden sintetizarse a partir de iones metálicos (átomos centrales) y moléculas orgánicas (ligantes), generando una gran diversidad de estructuras poliméricas y supramoleculares en una, dos y tres dimensiones. Debido a esta versatilidad de estructuras poseen distintas propiedades entre las que destacan las luminiscentes, este tipo de propiedades se encuentran cuando hay la presencia de ligantes orgánicos aromáticos o policarboxílicos insaturados y iones metálicos de zinc, cadmio y algunos lantánidos. Una vez caracterizadas sus propiedades luminiscentes pueden probarse como sensores de moléculas o iones, algunos de estos considerados contaminantes, contribuyendo a la detección, cuantificación y, en algunas ocasiones, remoción de estos.

Palabras clave: polímeros de coordinación; métodos de obtención; propiedades luminiscentes; detección de contaminantes.

1. Facultad de Química, Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México.
2. División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica del Valle de Toluca.

ABSTRACT

Coordination polymers (CPs) are metal-organic compounds that can be synthesized from metal ions (central atoms) and organic molecules (ligands), generating a great diversity of polymeric and supramolecular structures in one, two and three dimensions. Due to this versatility of structures, they have different properties, among which the luminescent ones stand out. This type of properties is found when there is the presence of unsaturated aromatic or polycarboxylic organic ligands and metal ions of zinc, cadmium and some

Correspondencia
 antoniotellez712@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-4212-2257>
 Fecha de recepción
 22 de enero de 2025.

lanthanides. Once their luminescent properties have been characterized, they can be tested as sensors of molecules or ions, some of which are considered contaminants, contributing to sensing, quantification and sometimes their removal.

Keywords: *coordination polymers; production methods; luminescent properties; sensing of pollutants.*

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones en el campo de los polímeros de coordinación (PCs) han incrementado en los últimos años debido a las diversas aplicaciones que pueden presentar, entre las que destacan el almacenamiento de gases, catálisis, administración de fármacos, almacenamiento de energía, electrónica, fotónica, detección y remoción de moléculas contaminantes.

Los PCs son compuestos formados por ligantes orgánicos (conectores), unidos a iones metálicos (nodos o átomos centrales). Estos ligantes juegan un papel importante en este tipo de compuestos, ya que, dependiendo el modo de conexión, será la estructura final que pueden tener. Los PCs pueden formar compuestos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) (Figura 1).

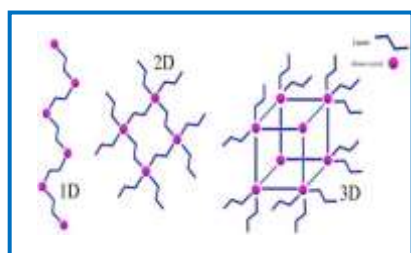


Figura 1. Dimensionalidad de los polímeros de coordinación.

A continuación, se presenta una revisión que destaca los avances recientes en el diseño racional de PCs luminiscentes aplicados en la detección de iones y moléculas contaminantes, enfatizando su potencial para el desarrollo de soluciones ambientales y biomédicas. Asimismo, se aborda una evaluación crítica de los retos actuales y las proyecciones futuras que guían la investigación en este campo emergente.

1. DISEÑO DE LOS POLÍMEROS DE COORDINACIÓN

La síntesis de estos materiales comienza con la elección de los componentes, en primer lugar se tiene el metal o ion metálico, el cual se elige, entre otras cosas, por su capacidad para generar nodos conectores. Los más utilizados son los metales de transición, lantánidos, metales del bloque “p”, incluso algunos alcalinos y alcalinotérreos, y todos los iones derivados de estos. Funcionan bastante bien, debido a que tienen la capacidad de generar diferentes geometrías de coordinación, dependiendo el número de átomos con los que se enlace, pueden ser: lineal, trigonal plano, en forma de T, tetraédrica, cuadrado plano, pirámide de base cuadrada, bipirámide trigonal, octaédrica, prisma trigonal, bipirámide pentagonal, y sus formas distorsionadas (Figura 2). Además, estos también pueden ser condicionantes de las propiedades finales que puedan poseer dichos polímeros, por ejemplo, sus propiedades magnéticas, ópticas, eléctricas, catalíticas, fotocatalíticas, lumínicas, entre otras (Liu y col., 2020).

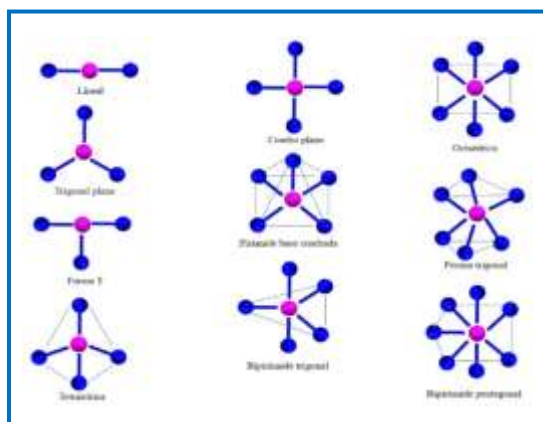


Figura 2. Geometrías de coordinación.

Una parte crucial en el diseño de los PCs es la elección del ligante, debido a que este determinará la estructura final del compuesto y, sobre todo, su dimensionalidad. Estos ligantes son moléculas orgánicas las cuales tienen distintas conformaciones (formas y tamaños), que a su vez poseen átomos capaces de formar enlaces con el átomo central (donantes) como: oxígeno, nitrógeno, azufre, etc. Los ligantes se pueden considerar ligantes de tipo ancla (Figura 3a) o ligantes de tipo puente (Figura 3b). Los ligantes tipo ancla tienen como finalidad condicionar la estructura final del polímero, esto debido a que pueden ocupar dos y hasta tres sitios de coordinación del metal, dependiendo el tipo de molécula. Ahora bien, los ligantes de tipo puente tienen la importante tarea de unir a los átomos centrales, a partir de esto se forman los

polímeros de coordinación, y además dictamina su dimensionalidad. Los ligantes de tipo puente se obtienen a partir de distintas moléculas orgánicas, que destacan por su conformación y tamaño, generando una gran variedad de simetrías y modos de conexión, algunas de estas moléculas son los ácidos di y policarboxílicos, además de heterociclos con átomos de nitrógeno y azufre (Kuznetsova y col., 2020).

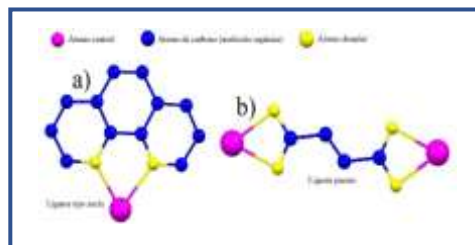


Figura 3. a) Ligantes tipo ancla y b) Ligantes tipo puente.

Los ligantes de tipo puente a su vez pueden tener una clasificación, la cual depende de la versatilidad de unión entre los átomos centrales, ésta puede ser en ligantes de tipo puente rígidos y flexibles. Los ligantes de tipo puente rígidos (Figura 4a) son aquellos que no se modifican dentro de la estructura, es decir que no tienen la capacidad de rotar sus enlaces internos o reorientarse, por lo que se puede tener un mayor control de la estructura final o predecir mejor su conformación. En contraparte tenemos a los ligantes de tipo puente flexibles (Figura 4b), los cuales debido a la presencia de algunos enlaces dentro de su conformación, tales como: $-(CH_2)_n-$, $-CH_2-N-$, $-CH_2-O-$, $-CH_2-S-$, poseen la capacidad de rotar sobre sus enlaces internos generando estructuras más versátiles difíciles de predecir, debido a esto, en algunas ocasiones los ligantes pueden responder a distintos estímulos externos como temperatura, presión o las moléculas ocluidas en la estructura, que pueden hacer que se modifique su conformación obteniendo porosidad variable. Lo que los vuelve candidatos para aplicarlos en almacenamiento, separación, sorción/desorción y detección de moléculas por su comportamiento dinámico (Behera y col., 2021).

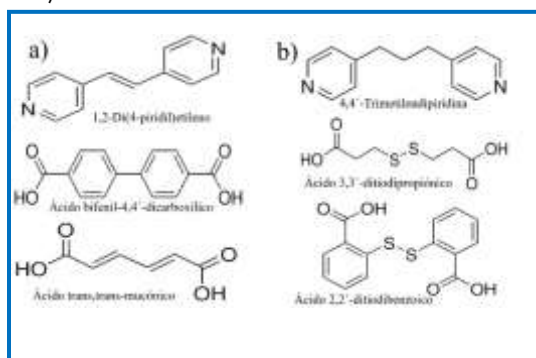


Figura 4. a) Ligantes tipo puente rígidos y b) Ligantes tipo puente flexibles.

El diseño de los PCs juega un papel fundamental en las propiedades que estos puedan presentar, así como en las aplicaciones que puedan tener. Para el uso de los PCs en la detección de moléculas, principalmente agentes contaminantes, se requiere que tengan propiedades luminiscentes. Éstas pueden ser promovidas de las siguientes maneras.

- El tipo de metal o ion metálico: se usan principalmente iones metálicos con configuraciones electrónicas de capa cerrada, como metales de transición con configuraciones d^0 o d^{10} , alcalinos, lantánidos, alcalinotérreos y algunos metales del grupo 13 y 14 (por ejemplo, Cd^{2+} , Zn^{2+} , In^{3+} , Sn^{4+} , Tb^{2+} entre otros) (Hasegawa y Kitagawa, 2022).
- Los ligantes: se pueden utilizar algunos ligantes con estructuras electrónicas específicas, principalmente con presencia de dobles enlaces conjugados (sistemas π -conjugados), debido a esto pueden presentar propiedades luminiscentes, incluso algunos ácidos policarboxílicos al ser desprotonados se pueden modificar las intensidades de luminiscencia (algunos ejemplos son los derivados de la 2,2'-dipiridina, 4,4'-dipiridina, ácido bifenil-4,4'-dicarboxílico, entre otros) (He y col., 2022).

En los PCs la luminiscencia puede surgir debido a contribuciones combinadas, por el centro metálico y el ligante. Un ejemplo de PC luminiscente se observa en $\{Zn(H_2O)(1,4\text{-chdc})(4,4'\text{-dmb})\}_n$ que es un PC unidimensional (1D) donde el 1,4-chdc (1,4-ciclohexanodicarboxilato) es un ligante puente, 4,4'-dmb (4,4'-dimetil-2,2'-bipiridina) ligante ancla y como átomo central un ion metálico de Zn (II) (Figura 5)(Rosales y col., 2019).

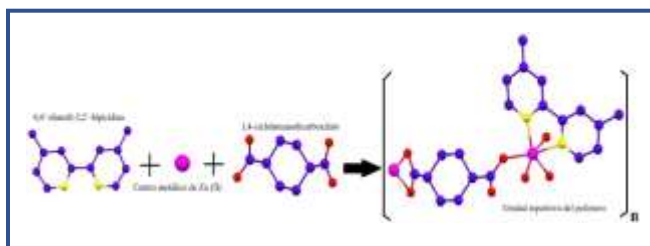


Figura 5. Esquema de síntesis y estructura de un PC 1D (donde morado-zinc, amarillo-nitrógeno, rojo-oxígeno, azul-carbono).

2. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LOS POLÍMEROS DE COORDINACIÓN (SÍNTESIS)

Existen distintas metodologías para lograr la síntesis de los PCs, algunas son bastante sencillas y otras más complejas porque requieren uso de material y equipo más sofisticado. La obtención de compuestos monocristalinos se vuelve

importante para realizar trabajos de investigación, ya que permiten realizar un análisis estructural más detallado (Dzhardimalieva y Uflyand, 2017). Inicialmente los PCs luminiscentes se sintetizaban usando una técnica de difusión, en la actualidad las metodologías sintéticas más empleadas para la obtención de PCs luminiscentes se mencionan a continuación.

- Solvo(hidro)termal. Esta metodología consiste en colocar todos los reactivos junto con un disolvente (agua, etanol, metanol, etc.) en un reactor cerrado, bajo ciertas condiciones de reacción, altas temperaturas por encima de los 90 °C y largos tiempos, que van desde 24 hasta 72 horas o más. Se busca tener una temperatura mayor a la temperatura de ebullición del disolvente, porque así se aumenta la solubilidad de los reactivos favoreciendo la difusión y a su vez la formación de cristales de los PCs. A esta temperatura también se presenta un aumento en la presión, por lo que los reactores se encuentran hechos de una capsula de porcelana y una cubierta de acero inoxidable (Muslim y col., 2021).
- Evaporación lenta del disolvente. Por lo general se da a temperatura ambiente, en donde la formación del producto final ocurre por la mezcla de los reactivos en un reactor, a través de reacciones en solución, en por lo menos dos disolventes distintos. Los iones metálicos y los ligantes orgánicos tienen interacciones de reconocimiento molecular o autoensamblaje, formando así el compuesto esperado. Además, es importante la elección de disolventes adecuados, el pH y la estequiometría (Lin y col., 2023).
- Mecanoquímica. Este método de síntesis a diferencia de los vistos anteriormente, no se requiere el uso de disolventes, ya que las reacciones son activadas por trituración o molienda. Una manera de realizar estos procesos mecanoquímicos es colocar los reactivos en un reactor con bolas de acero pequeñas denominado “molino de bolas”, donde se lleva a cabo la rotura de enlaces intramoleculares provocando una transformación química y la obtención de los productos. Sus principales ventajas son: simplicidad del proceso, reducción de la contaminación, bajo coste, facilidad de procesamiento y la selectividad.
- Asistida por microondas. La síntesis se logra por el calentamiento directo de los disolventes, lo que promueve un aumento en la tasa de nucleación de los cristales que se traduce en una aceleración de la cristalización, formación de materiales nanométricos y mejora de la pureza del producto final. Los parámetros a considerar en la síntesis asistida por microondas son el disolvente, el tiempo de irradiación, la temperatura de reacción y la relación molar de los reactivos.

- **Sonoquímica.** Los reactivos son disueltos y se introducen en un reactor Pyrex tipo bocina equipado con una barra ultrasónica con potencia de salida regulada sin enfriamiento externo, posteriormente se les aplica energía de ultrasonido lo que proporciona una disminución del tiempo de cristalización y una nucleación homogénea. Con el uso de esta metodología se puede mejorar la velocidad de reacción, la pureza, el tamaño de los cristales y el rendimiento.

En menor proporción se utilizan los siguientes métodos.

- **Difusión.** Se utiliza cuando los reactivos son poco solubles, esta técnica se caracteriza por la obtención de los cristales del polímero de coordinación en una interfaz. Los reactivos se separan en dos disoluciones, generalmente los iones metálicos en una (fase acuosa) y los ligantes orgánicos en otra (fase oleosa), posteriormente una se pone en contacto con la otra lentamente, evitando que se mezclen rápidamente. Después de un tiempo los ligantes se difunden lentamente con los iones orgánicos promoviendo la formación de una red de coordinación, formando así el compuesto de coordinación.

- **Síntesis urotérmica.** Es una técnica que tiene como principio la síntesis solvo(hidro)termal con una modificación, la cual consiste en que se usa como disolvente a la urea y sus derivados. Ya que algunas veces dicha molécula se puede coordinar al ion metálico, una vez formados los PCs cristalinos, la urea se puede eliminar fácilmente del compuesto generando porosidad en el compuesto y sitios metálicos abiertos, lo que puede traer aplicaciones prometedoras a los compuestos sintetizados por este método.

- **Síntesis en CO₂ supercrítico.** Consiste en el uso de CO₂ supercrítico (por encima de 31 °C y 73.8 atm) como disolvente, ya que en éste se encuentra en un estado entre el líquido y gas lo que le permite difundir a los reactivos. Dicha mezcla se introduce en un reactor presurizado capaz de mantener las condiciones del CO₂ supercrítico, posteriormente se aumenta la temperatura manteniéndola en un rango de 40 a 80 °C generando presiones mayores a las 73 atm. Por último, se comienza a enfriar el sistema reduciéndose la presión y regresando a condiciones ambientales, logrando así la formación del producto, dicho proceso puede tardar varias horas e incluso días.

- **Síntesis ionotérmica.** Nuevamente es una adecuación de la síntesis solvo(hidro)termal, donde el disolvente utilizado es ahora un líquido iónico o disolvente eutéctico. Aprovechando sus propiedades como presión de vapor cero, alta estabilidad térmica y buena solvatación; esto los vuelve interesantes



para llevar a cabo la síntesis de los PCs. Los líquidos iónicos más empleados son los derivados del 1-alquil-3-metilimidazolio.

- **Electroquímica.** En esta síntesis los ligantes se encuentran disueltos en una solución adecuada con una sal conductora, los iones metálicos se integran continuamente a través de la disolución del ánodo en la mezcla de reacción. El uso de una fuente de corriente estable y constante permite controlar la velocidad de reacción, la concentración, los disolventes y la temperatura controlan la solubilidad de la fase cristalina. Esta metodología permite una síntesis continua (no por lotes) y un método alternativo de síntesis que no requiere una fuente externa adicional de calor.

3. APLICACIÓN DE LOS PCs EN SENSADO

El interés por los PCs ha incrementado a lo largo del tiempo, sobre todo en los últimos años, debido a que estos compuestos presentan una gran variedad de propiedades entre las que destacan: ópticas, eléctricas, magnéticas, catalíticas, entre otras. Algunos PCs pueden presentar más de una de estas propiedades obteniendo un material multifuncional, esto sumado a la diversidad estructural que poseen aumenta sus posibles aplicaciones. Luego entonces los PCs se pueden utilizar en diferentes campos de aplicación, donde destacan la síntesis orgánica (catalizadores), las ciencias ambientales (detección de iones y moléculas, fotocatalizadores en la degradación de moléculas, separación y sorción de gases), la energía (almacenamiento de energía y de H_2) y la medicina (liberación de fármacos) (Liu y col., 2021).

Una de las principales aplicaciones de gran interés para los investigadores es el uso de los PCs en la detección de iones o moléculas. Para poder comprender lo que ocurre específicamente en la detección, primero se tienen que entender sus propiedades ópticas, más específicamente las luminiscentes.

La luminiscencia consiste en la emisión de luz a través de la absorción de energía y dependiendo del tiempo que tarde este proceso se puede clasificar de las siguientes maneras.

- **Fluorescencia:** es la emisión de luz cuando un electrón excitado, en un estado de mayor energía, regresa a su estado fundamental, esto en estados energéticos de la misma multiplicidad, dicho proceso se da de manera instantánea (aproximadamente 10 nanosegundos).

- Fosforescencia: es la emisión de luz en estados energéticos de distinta multiplicidad, donde los procesos de relajación de los electrones tardan más tiempo (de microsegundos hasta segundos).

La luminiscencia en los PCs se puede presentar por distintos mecanismos entre los que destacan:

- Emisión centrada en el metal: depende del tipo de metal o ion metálico utilizado, se basa en las transiciones de electrones entre orbitales d-d, o f-f.
- Emisión centrada en el ligante: es originada por el ligante orgánico sin la participación del átomo central (metal), donde los electrones se transfieren de un orbital $\pi-\pi^*$.
- Transferencia de carga del ligante al metal: este mecanismo de emisión se presenta cuando un electrón del ligante se transfiere al metal y tras la excitación, posteriormente en la relajación el sistema libera energía generando emisión de luz.
- Transferencia de carga del metal al ligante: como su nombre lo indica, la transferencia del electrón va del metal al ligante.
- Transferencia de carga de ligante a ligante: se presenta en los PCs cuando hay dos o más tipos distintos de ligantes, donde el electrón va de un ligante donador rico en electrones a otro aceptor con deficiencia electrónica.
- Transferencia de carga de metal a metal: ocurre por la presencia de dos distintos metales o iones metálicos en un mismo PC, donde la transferencia va de un metal donador a otro aceptor.

El mecanismo de emisión en los PCs se puede variar dependiendo la composición y estructura, incluso la luminiscencia puede ser modificada por la presencia de moléculas que formen parte de la estructura (ocluidas o coordinadas) (Zhao y col., 2025).

La medición de la luminiscencia en los PCs es importante para su uso en la detección de moléculas, ya que algunos PCs luminiscentes tienen la capacidad de detectar la presencia de ciertos analitos (incluso en concentraciones muy pequeñas del orden de partes por millón) como gases, iones, metales y moléculas orgánicas. Este proceso ocurre principalmente por la interacción del analito con el PC, gracias a su estructura y a los componentes de este (iones metálicos y ligantes) que a veces le permite interactuar de manera específica con el analito (quimioselectividad) (Zhang y col., 2015).

La manera en que se puede detectar si existe una interacción entre el PC y el analito es a través de la medición de la luminiscencia, ya que se puede



presentar un cambio alterando la intensidad o duración de la emisión, incluso provocando la eliminación de esta. Teniendo la medida (espectro de emisión) del PC solo y después colocándolo en un medio junto al analito. Otro cambio que se puede presentar es en la absorbancia que incluso es perceptible a simple vista por un cambio en la coloración (Rosales y col., 2021). En ocasiones puede ocurrir una adsorción de la molécula o ion de estudio que es capturada en la estructura porosa de PC y para que después exista una desorción de estas (Figura 6).

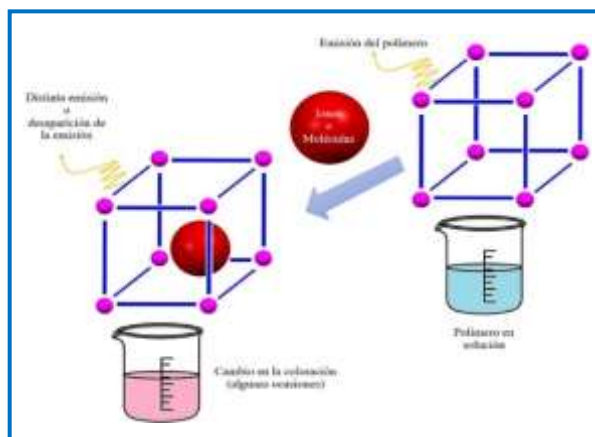


Figura 6. Esquema de la detección de los analitos, por los polímeros de coordinación.

Los PCs luminiscentes se pueden utilizar para detectar contaminantes los cuales pueden ser moléculas, cationes o aniones. A continuación, se muestran algunas aplicaciones más específicas.

- **Detección de contaminantes del agua.** Es un grave problema ambiental que afecta tanto a los ecosistemas acuáticos como a la salud humana, por lo que la detección y eliminación de estos se vuelve un punto clave en la preservación ambiental, los PCs pueden ser usados para este fin en la detección de contaminantes orgánicos (fenoles y colorantes), metales pesados (iones de Pb^{+2} y Hg^{+2}) y aniones (CN^- , NO_2^- y F^-). Un ejemplo de esto se puede observar en un PC formado por Cd, 1,10-fenantrolina y ácido benceno-1,3,5-tricarboxílico, donde se presenta la detección de cationes Cu^{2+} y Ni^{2+} en un medio acuoso (con límites de detección en 2.78×10^{-8} M para Cu^{2+} y 6.15×10^{-9} M para Ni^{2+}), incluso se usó para la eliminación del diclofenaco como microcontaminante orgánico (Kabak y Kendüzler, 2022). Adicionalmente otro PC ahora de Zn con el 1,4-ciclohexanodicarboxilato y la 4,4'-diterbutil-2,2'-bipiridina ha permitido la detección cuantitativa de aniones CN^- (Rosales y col., 2019).

- Detección de contaminantes en el aire. Gracias a la quema de combustibles fósiles la contaminación del aire se ha incrementado de manera exponencial a lo largo de las décadas, los PCs han sido estudiados para la detección y en algunas ocasiones la captura de moléculas que son consideradas contaminantes como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de carbono (CO_x) y compuestos orgánicos volátiles (formaldehído, metano, clorofluorocarbonos, etc.). Un PC (1D) de Cu con bencilamina se expone a HCl (gaseoso), sufriendo un cambio de color drástico, generando así la detección de dicha molécula (López-Molino y Amo-Ochoa, 2020). También se ha reportado otro polímero unidimensional de cobre con timina, el cual se ha utilizado como detector (sensor) de humedad ambiental y en detección de agua en solventes orgánicos (Maldonado y col., 2019).

- Detección de contaminantes en alimentos. Es un problema significativo que afecta tanto la seguridad alimentaria como la salud pública, algunos de los contaminantes que han sido detectados con los PCs son pesticidas y micotoxinas. El $[\text{Zn}(\text{DTP})\text{SO}_4(\text{H}_2\text{O})_3]_n$ donde el DTP = 3,5-di(1,2,4-triazol-1-il)piridina es un PC que ha sido estudiado para la detección de pesticidas tales como el imidacloprid (IMI) y metamitron (MMT), este polímero además funcionó en la detección de iones (Fe^{3+} , MnO_4^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) y antibióticos (1,2-dimetil-5-nitroimidazol y sulfametazina) (Yu y col., 2023). Además, se han reportado dos PCs sintetizados con Cd(II), con un ligante derivado del ácido p-terfenil-2,2'',5'',5'''-tetracarboxílico y otros derivados de las piridinas, donde muestran una detección de 112 ppb (partes por billón) del pesticida 2,6-dicloro-4-nitroanilina, incluso presentan selectividad para algunos aniones de Cr(VI) y un antibiótico (nitrofurano) (Fan y col., 2020).

Además, los PCs también han sido utilizados en el monitoreo del suelo, ya que han logrado la detección y cuantificación de los iones amonio (NH_4^+), que son importantes para la disponibilidad de nitrógeno (N_2) en las plantas. Incluso se pueden aplicar como sensores biomédicos para la detección de algunas biomoléculas tales como la glucosa, ADN/RNA y proteínas, contribuyendo así en el diagnóstico de enfermedades y otras aplicaciones (Debsharma y col., 2024).

Los PCs luminiscentes pueden presentar diferentes interacciones con las moléculas o iones contaminantes, debido a esto se obtiene como respuesta una modificación de sus propiedades luminiscentes (aumento, disminución o anulación de la emisión). Luego entonces los PCs luminiscentes pueden ser utilizados en la detección de contaminantes. A continuación, se retoma el PC

$n \{Zn(H_2O)(1,4\text{-chdc})(4,4'\text{-dmb})\}_n$ donde se explica su uso en la detección del anión CN^- por la formación del $Zn(CN)_2$ (Figura 7) (Rosales y col., 2019).

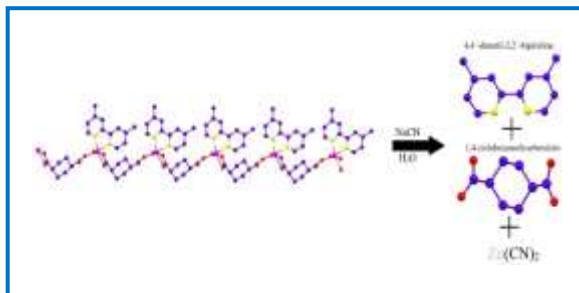


Figura 7. Esquema de la interacción del polímero de Zn (II) $\{Zn(H_2O)(1,4\text{-chdc})(4,4'\text{-dmb})\}_n$ con el cianuro, formando cianuro de zinc.

CONCLUSIONES

La revisión presentada evidencia el notable progreso en el desarrollo de PCs luminiscentes como plataformas versátiles y eficientes para la detección de iones y moléculas contaminantes. La alta sensibilidad, selectividad y capacidad de respuesta de estos materiales, junto con su diseño estructural ajustable, los posiciona como herramientas prometedoras en el monitoreo ambiental y en el control de calidad del agua, aire y alimentos. A pesar de los avances significativos, persisten desafíos importantes relacionados con la estabilidad química, la reproducibilidad sintética y la implementación práctica a gran escala.

El uso de PCs para la detección de iones y moléculas no solo aborda problemas críticos en salud y medio ambiente, sino que también ofrece soluciones innovadoras ya que se pueden detectar, cuantificar (incluso en bajas concentraciones) y algunas veces remover moléculas o iones que se consideren contaminantes, contribuyendo al desarrollo sostenible de los ecosistemas y mejorando la calidad de vida. Algunos de estos PCs son selectivos a cierto tipo de iones lo que no ofrecen otro tipo de técnicas utilizadas con la misma finalidad.

Futuras investigaciones deberán enfocarse en la mejora de los PCs luminiscentes para su aplicación en entornos reales y complejos, usos prolongados y repetidos, así como en la integración de estas plataformas en dispositivos portátiles y tecnologías de detección en tiempo real.

REFERENCIAS

- Behera, N., Duan, J., Jin, W., & Kitagawa, S. (2021). The chemistry and applications of flexible porous coordination polymers. *EnergyChem*, 3(6): 100067. <https://doi.org/10.1016/j.enchem.2021.100067>
- Debsharma, K., Dutta, B., Dey, S., & Sinha, C. (2024). Metal–Organic Coordination Polymers: A Review of Electrochemical Sensing of Environmental Pollutants. *Crystal Growth & Design*, 24(15): 6503–6530. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.4c00421>
- Dzhardimalieva, G. I., & Uflyand, I. E. (2017). Design and synthesis of coordination polymers with chelated units and their application in nanomaterials science. *RSC Advances*, 7(67): 42242–42288. <https://doi.org/10.1039/C7RA05302A>
- Fan, L., Wang, F., Zhao, D., Sun, X., Chen, H., Wang, H., & Zhang, X. (2020). Two cadmium(II) coordination polymers as multi-functional luminescent sensors for the detection of Cr(VI) anions, dichloronitroaniline pesticide, and nitrofurant antibiotic in aqueous media. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 239: 118467. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118467>
- Hasegawa, Y., & Kitagawa, Y. (2022). Luminescent lanthanide coordination polymers with transformative energy transfer processes for physical and chemical sensing applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 51: 100485. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2022.100485>
- He, Y.-C., Wu, S., Zhang, J., Qin, W.-H., Liu, J., Zhao, F.-H., Liu, L., & Jing, Z. (2022). Syntheses, structures, and luminescence properties of five new coordination polymers based on 3-carboxy-1-(3'-carboxybenzyl)-2-oxidopyridinium and neutral ligands. *CrystEngComm*, 24(38): 6715–6723. <https://doi.org/10.1039/D2CE00921H>
- Kabak, B., & Kendüzler, E. (2022). Synthesis, characterization and adsorption/sensing applications of novel cadmium(II) based coordination polymer. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3): 107989. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107989>
- Kuznetsova, A., Matveevskaya, V., Pavlov, D., Yakunenko, A., & Potapov, A. (2020). Coordination Polymers Based on Highly Emissive Ligands: Synthesis and Functional Properties. *Materials*, 13(12): 2699. <https://doi.org/10.3390/ma13122699>
- Lin, Z., Richardson, J. J., Zhou, J., & Caruso, F. (2023). Direct synthesis of amorphous coordination polymers and metal–organic frameworks. *Nature Reviews Chemistry*, 7(4): 273–286. <https://doi.org/10.1038/s41570-023-00474-1>
- Liu, H., Wang, Y., Qin, Z., Liu, D., Xu, H., Dong, H., & Hu, W. (2021). Electrically Conductive Coordination Polymers for Electronic and Optoelectronic Device Applications. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 12(6): 1612–1630. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c02988>

- Liu, J.-Q., Luo, Z.-D., Pan, Y., Kumar Singh, A., Trivedi, M., & Kumar, A. (2020). Recent developments in luminescent coordination polymers: Designing strategies, sensing application and theoretical evidences. *Coordination Chemistry Reviews*, 406: 213145. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.213145>
- López-Molino, J., & Amo-Ochoa, P. (2020). Gas Sensors Based on Copper-Containing Metal-Organic Frameworks, Coordination Polymers, and Complexes. *ChemPlusChem*, 85(7): 1564–1579. <https://doi.org/10.1002/cplu.202000428>
- Maldonado, N., Vegas, V. G., Halevi, O., Martínez, J. I., Lee, P. S., Magdassi, S., Wharmby, M. T., Platero-Prats, A. E., Moreno, C., Zamora, F., & Amo-Ochoa, P. (2019). 3D Printing of a Thermo- and Solvatochromic Composite Material Based on a Cu(II)-Thymine Coordination Polymer with Moisture Sensing Capabilities. *Advanced Functional Materials*, 29(15): 8424. <https://doi.org/10.1002/adfm.201808424>
- Muslim, M., Ali, A., Neogi, I., Dege, N., Shahid, M., & Ahmad, M. (2021). Facile synthesis, topological study, and adsorption properties of a novel Co (II)-based coordination polymer for adsorptive removal of methylene blue and methyl orange dyes. *Polyhedron*, 210: 115519. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2021.115519>
- Rosales-Vázquez, L. D., Dorazco-González, A., & Sánchez-Mendieta, V. (2021). Efficient chemosensors for toxic pollutants based on photoluminescent Zn(II) and Cd(II) metal-organic networks. *Dalton Transactions*, 50(13): 4470–4485. <https://doi.org/10.1039/D0DT04403B>
- Rosales-Vázquez, L. D., Valdes-García, J., Bazany-Rodríguez, I. J., Germán-Acacio, J. M., Martínez-Otero, D., Vilchis-Néstor, A. R., Morales-Luckie, R., Sánchez-Mendieta, V., & Dorazco-González, A. (2019). A sensitive photoluminescent chemosensor for cyanide in water based on a zinc coordination polymer bearing ditert-butyl-bipyridine. *Dalton Transactions*, 48(33): 12407–12420. <https://doi.org/10.1039/C9DT01861A>
- Yu, B.-Y., Wang, D., Zhu, G.-S., Wei, C.-J., Jia, Y., Song, C.-L., Cheng, J., & Zhao, H.-Q. (2023). Synthesis, crystal structure of four 1D to 3D coordination polymers as potential sensor for the detection of ions, antibiotics and pesticides in water media. *Polyhedron*, 230: 116242. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.116242>
- Zhang, X., Wang, W., Hu, Z., Wang, G., & Uvdal, K. (2015). Coordination polymers for energy transfer: Preparations, properties, sensing applications, and perspectives. *Coordination Chemistry Reviews*, 284: 206–235. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2014.10.006>
- Zhao, Z.-H., Yang, Q.-Y., Xu, X.-R., & Tong, Z.-Y. (2025). Luminescent coordination polymers with d10 metal centres for cation sensing: A review. *Microchemical Journal*, 215: 114096. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.114096>