

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE REDES ORGANOMETÁLICAS:
NUEVAS PERSPECTIVAS Y TENDENCIAS EN EL GRUPO DE
INVESTIGACIÓN EN POLÍMEROS-UIS**

**LUIS ÁNGEL HOLGUÍN GALVIS
PAULA CAMILA PÓREZ SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2021

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE REDES ORGANOMETÁLICAS:
NUEVAS PERSPECTIVAS Y TENDENCIAS EN EL GRUPO DE
INVESTIGACIÓN EN POLÍMEROS-UIS**

**LUIS ÁNGEL HOLGUÍN GALVIS
PAULA CAMILA PÓREZ SUÁREZ**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Químico

**DIRECTOR:
GUSTAVO EMILIO RAMIREZ CABALLERO
Ingeniero Químico, PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2021

DEDICATORIA

A mi madre, no sabía que era una tesis UIS, pero ahora lo sabe y siempre me apoyó.

A los amigos con los que siempre pude contar: María Camila C, Angie D, Mónica S, Diana L, Draíllyn C y el Hamiltoniano Harvey.

*A Paula, los dos empezamos esta tesis y los dos la acabamos.
Primero muerto que rendido.*

A B. I. M. M.

Luis Angel Holguín Galvís

*A Dios por orientarme el buen camino y darme la fuerza para
continuar.*

*A mis padres por su apoyo incondicional y confianza, que hicieron
posible culminar mi carrera profesional.*

A mis hermanos Danna y Nicolás por creer en su hermana mayor.

*A mi familia Suárez Bayona y Pórez Daza, por toda su ayuda
durante los años de estudio.*

*A mis amigos, Alejandra, Angie y Wilmer, por ser los compañeros
durante toda esta etapa de formación, con las mejores experiencias
que siempre recordaré.*

*A mi compañero de tesis Luis, por su perseverancia y por hacer
posible este trabajo después de un año complicado.*

Paula Camila Pórez Suárez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química por su formación integral y académica durante estos años.

Al Doctor Gustavo Emilio Ramírez Caballero, director del Grupo de Investigación en Polímeros, por su orientación y colaboración en el presente trabajo.

Al magister César Augusto Bravo Sanabria por su ayuda, consejos y guía durante este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	17
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 REVISIÓN DE REDES TANTO DEL GIP COMO DE OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	20
3.1.1 Redes organometálicas en el grupo de investigación en polímeros.	20
3.1.2 Redes organometálicas para separación y almacenamiento.....	26
3.1.3 Redes organometálicas para catálisis.	32
3.1.4 Redes organometálicas para aplicaciones energéticas.	37
3.2 USOS DE LAS REDES ORGANOMETÁLICAS EN COLOMBIA.....	41
4. CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Capacidades de adsorción de diferentes MOFs con diferentes medicamentos.....	30
Tabla 2. Resultados de diferentes contenedores de energía.....	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología de Investigación.	17

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Redes organometálicas en el Grupo de Investigación en Polímeros (GIP)	59
Anexo B. Nuevas líneas de investigación en redes organometálicas	64

RESUMEN

Título: Revisión del estado del arte sobre redes organometálicas: nuevas perspectivas y tendencias en el Grupo de Investigación en Polímeros-UIS*

Autores: Luis Ángel Holguín Galvis
Paula Camila Pórez Suárez**

Palabras Clave: Red Organometálica, MOF, CuBTC, FeBTC, ZrBTC, ZrBDC, MIL-125, GIP-UIS

Descripción:

Las redes organometálicas o MOF en inglés son materiales compuestos de un ligando orgánico y un centro o clúster metálico, las cuales tienen diversas aplicaciones que han sido estudiadas en el Grupo de Investigación en Polímeros-UIS. El grupo de investigación ha centrado sus esfuerzos únicamente en la síntesis de redes para la adsorción de ciertos fluidos (metales pesados, CO₂) y catálisis, pero estas mismas redes se pueden utilizar en otras aplicaciones que no se han investigado.

Teniendo en cuenta esto, en este trabajo de grado se hizo en primer lugar una revisión bibliográfica de las redes organometálicas sintetizadas previamente en el grupo de investigación en polímeros para luego proseguir con la revisión bibliográfica sobre los campos de aplicación en tendencia en estos materiales; donde se encontraron diversas similitudes en procesos de síntesis, precursores de la red y objetivo de investigación para aplicaciones como separación de medicamentos y fluidos, almacenamiento de medicamentos para una posterior liberación, catálisis y para almacenamiento de energía.

Estas líneas de tendencia permiten direccionar las redes del grupo de investigación UIS hacia nuevos horizontes para expandir la investigación en torno a este material.

Finalmente, se analizaron y discutieron los posibles usos que podrían tener las redes del grupo de investigación en polímeros, teniendo en cuenta los campos en tendencia, para la solución de problemas dentro del ámbito colombiano o para mejorar procesos encontrando usos en refinación, tratamiento de aguas, descontaminación de aire y purificación de biogás.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero Ingeniero Químico, PhD

ABSTRACT

Title: Review of the state of the art on organometallic networks: new perspectives and trends in the Polymer Research Group-UIS *

Authors: Luis Ángel Holguín Galvis
Paula Camila Pórez Suárez**

Keywords: Organometallic framework, MOF, CuBTC, FeBTC, ZrBTC, ZrBDC, MIL-125, GIP-UIS

Description:

Organometallic framework or MOF are materials composed of an organic ligand and a metal center or cluster with various applications studied in the Polymer Research Group-UIS. The research group has focused only his studies on synthesizing these frameworks for adsorption of fluids (heavy metals, CO₂) and catalysis, but these same MOFs can be used in other applications that have not been investigated yet.

Herein, we firstly did a bibliographic review of the organometallic frameworks previously synthesized in the polymer research group and then a bibliographic review on the trends in these materials where various similarities were found in method of synthesis, MOFs precursors and research objective for applications such as separation of drugs and fluids, storage of drugs for subsequent release, catalysis, and energy storage.

These trend lines allow the polymer research group to be directed towards new horizons to expand the research around this material.

Finally, we analyzed and discussed possible uses that organometallic framework could have for solving problems in Colombia or to improve processes, finding application in water treatment, air decontamination, biogas purification and refining.

* Degree Work

** Faculty Psychochemical Engineering, School of Chemical Engineering. Gustavo Emilio Ramírez Caballero Chemical Engineer, PhD

INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación en polímeros (GIP) de la Universidad Industrial de Santander, dentro de su labor investigativa y educativa ha buscado generar conocimiento y solucionar ciertas problemáticas mundiales. Abordando diversas líneas de investigación destacándose la producción de diversos polímeros y materiales. Entre ellas están: la elaboración y caracterización de polímeros derivados del glicerol y polímeros a partir de aceites naturales como poliuretanos a partir del aceite de ricino, con el fin de estudiar su reología y comportamiento térmico. No obstante, una línea que diverge de los polímeros convencionales, pero que ha venido acaparando el interés del grupo de investigación en mención es la síntesis y caracterización de redes organometálicas (o MOFs abreviado en inglés).

Una red organometálica es un material cristalino nanoporoso, formado por enlaces coordinados entre dos precursores, un ligando orgánico y centro o clúster metálico. Generalmente, el precursor metálico es introducido con óxidos, sulfuros o nitratos, por lo que, los enlaces entre metal-oxígeno-carbono a los que se unirá el ligando, tienen diferentes geometrías de coordinación, denominándose unidad secundaria de construcción (SBU). Las redes organometálicas se destacan por sus propiedades texturales tales como alta área superficial (hasta $6000 \text{ m}^2/\text{g}$) y volumen de poro (hasta $3.60 \text{ cm}^3/\text{g}$), siendo de gran interés debido a su flexibilidad estructural y versatilidad de diseño^{1 2 3}.

¹ CADENA D., "Síntesis y caracterización de un polímero de coordinación de zinc y ácido p-tereftálico con potencial aplicación en la liberación controlada de ibuprofeno," 2019

² ZHOU H. C., LONG J. R., and YAGHI O. M., "Introduction to metal-organic frameworks," *Chemical Reviews*, vol. 112, no. 2, pp. 673–674, 2012, doi: 10.1021/cr300014x

³ SONI S., BAJPAI P. K. and ARORA C., "A review on metal-organic framework: synthesis, properties and application," *Characterization and Application of Nanomaterials*, vol. 2, no. 2, pp. 1–20, 2018, doi: 10.24294/can.v2i2.551

La obtención de estas redes puede darse por diversos métodos de síntesis, donde las condiciones del proceso como precursores, solventes, agentes de crecimiento (moduladores), temperatura y pH, influyen sobre su tamaño de poro, morfología, modos de coordinación, color, reactividad, entre otros. Estos métodos de síntesis consisten en la mezcla de un precursor metálico y el ligando en solución acuosa, alcohólica u orgánica aprótica para luego aplicar un calentamiento ^{4 5}. Dentro de los métodos más utilizados se encuentran:

- Solvotérmico: Se disuelven los reactivos en un solvente y la solución obtenida se calienta en un recipiente hermético a alta presión y a temperaturas superiores al punto de ebullición del solvente. Este es el más utilizado debido a su facilidad, pero posee tiempos de reacción muy largos y alto consumo energético⁶.
- Sonoquímico: Se somete la mezcla a un baño de ultrasonido con alta energía, donde se produce un rompimiento de las moléculas debido a diferencia de presión interna gracias a la formación, crecimiento e implosión de burbujas de vacío localizadas, conocido como cavitación, generando así energía que se traduce en el aumento de la velocidad de calentamiento, enfriamiento y presión⁷.
- One-pot: Se introduce mezcla a un reactor bajo agitación a condiciones de presión ambiente y bajas temperaturas. La reacción debe tener un buen rendimiento y los reactivos puntos de ebullición más altos a la temperatura de reacción, para evitar destrucción térmica. Así, se consigue una disminución en costos, tiempo y productos químicos⁸.

Las redes organometálicas son muy prometedoras para aplicaciones donde el área superficial juegue un papel relevante. Por lo tanto, estos materiales han sido

⁴ CADENA D., Op. Cit.

⁵ SONI S., BAJPAI P. K. and ARORA C., Op. Cit.

⁶ STOCK N. and BISWAS S., "Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): Routes to various MOF topologies, morphologies, and composites," *Chemical Reviews*, vol. 112, no. 2, pp. 933–969, 2012, doi: 10.1021/cr200304e

⁷ *Ibíd.*

⁸ HAYASHI Y., "Pot economy and one-pot synthesis," *Chemical Science*, vol. 7, no. 2, pp. 866–880, 2016, doi: 10.1039/c5sc02913a

investigados como adsorbentes o separadores. Por ejemplo: en la separación selectiva de gases se usan MOFs, ya que a través de estas plataformas porosas es posible alcanzar alta capacidad de almacenamiento además de tener flexibilidad en factores que influyen en el diseño tales como síntesis con diferentes centros metálicos para separaciones de CO₂, CH₄ y captura de NH₃^{9 10 11}. Además, las MOFs presentan sitios activos dispersos y accesibles que favorecen la catálisis y fotocatalisis, pues se obtienen altos rendimientos, selectividad y sobre todo su reutilización; usadas para degradar de metales pesados y oxidación bencénica^{12 13}.

El GIP ha centrado sus investigaciones concernientes a las MOFs básicamente en su síntesis y caracterización experimental, obteniendo MOFs a base de Zirconio, Cobre, Hierro y Titanio exhibiendo excelentes propiedades texturales (área superficial, volumen de poro), además de otras características específicas obtenidas mediante transformaciones o funcionalizaciones pre o postsintéticas, que han conllevado a que se potencien para el grupo de investigación nuevas líneas de investigación diferentes de la separación de gases, como son: la catálisis heterogénea en medio líquido y la fotocatalisis¹⁴. Las MOFs han demostrado grandes avances para el GIP que, aunque han sido logros superados aún quedan nuevos objetivos los cuales permiten potenciar su uso, a través de su estudio concienzudo. Las líneas investigativas que se vienen realizando y otras en futuro cercano, pueden ir desde la separación por medio de membranas híbridas, transporte y liberación de fármacos, o incluso modificaciones que proporcionen

⁹ *Ibíd.*

¹⁰ SORRIBAS S. and TÉLLEZ C., "MOFs: propiedades y aplicación en separaciones más eficientes," *Boletín del Grupo Español del Carbón*, no. 41, pp. 19–22, 2016

¹¹ BORFECCHIA E. et al., "Insights into adsorption of NH₃ on HKUST-1 metal-organic framework: A multitechnique approach," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 116, no. 37, pp. 19839–19850, 2012, doi: 10.1021/jp305756k

¹² ROJAS Z. M., "Estructuras metal orgánicas de titanio (MIL-125 y MIL-125-NH₂): síntesis, caracterización y evaluación de la actividad en procesos fotocatalíticos," 2017

¹³ YANG Q., XU Q., and JIANG H. L., "Metal-organic frameworks meet metal nanoparticles: Synergistic effect for enhanced catalysis," *Chemical Society Reviews*, vol. 46, no. 15, pp. 4774–4808, 2017, doi: 10.1039/c6cs00724d

¹⁴ ROJAS Z. M., *Op. Cit.*

propiedades magnéticas con lo cual el GIP espera tocar y profundizar sobre temas y problemáticas específicas que no solo le conciernen al mundo académico, sino que, además sirvan de apoyo para solventar algunas problemáticas y mejorar procesos industriales del país.

Con lo anteriormente expuesto, este trabajo de grado tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica del estado del arte, organizando la información y presentando el alcance de las investigaciones de las redes organometálicas sintetizadas en el GIP, y posteriormente de las nuevas tendencias en dichos campos con el fin de analizar y orientar las líneas de investigativas del grupo hacia nuevas aplicaciones, para generar conocimiento y soluciones a problemáticas, con posibles usos en el entorno colombiano.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

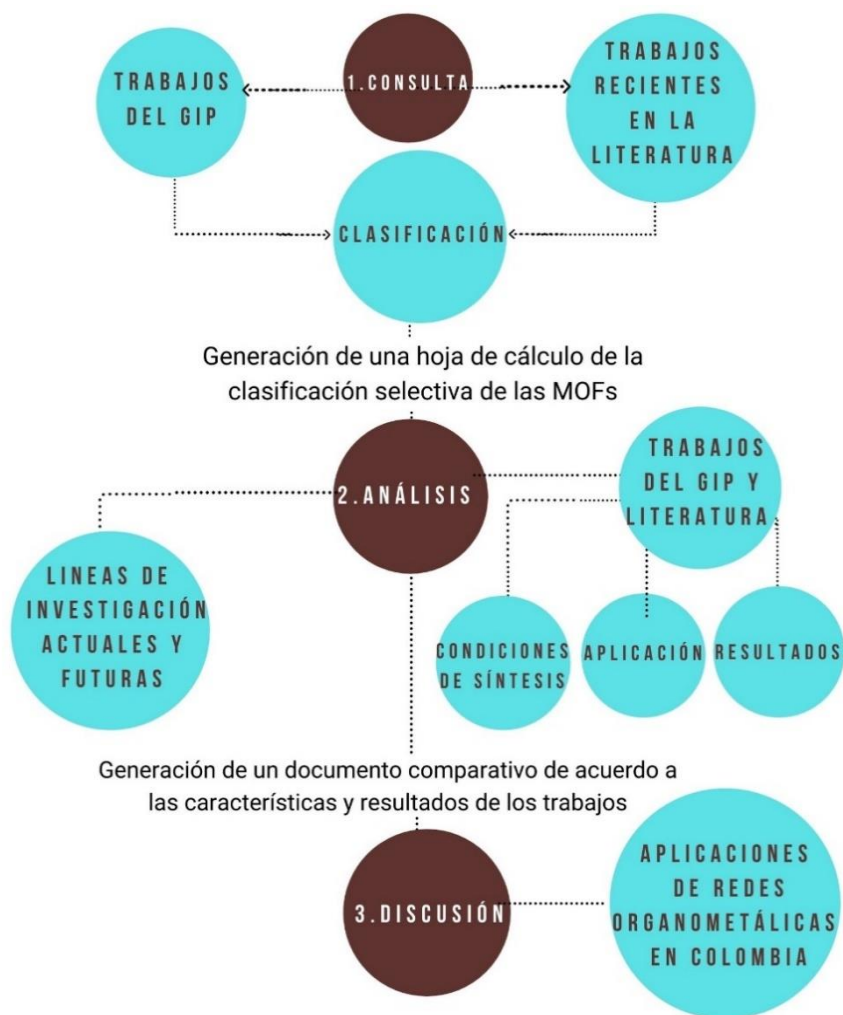
Realizar una revisión bibliográfica sobre redes organometálicas que abarque sus tendencias actuales, y direccionar esta línea en el Grupo de Investigación en Polímeros (GIP) en un entorno regional y global.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer diferencias entre las redes organometálicas reportadas en diversos trabajos de investigación a nivel mundial y aquellos que han surgido en el grupo de investigación en polímeros.
- Analizar las líneas de investigación actuales y futuras tendencias de las redes organometálicas, con el fin de comparar estos estudios con los reportados por el GIP.
- Discutir los campos de aplicación de las redes organometálicas en Colombia, con el fin de determinar los potenciales usos y soluciones a problemas regionales.

2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Figura 1. Metodología de Investigación.



Fase 1. Revisión bibliográfica sobre redes organometálicas.

Actividad 1. Búsqueda de documentos relacionados con el tema, tanto del GIP como en tendencias.

- Se realizó una búsqueda de trabajos de grado, proyectos de investigación, artículos científicos del grupo de investigación en polímeros, por medio de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander y posteriormente se realizó una clasificación de estos.
- Se buscaron documentos para las tendencias en redes organometálicas en buscadores como Science Direct, Scopus, Web of Science, ElSevier. Luego se recurrió a revistas electrónicas como American Chemical Society (ACS) y Royal Society of Chemistry. Para una búsqueda más efectiva se hizo uso de palabras clave como: "Zr MOF", "Cu MOF", "Ti MOF", "ZrBTC", "FeBTC", "CuBTC", "ZrBDC".
- Se hizo la lectura completa de los documentos seleccionados para identificar las condiciones de síntesis, evaluación y aplicación de los materiales para tener una orientación al momento de su comparación.

Actividad 2. *Clasificación de documentos con nuevas líneas de investigación.*

Se clasificaron los documentos por medio de una hoja de cálculo, la primera con su respectivo título, tipo de documento, objetivo de investigación, tipo de MOF, método de síntesis y precursores para las redes organometálicas del GIP (Anexo A) mientras que las nuevas líneas investigativas se clasificaron en otra hoja de cálculo que contiene tendencia, título, objetivos de investigación, tipo de MOF, método de síntesis y precursores (Anexo B) esto con el fin de tener información del mismo tipo para ambas hojas.

Fase 2. Análisis de la revisión bibliográfica realizada.

Actividad 3. Comparación de la revisión.

A partir de la clasificación realizada previamente de cada uno de los trabajos encontrados, se procedió a realizar un análisis el cual permitió identificar similitudes entre los archivos para poder realizar una comparativa entre las tendencias en MOFs desarrolladas a nivel mundial y las MOFs sintetizadas en el GIP basado en la información de las hojas de cálculo hechas.

Fase 3. Discusión sobre redes organometálicas en Colombia.

Actividad 4. Revisión del entorno colombiano referente a las MOFs.

Se analizaron los posibles campos de aplicación de las redes organometálicas en Colombia de acuerdo con las líneas de investigación actuales y otras líneas en tendencias con el propósito de determinar sus usos potenciales de las redes del GIP las cuales contribuyan a la resolución de problemas.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 REVISIÓN DE REDES TANTO DEL GIP COMO DE OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta el objetivo principal de orientar las redes organometálicas obtenidas en el grupo de investigación en polímeros hacia nuevas líneas de investigación es necesario en primer lugar revisar cuales son las redes ya obtenidas y luego proceder a hacer la revisión sobre las tendencias de este material para campos como la separación y almacenamiento, para catálisis y para aplicaciones energéticas.

3.1.1 Redes organometálicas en el grupo de investigación en polímeros. El grupo de investigación en polímeros dentro de su línea relacionada con las redes organometálicas ha sintetizado y caracterizado, exitosamente, redes tipo CuBTC, ZrBTC, FeBTC, MIL-125 (Ti), CuAc y ZrBDC, las cuales fueron investigadas bajo diferentes condiciones, en trabajos que incluyen tesis de pregrado, posgrado y artículos (Anexo A), cumpliendo su papel para adsorción de fluidos y posible catálisis.

La CuBTC ó HKUST-1 es la estructura más destacada de este tipo de materiales debido a su versatilidad de síntesis además de sus múltiples aplicaciones. Esta red se obtiene a partir de un precursor de cobre y como ligando el benceno tricarboxílico (BTC) proveniente generalmente de ácido trimésico (H_3BTC), al cual se les puede agregar un modulador que es un compuesto orgánico el cual compite con las moléculas del ligando para unirse a los iones metálicos generando defectos dentro de la estructura cristalina lo que favorece la formación de poros con mayor tamaño y por ende mayor área superficial.

Granados estudió las variables de síntesis que afectan las propiedades texturales, estabilidad estructural y capacidad de adsorción de la CuBTC, con el propósito de determinar una estrategia de síntesis que conduzca a la obtención de adsorbentes de CO_2 de alto desempeño en gases de combustión¹⁵ donde se obtuvo mejores resultados en síntesis solvotérmica a 85°C , pH 1.72 y 24h de reacción, pero no se abordó otros parámetros como relaciones entre precursores por lo que López & Mendoza decidieron estudiar estos factores, donde para el mismo propósito (adsorber CO_2) se sintetizó por el mismo método la CuBTC variando la relación $\text{Cu}/\text{BTC}=1.9, 2.5, 3.0$ y la relación acetato de sodio, usado como modulador, $\text{AcNa}/\text{BTC}=0.13, 0.3, 0.5$ ¹⁶ donde no hubo diferencia en la cristalinidad pero si en el tamaño de cristal, ya que el acetato de sodio aumentó la velocidad de nucleación y por ende se obtuvo mayor tamaño de poro. Este estudio complementa lo abordado por Granados estableciendo ciertas condiciones las cuales pueden ayudar a futuras investigaciones con otras CuBTC.

El igual que la CuBTC, la CuAc es una red en la cual su clúster metálico es el cobre pero con un ligando nada común dentro del mundo de las redes organometálicas; por lo general para estos materiales se emplean polímeros sintéticos como ligandos pero Abril & Diaz cambiaron esto al utilizar ácido cítrico, proveniente de las frutas, como ligando con el fin de obtener una MOF para la adsorción de plomo ¹⁷ donde no hubo diferencia en la cristalinidad pero si en el tamaño de cristal ya que el acetato de sodio aumentó la velocidad de nucleación y por ende se obtuvo mayor tamaño de poro. Esta CuAc exhibió un tamaño de grano de 4 micras donde la capacidad de adsorción fue demasiado baja por lo que no se abordó mucho en el tema y no recomendaron este material para la adsorción de metales pesados. Este

¹⁵ GRANADOS G., "Síntesis y evaluación de adsorbentes organometálicos-MOFs para la captura y almacenamiento de CO_2 ," 2015

¹⁶ LÓPEZ K. and MENDOZA J., "Efecto de la relación molar y la adición de acetato de sodio durante la síntesis de MOF CuBTC sobre la capacidad de adsorción de dióxido de carbono," 2015

¹⁷ ABRIL L. and DIAZ D., "Estudio del efecto de los parámetros de síntesis de la estructura metalorgánica $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{-Cu}(\text{NO}_3)_2$ sobre las propiedades del material y su evaluación en la capacidad de adsorción de plomo," 2016

estudio también complementa lo abordado por Granados, contribuyendo a futuras investigaciones con otras CuBTC.

Aunque la investigación de Abril & Diaz no tuvo resultados prometedores, otras redes como la FeBTC también se han estudiado para la adsorción de metales pesados y más específicamente para la adsorción de níquel en agua; dicha FeBTC fue de interés para Silva & Suarez quienes sintetizaron la red en cuestión y la compararon con una sintetizada agregando acetato de sodio como modulador¹⁸ y con una FeBTC modificada con ácido glutámico disuelto en N, N-dimetilformamida (DMF) y en agua. En este estudio se concluyó que el pH influye en la capacidad de adsorción de níquel, ya que con un pH de 5 se alcanza un máximo de remoción del 39% que, aunque es mucho mayor al de la CuAc no es un porcentaje elevado como para tomarse las MOF como adsorbentes de metales pesados.

Ahora bien, las redes organometálicas tipo ZrBTC, también conocidas como MOF-808, se obtienen a partir de un precursor de zirconio y el ligando orgánico BTC. Estas redes han sido de interés para el grupo de investigación con fines catalíticos y estructurales, donde cada uno ha buscado complementar la información del otro, así como en las CuBTC. Por el lado estructural Ardila en el 2018 estudió el efecto de la concentración del modulador (ácido acético) en el tamaño de poro de la ZrBTC¹⁹ y un año después volvió a estudiar la ZrBTC para analizar la influencia del precursor metálico ($ZrCl_4$, $ZrOCl_2/H_2O$ y $ZrO(NO_3)_2/H_2O$) a las propiedades fisicoquímicas²⁰; estos dos estudios realizados por Ardila se realizaron por método

¹⁸ SILVA V. and SUÁREZ M., “Estudio del efecto de parámetros de síntesis, coordinación modulada y funcionalización de la MOF FeBTC en la eficiencia de remoción de Ni de una solución acuosa,” Universidad Industrial de Santander, 2016

¹⁹ ARDILA-SUÁREZ, C. DÍAZ-LASPRILLA A. M., DÍAZ-VACA L. A., BALBUENA P. B., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., “Synthesis, characterization, and post-synthetic modification of a micro/mesoporous zirconium-tricarboxylate metal-organic framework: Towards the addition of acid active sites,” *CrystEngComm*, vol. 21, no. 19, pp. 3014–3030, 2019, doi: 10.1039/c9ce00218a

²⁰ ARDILA-SUÁREZ C., RODRÍGUEZ-PEREIRA J., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., “An analysis of the effect of zirconium precursors of MOF-808 on its thermal

solvotérmico con igual tiempo de reacción (24h) y temperatura superior a 100°C, donde en el primero se encontró que a mayor concentración de ácido acético mayor es la cristalinidad mientras que en el segundo se encontró mayor área superficial con el $ZrCl_4$ ($1319 \text{ m}^2/\text{g}$) ya que este está sin hidratar, el precursor de la ZrBTC al contener agua acelera la cinética de cristalización conllevando a deformaciones que disminuyen el área superficial, que a su vez reduce su rendimiento como catalizador por lo que una síntesis con alta concentración de modulador y en ausencia de agua puede generar una red a base de zirconio con muy buena cristalinidad y alta área superficial. En otra investigación realizada a esta red con fines estructurales, se estudió la cristalinidad de la ZrBTC al agregarse en el proceso de síntesis, diferentes moduladores y surfactantes²¹, donde para la síntesis solvotérmica se adicionaron ácido fórmico, ácido acético y ácido propiónico como moduladores a un reactor de vidrio junto con los precursores $ZrOCl_2/8H_2O$ y H_3BTC y en otro reactor se adicionaron los precursores y bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) como surfactante, obteniendo de cada experimento materiales porosos en los cuales se encontró que el ácido acético genera un mayor tamaño de poro comparado con el ácido fórmico o propiónico y el área superficial del material disminuye con el aumento de la longitud de la cadena de carbono de los moduladores. Por otro lado, en la ZrBTC sintetizada con surfactantes se encontró una mayor cristalinidad por lo que se generó mayor área superficial, pero la adición de estas sustancias, en ningún caso, afectó la composición química de la superficie de la red organometálica.

En cuanto a los estudios a la ZrBTC con fines catalíticos indagaron en las propiedades texturales del material para una posible aplicación en catálisis, pero con síntesis diferentes: por un lado, usando un modulador y luego haciendo un baño

stability, and structural and surface properties,” CrystEngComm, vol. 21, no. 9, pp. 1407–1415, 2019, doi: 10.1039/c8ce01722k

²¹ ARDILA-SUÁREZ C., Molina V.D. R., ALEM H., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., “Synthesis of ordered microporous/macroporous MOF-808 through modulator-induced defect-formation, and surfactant self-assembly strategies,” Physical Chemistry Chemical Physics, vol. 22, no. 22, pp. 12591–12604, 2020, doi: 10.1039/d0cp00287a

con H_2SO_4 para generar puntos ácidos y el por el otro usando surfactantes. Diaz & Díaz²² realizaron la síntesis solvotérmico de la red organometálica tipo ZrBTC usando ácido acético, ácido trifluoroacético y ácido clorhídrico como moduladores, donde el ácido acético se estableció como mejor modulador debido a que presentaba la mayor área superficial ($998 \text{ m}^2/\text{g}$) y luego se bañó con ácido sulfúrico el cual degradó el material generando los puntos ácidos necesarios para convertir la MOF en un catalizador. Rosas²³ utilizó bromuro de hexadecilmetilamonio, dodecilsulfato y ácido plurónico como surfactantes para la síntesis sonoquímica de la ZrBTC, donde se evidenció una disminución de la cristalinidad de la red con respecto a la literatura ya que el surfactante cambió las propiedades texturales del material y la morfología de los cristales además de generar los puntos ácidos deseados a la par que se generaba la red y como complemento de estos estudios, Ardila indagó la acidez generada en la ZrBTC, debido a los baños ácidos ya mencionados, por medio de simulaciones²⁴, donde se encontró el comportamiento de las interacciones químicas ocurridas en la activación de un catalizador, dejando la ZrBTC como un material con alto potencial para el campo de la catálisis.

Una vez abordadas las ZrBTC se pueden mencionar las redes tipo ZrBDC las cuales se obtienen a partir de un precursor de zirconio al igual que la ZrBTC, pero con un ligando ácido tereftálico (BDC) ó el ácido 4,4'-bifenildicarboxílico (BPDC). La ZrBDC, también conocida como UiO-67 fue estudiada y comparada con la MIL-125 (Ti) por Bravo para una funcionalización con complejos molibdeno VI para posibles

²² DÍAZ A. and DÍAZ L., "Síntesis, modificación y caracterización de MOFs de zirconio para la obtención de sólidos ácidos," 2017

²³ ROSAS D., "Redes órgano-metálicas de zirconio con tamaño de poro ajustable obtenidas a partir de la síntesis asistida por emulsificantes para el desarrollo de catalizadores ácidos heterogéneos," 2019

²⁴ ARDILA-SUÁREZ C., PEREZ-BELTRAN S., RAMÍREZ-CABALLERO G. E., and BALBUENA P. B., "Enhanced acidity of defective MOF-808: Effects of the activation process and missing linker defects," *Catalysis Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 847–857, 2018, doi: 10.1039/c7cy02462b.

aplicaciones en fotocatalisis²⁵; en primer lugar, se sintetizó la MIL-125 (Ti) usando BPDC la cual exhibió un área superficial poco favorable con respecto a la MIL original con BDC por lo que se descartó para la funcionalización pero luego se sintetizó por el método One-Pot la ZrBDC a la que se le cambio su clúster de Zr a Ti para obtener una red de titanio y poder analizarse con las MIL. Esta Zr/Ti-BDC presentó un área superficial superior a los 2000 m²/g por lo que superó con facilidad a la MIL y se funcionalizó con KMnO₄ obteniendo un material para posibles usos catalíticos, así como la red de Rosas y de Diaz & Díaz.

En comparación con los estudios anteriores, otros grupos de investigación con temáticas similares al GIP como, compuestos organometálicos y catálisis de la Universidad del Quindío²⁶; y química inorgánica, catálisis y bionorgánica de la universidad de los Andes²⁷, han estudiado la síntesis, caracterización y aplicación de estos novedosos materiales, con algunas variantes de acuerdo con sus objetivos. Otros grupos como GRIEQUI de la Universidad Nacional²⁸ y GIFUJ de la Universidad Javeriana²⁹ han estudiado las MOFs en membranas híbridas poliméricas para generar energía y remediación de aguas contaminadas, respectivamente, pero se encuentran inmersas en otras líneas investigativas que no se concentran en estas redes. Por lo que, dentro de todos los grupos asociados con polímeros, el GIP se caracteriza por ser el único que tiene las redes organometálicas

²⁵ BRAVO C., "Síntesis y caracterización de redes organo-metalicas de titanio funcionalizadas con un complejo de dioxo-molibdeno (VI)," 2019

²⁶ CUENU CABEZAS Fernando Grupo de investigación en compuestos organometálicos y catálisis [en línea] disponible en: <https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000006025>

²⁷ HURTADO BELALCAZAR John Jady Grupo de investigación en química inorgánica catálisis y bionorgánica [en línea] disponible en: <https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000014086>

²⁸ SÁNCHEZ SÁENZ Carlos Ignacio Grupo de Ingeniería Electroquímica – GRIEQUI [en línea] disponible en: <https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=0000000000954>

²⁹ PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA Líneas de Investigación [en línea] disponible en: <https://ciencias.javeriana.edu.co/departamentos-instituto/quimica/investigacion>

como línea investigativa independiente, siendo destacable para las necesidades académicas o para el sector productivo.

3.1.2 Redes organometálicas para separación y almacenamiento. La búsqueda de nuevas alternativas de separación o almacenamiento han sido un esfuerzo constante para obtener materiales los cuales presenten una ventaja sobre los métodos convencionales (zeolitas, nanotubos de carbono, etc.) con el fin de lograr mayor pureza en el producto de interés o reducir el balance económico. Las redes organometálicas como una alternativa diferente se ven involucradas en separaciones de metales pesados y medicamentos en agua, separación de CO₂ y almacenamiento de medicamentos (analgésicos, anticancerígenos, etc) para una posterior liberación.

Metales como el Cadmio y Zinc son contaminantes del agua por lo que su remoción es de importancia y para ello en un estudio se empleó una membrana híbrida polímero-MOF³⁰, donde la base polimérica fue poliacrilonitrilo debido a su capacidad hidrofílica, lo cual facilita la difusión de los metales y la red organometálica fue una ZrBTC la cual se sintetizó con los mismos precursores utilizados por Ardila del GIP para su estudio sobre la concentración del modulador. La síntesis del polímero base y la unión polímero-MOF se realizó por electrosputting, donde la membrana presentó un 20%wt de ZrBTC y capacidades máximas de adsorción de 225.05 mg/g para el Cd y de 287.064 mg/g para el Zn equivalente a una remoción cercana al 99%.

Suhaimi et al sintetizaron exitosamente una membrana híbrida para la separación CO₂/CH₄ utilizando 6FDA como soporte polimérico³¹, la separación de estos gases

³⁰ EFOME J. E., RANA D., MATSUURA T., and LAN C. Q., "Insight Studies on Metal-Organic Framework Nanofibrous Membrane Adsorption and Activation for Heavy Metal Ions Removal from Aqueous Solution," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 10, no. 22, pp. 18619–18629, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b01454

³¹ SUHAIMI N. H., YEONG Y. F., JUSOH N., CHEW T. L., BUSTAM M. A., and SULEMAN S., "Separation of CO₂ from CH₄ using mixed matrix membranes incorporated with amine functionalized

es común en procesos de combustión y fue en cierta medida de estudio para Granados del GIP. Para estudiar la separación CO_2/CH_4 se varió la cantidad de MOF agregada a la película polimérica tomando valores de 1%,3%,5%,7% y 9 wt%, donde la permeabilidad de la membrana aumentó a medida que aumentaba la cantidad de MIL-125 hasta 7wt%, pero hubo una reducción con un 9 wt% y la selectividad llegó a un máximo de 37.11 con un 7 wt%, lo que significa que la incorporación de la MIL-125 favorece la interacción del CO_2/CH_4 con la membrana, por lo que tiene potencial uso para la separación de otros gases.

En cuanto al campo de la medicina, las redes organometálicas han sido de gran interés con dos fines específicos: en primer lugar, la liberación controlada de medicamentos ya que con la liberación directa de un fármaco en la zona de interés se consigue un mayor y más prolongado efecto terapéutico y en segundo lugar, la adsorción de medicamentos los cuales son contaminantes del agua; esta última llama la atención debido a ciertos compuestos farmacéuticos que pueden ser contaminantes para sistemas acuáticos o incluso si llegan al consumo humano pueden causar enfermedades.

En cuanto a la liberación de medicamentos siempre hay un objetivo de estudio el cual es clave para esta aplicación: conocer cuánto medicamento se carga a la red organometálica y cuánto medicamento cargado es libera en un medio fisiológico, este es el punto de inflexión para analizar uno u otro estudio con respecto a este tema. Ke et al estudiaron la liberación de diclofenaco por medio de una MIL-125 (Ti) haciendo hincapié en la influencia del pH a la hora de la descarga³², el estudio se realizó en una solución buffer (37°C), ya que es la más idónea para simular condiciones humanas, donde se varió el pH entre ácido y neutro encontrando que para pHs ácidos se libera cerca del 80% de diclofenaco cargado por lo que este tipo

MIL-125 (Ti) nanofiller,” Chemical Engineering Research and Design, vol. 159, pp. 236–247, 2020, doi: 10.1016/j.cherd.2020.04.020

³² JIANG K. et al., “A Biocompatible Ti-based metal-organic framework for pH responsive drug delivery,” Materials Letters, vol. 225, pp. 142–144, 2018, doi: 10.1016/j.matlet.2018.05.006

de material es bueno para el uso con analgésicos pero se puede mejorar si además de generarse la liberación en la zona de interés se genera una biocompatibilidad de la MOF con las células humanas por lo que Xie et al adicionaron tetraetil ortosilicato (TEOS) a la MIL-125 (Ti)³³, este polímero se adicionó en diferentes relaciones con respecto al precursor metálico (R) donde la morfología de la TEOS@MIL-125 (Ti) cambio a medida que aumentaba R algo inusual, ya que Ke reportó para su estudio un material con geometría cuadrada, además, se aumentó la liberación de analgésicos hasta un 95% donde hubo similitudes en las condiciones de las soluciones buffer usadas por Ke y por Xie.

Para la síntesis de estas redes se utilizó el método solvotérmico y sales metálicas como el isopropóxido de titanio y el butóxido de titanio que se emplearon por Bravo en su estudio hecho en el GIP, por lo que la síntesis de este material para la carga y liberación de analgésicos no representa complicaciones para el grupo de investigación, además la biocompatibilidad estudiada por Xie incluye un polímero que en el grupo de investigación se puede obtener, por lo que hay posibilidades de estudio en este campo para analgésicos pero que no es el único medicamento estudiado, ya que medicamentos para tratamiento contra el cáncer también han sido cargados y liberados en redes tipo MIL-125 (Ti) con el fin de reducir efectos secundarios en los tratamientos de quimioterapia. Song sintetizó la MIL-125 (Ti) por medio solvotérmico asistido por surfactantes para estudiar la carga y liberación de doxorubicina (DOX)³⁴ y luego la modificó con ácido hialurónico para generar biocompatibilidad, similar a lo hecho por Xie pero para células cancerígenas. La MOF sintetizada exhibió un área superficial de $1134 \text{ m}^2/\text{g}$, similar a la ZrBTC de Ardila sintetizada en el GIP; la red de Song tuvo una capacidad de adsorción de

³³ XIE Y., LIU X., MA X., DUAN Y., YAO Y., and CAI Q., "Small Titanium-Based MOFs Prepared with the Introduction of Tetraethyl Orthosilicate and Their Potential for Use in Drug Delivery," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 10, no. 16, pp. 13325–13332, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b01175

³⁴ SONG J. L. et al., "A facile synthesis of uniform hollow MIL-125 titanium-based nanoplatfor for endosomal escape and intracellular drug delivery," Chemical Engineering Journal, vol. 396, no. April, p. 125246, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.125246

DOX de 25%-35% y se liberó en 2 ambientes fisiológicos: el primero con condiciones de células tumorales (37°C, pH 5) y el segundo con condiciones normales (37°C, pH 7.3) donde se encontró que después de 72h a pH 7.3 se había liberado el 40% cargado mientras que para pH 5 fue más del doble la cantidad liberada.

El 5-fluorouracilo es al igual que la DOX un fármaco usado en tratamientos anticancerígenos pero que se cargado en una ZrBTC, a la que se le agregó ácido fólico para generar biocompatibilidad al igual que los estudios previos³⁵, esta red de zirconio, estudiada por Dong, a diferencia de las anteriores presentadas se sintetizó por el método One-Pot, usando los mismo reactivos que Ardila para su ZrBTC, pero presentando un área superficial menor ($990 \text{ m}^2/\text{g}$) debido al ácido fólico el cual llenó los poros de la MOF. La red organometálica se cargó con 5-fluorouracilo obteniendo un 38.42 wt% que fue liberado en dos soluciones tampón fosfatasa variando el pH al igual que lo hizo Song, donde como se observa en la figura 5, hay una liberación superior al 70% para pH ligeramente ácido por lo que la liberación se favorece entre mayor sea la acidez del medio como lo concluyeron Ke et al previamente.

El uso de redes organometálicas para carga y liberación de analgésicos y anticancerígenos es lo más común ya que alcanzan un mayor impacto, pero existen tratamientos los cuales se benefician mucho al utilizar este tipo de material. Tratamientos contra el glaucoma, por ejemplo, han tenido poco estudio debido a la poca afinidad de las MOFs con los medicamentos usados por lo que Gandara-Loe y colaboradores obtuvieron una ZrBDC para la carga y descarga de brimonidina, usado para tratamientos preventivos de glaucoma, donde se comparó la capacidad

³⁵ DONG H. et al., "Folic Acid Functionalized Zirconium-Based Metal–Organic Frameworks as Drug Carriers for Active Tumor-Targeted Drug Delivery," *Chemistry - A European Journal*, vol. 24, no. 64, pp. 17148–17154, 2018, doi: 10.1002/chem.201804153

de adsorción-desorción de esta red, con una CuBTC, UiO-66 y una MIL-100 (Fe)³⁶. La ZrBDC utilizada se obtuvo con los mismos precursores utilizados por Bravo en su estudio en el grupo de investigación, pero por métodos de síntesis diferentes ya que Gandara-Loe se inclinó por la síntesis solvotérmica.

La brimonidina se cargó a las cuatro redes donde para la UiO-66 y la CuBTC hay una capacidad muy similar alcanzando hasta 100 mg/g pero para la UiO-67 se logra una carga muy superior de más de 400 mg/g, esto debido a su mayor área y volumen de poro. La liberación de brimonidina se hizo en una solución fosfatasa, donde se estudiaron todas las redes menos la CuBTC ya que esta se degradó después de 24h debido a la interacción de las partículas de cobre con las moléculas de agua en la solución y aunque la UiO-67 fue la que tuvo mayor capacidad de carga fue la que liberó menor cantidad (50% de lo cargado) a los 12 días mientras que la MIL-100 (Fe) demostró una liberación de cerca del 80% de brimonidina cargada.

Para sintetizar toda la información sobre las redes organometálicas usadas como transporte de medicamento se puede observar la Tabla 1 para pasar a abordar la adsorción de medicamentos como un método de descontaminación.

Tabla 1. Capacidades de adsorción de diferentes MOFs con diferentes medicamentos.

Medicamento	Red Organometálica	Capacidad de liberación de medicamento	Referencia
Diclofenaco	MIL-125	80%	37
Diclofenaco	TEOS@MIL-125	95%	38

³⁶ GANDARA-LOE J. et al., "Metal-Organic Frameworks as Drug Delivery Platforms for Ocular Therapeutics," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 11, no. 2, pp. 1924–1931, 2019, doi: 10.1021/acsami.8b20222

³⁷ JIANG K. et al., Op. Cit.

³⁸ XIE Y., LIU X., MA X., DUAN Y., YAO Y., and CAI Q., Op. Cit.

Medicamento	Red Organometálica	Capacidad de liberación de medicamento	Referencia
Doxorrubicina	MIL-125	40%	39
5-fluorouracilo	ZrBTC	70%	40
Brimonidina	ZrBDC	50%	41

Para la adsorción de medicamentos en agua como una solución para la contaminación farmacéutica el objetivo principal de los estudios se ha centrado es encontrar la mayor área superficial para mayor capacidad de adsorción.

Para este fin sobresalen las redes de zirconio y titanio donde, por un lado, la ZrBTC fue estudiada para la adsorción de antiinflamatorios ⁴² de uso cotidiano empleado el mismo método de síntesis que Díaz & Díaz del GIP, pero con un área superficial mucho mayor ($1314 \text{ m}^2/\text{g}$) lo que conllevó a encontrar capacidades de adsorción muy altas (1.4mmol/g para ibuprofeno, 1.6 mmol/g para ketoprofeno y 1.3 mmol/g para ketoprofeno).

Ahora, la ZrBDC se utilizó para la adsorción de tetraciclina de una muestra acuosa donde la red organometálica tuvo la adición de puntos de carbono dopados con N y S ya que estos puntos actúan como un sensor e imán de tetraciclina⁴³, la red estudiada se sintetizó con los mismos precursores que la ZrBDC de Bravo y por el mismo método One-Pot donde se presentó una capacidad de adsorción de aproximadamente 427 mg/g similar a la capacidad de adsorción encontrada por Gandara-Loe para la ZrBDC.

³⁹ SONG J. L. et al., Op. Cit.

⁴⁰ SONG J. L. et al., Op. Cit.

⁴¹ GANDARA-LOE J. et al., Op. Cit.

⁴² LIN S., ZHAO Y., and YUN Y. S., "Highly Effective Removal of Nonsteroidal Anti-inflammatory Pharmaceuticals from Water by Zr(IV)-Based Metal-Organic Framework: Adsorption Performance and Mechanisms," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 10, no. 33, pp. 28076–28085, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b08596

⁴³ YANG Q., HONG H., and LUO Y., "Heterogeneous nucleation and synthesis of carbon dots hybrid Zr-based MOFs for simultaneous recognition and effective removal of tetracycline," Chemical Engineering Journal, vol. 392, no. November, p. 123680, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.123680

Por el lado de las redes de titanio, algunos colorantes como la rodamina B, son considerados dentro del campo de la medicina como medicamentos que en agua se convierten en contaminantes los cuales afectan la salud de las personas. La separación de este colorante fue estudiada por Zhou por medio de una membrana híbrida tipo PVDF@MIL-125 (Ti) ⁴⁴. La MIL-125 (Ti) utilizada para esta membrana se obtuvo empleando el mismo precursor metálico de Bravo del grupo de investigación y el mismo método de síntesis, pero la unión polímero-MOF se realizó por el método de inmersión de fase común en grupos de investigación sobre materiales o recubrimientos. A esta membrana se le varió la cantidad de MOF adicionada a 0.25%, 5%, 10% y 20%, obteniendo un aumento considerablemente con la incorporación de la red organometálica además de un aumento de la permeabilidad con el aumento de la cantidad de la MIL-125.

3.1.3 Redes organometálicas para catálisis. Las MOFs han sido atractivas como catalizadores heterogéneos por su porosidad que facilita la difusión de las moléculas reactantes, actividad catalítica, versatilidad de diseño (modificaciones post-sintéticas), recuperación y reciclaje tanto en la industria química orgánica como en otras⁴⁵. Pangestu et al, sintetizaron una CuBTC para la reacción de transesterificación de triglicéridos presentes en el aceite de palma con metanol para la producción de biodiesel, con un contenido del 91% de ácidos grasos (AG) la primera vez y 86% AG reutilizado, siendo mayoritarios el 42,8% de ácido palmítico y 38,25% de ácido oleico. La caracterización evidencia un material cristalino, con forma de varilla influenciado por temperatura de reacción, área superficial BET de $1085,72 \text{ m}^2/\text{g}$, volumen total de poros de $1.68 \text{ m}^3/\text{g}$ y temperatura de degradación

⁴⁴ ZHOU S., GAO J., ZHU J., PENG D., ZHANG Y., and ZHANG Y., "Self-cleaning, antibacterial mixed matrix membranes enabled by photocatalyst Ti-MOFs for efficient dye removal," *Journal of Membrane Science*, vol. 610, p. 118219, 2020, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118219

⁴⁵ WANG Q. and ASTRUC D., "State of the Art and Prospects in Metal-Organic Framework (MOF)-Based and MOF-Derived Nanocatalysis," *Chemical Reviews*, vol. 120, no. 2, pp. 1438–1511, 2020, doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00223

de 303 °C⁴⁶. Con estudios preliminares, encontraron que la cantidad óptima de catalizador era 0.04 g pues al ser mayor, las interacciones de los reactivos disminuyen al haber más sitios activos y así la región resulta más dispersa obteniendo menos cantidad de AG. El efecto del tiempo tiene relación directa entre 1-4 horas, pero después de este rango se comporta casi constante, escogiendo 4 horas debido a que entre mayor sea el tiempo la conversión aumenta pues la difusión y producción de moléculas se hace lenta.

Con una red similar a la de Granados, Larrea et al sintetizaron una CuBTC, combinando su alta área superficial ($1838 \text{ m}^2/\text{g}$) y funcionalización con diferentes líquidos iónicos (IL) con imidazol como anión de base, para adsorber CO₂ y aumentar la actividad catalítica en reacción con un epóxido (epiclorhidrina (ECHO)) para transformarlo en carbonatos cíclicos (ECHC)^{47 48}. Gracias a este, promueve la disminución de la presión de CO₂ y temperatura para activar el proceso; entre los ensayos, la denominada por el autor Cu₃(BTC)₂@1.2 [BMIM][Cl] presentó un rendimiento del 85% y su área superficial disminuyó a $1027 \text{ m}^2/\text{g}$ debido a la evidente ocupación de los IL en los poros.

Analizando otro oxo-clúster de estas redes catalíticas como Silva & Suarez, las investigaciones de Devarajan & Suresh reutilizaron cinco veces una FeBTC en la síntesis de 2,4-diarilquinonas con benzaldehído, anilina y fenilacetileno como sustratos⁴⁹, cuya reacción tuvo variación en tiempo (6-24 h), temperatura (90-

⁴⁶ PANGESTU T. et al., "The synthesis of biodiesel using copper-based metal-organic framework as a catalyst," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 4, p. 103277, 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103277

⁴⁷ LARREA E. S., FERNÁNDEZ DE LUIS R., FIDALGO-MARIJUAN A., MAYA E. M., IGLESIAS M., and ARRIORTUA M. I., "Study of the versatility of CuBTC@IL-derived materials for heterogeneous catalysis," *CrystEngComm*, vol. 22, no. 17, pp. 2904–2913, 2020, doi: 10.1039/c9ce01157a

⁴⁸ MARTÍNEZ D., "Síntesis de nanopartículas de oro soportadas en óxido de silicio funcionalizado y su actividad catalítica en reacciones de epoxidación, cicloadición y carboxilación oxidativa," 2014

⁴⁹ DEVARAJAN N. and SURESH P., "Iron-MOF-Catalyzed Domino Cyclization and Aromatization Strategy for the Synthesis of 2,4-Diarylquinolines," *Asian Journal of Organic Chemistry*, vol. 9, no. 3, pp. 437–444, 2020, doi: 10.1002/ajoc.201900708

110°C) y disolventes polares y no polares, como tolueno, m-xileno, 1,2-dicloroetano, cloroformo, THF, 1,4-dioxano, acetonitrilo, metanol, etanol, DMF, DMSO y agua, en presencia de aire atmosférico. Obteniendo el tolueno fresco destilado como el más adecuado con un rendimiento del 98% en la síntesis catalizada por la red. Además, el tiempo y temperatura óptima fue de 18 h y a 110 °C, puesto que en valores superiores el rendimiento se mantenía constante. Partiendo del mismo tipo de MOF, Salazar et al la aplicaron como catalizador en la generación de dihidroxibencenos (DHBZ) teniendo fenol y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) como sustratos sin disolventes⁵⁰. El estudio SEM muestra una red con forma esférica y tamaño aproximado entre 50 y 100 nm. La reacción fue estudiada con cambios en condiciones de temperatura(20-50°C), relación molar Fenol/H₂O₂ (1:1.8, 1:0.5), cantidad de FeBTC (0.01-0.05 g) y tiempo (10-180 min) en un reactor de lecho fijo con flujo intermitente con resultados favorables en la hidroxilación de 25°C, relación molar 1:1, 0.01 g de FeBTC, 180 min, y selectividad del 65% con respecto al DHBZ.

Estos estudios de catálisis heterogénea demuestran la aplicabilidad de las redes organometálicas en este campo, pero una de las ramas de la catálisis que también se puede abordar con redes organometálicas es la fotocatalisis. Las redes organometálicas como fotocatalizadores pueden presentar fotoactividad, generalmente porque absorben luz en la región UV-vis (Ultravioleta-Visible) que aumenta su actividad catalítica, selectividad y estabilidad térmica⁵¹, por lo que pueden ser usados para degradar y oxidar compuestos en cuestión. Bravo en su trabajo incorpora complejos de Molibdeno (VI) en una UiO-67 con oxo-clúster de Zr/Ti para usos fotocatalíticos, Gao et al también estudiaron la misma, pero mantuvieron el zirconio y el ligando orgánico H₂BPDC, que a su vez introdujeron

⁵⁰ SALAZAR-AGUILAR A. D. et al., "Direct hydroxylation of phenol to dihydroxybenzenes by H₂O₂ and fe-based metal-organic framework catalyst at room temperature," *Catalysts*, vol. 10, no. 2, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/catal10020172

⁵¹ SALIMI M. et al., "Photocatalytic degradation of cefixime with MIL-125(Ti)-mixed linker decorated by g-C₃N₄ under solar driven light irradiation," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 582, no. August, p. 123874, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.123874.

iones de Cobalto y Renio para mejorar la reducción de CO₂ a CO ⁵², con mejor rendimiento y estabilidad en aquella funcionalizada con Co debido a que su barrera energética (0,86 eV) es menor, reflejándose en la capacidad de adsorción. Hu et al ⁵³ también adsorbieron CO₂ para convertirlo en CH₄ en medio acuoso e irradiando luz visible, con el objetivo de generar energía limpia, fabricando un fotocatalizador NH₂-MIL-125 (Ti), el cual se modificó agregando in-situ el compuesto amorfo TiO₂ (Am-TiO₂), formando así una alianza para mejorar la conversión. Estudiaron el comportamiento catalítico de dos ensayos con 14,9% y 22,6% en peso de Am-TiO₂ en la red y los compararon con NH₂-MIL-125 y Am-TiO₂ en solitario. Entre los que se destacó una producción mayor con 22,6% (Denominada 0.25 ATN) de Am-TiO₂ que fue 1,7 que la red sin carga de este. El reciclaje de 0.25 ATN fue cinco veces, por medio de análisis XRD, FTIR y TGA evidenciaron que esta no presentaba cambios considerables en su reactividad y estructura concluyendo que es estable para una prueba a 0,6 MPa y 60 ° C bajo irradiación de luz visible durante 10 h. Utilizando la misma red de Hu et al, Huang et al ⁵⁴ analizaron la captación de nitrógeno a condiciones de temperatura y presión ambiente con luz visible para convertirse en amoníaco, mostrando una alternativa menos drástica para el ambiente (emisiones de CO₂), la cual se destacaba entre funcionalizaciones con grupos CH₃ y OH.

⁵² GAO X., GUO B., GUO C., MENG Q., LIANG J., and LIU J., "Zirconium-Based Metal-Organic Framework for Efficient Photocatalytic Reduction of CO₂ to CO: The Influence of Doped Metal Ions," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 12, no. 21, pp. 24059–24065, 2020, doi: 10.1021/acscami.0c05631

⁵³ HU J., DING J., and ZHONG Q., "In situ fabrication of amorphous TiO₂/NH₂-MIL-125(Ti) for enhanced photocatalytic CO₂ into CH₄ with H₂O under visible-light irradiation," Journal of Colloid and Interface Science, vol. 560, pp. 857–865, 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2019.11.003

⁵⁴ HUANG H. et al., "Toward visible-light-assisted photocatalytic nitrogen fixation: A titanium metal organic framework with functionalized ligands," Applied Catalysis B: Environmental, vol. 267, no. October 2019, p. 118686, 2020, doi: 10.1016/j.apcatb.2020.118686

Otra modificación que es amigable con el medio ambiente en la eliminación de compuestos tóxicos es la presentada por Gao et al ⁵⁵ en una MIL-125 (Ti) mejorando su respuesta cuando se expone a la luz solar, pues, aunque esta se desempeñaba en luz ultravioleta requerían estudiarla en región visible por medio de la incrustación de nanobandas huecas (nanotubos) de óxido de hierro (Fe_2O_3) las cuales disminuirían la banda prohibida para la oxidación fotocatalítica de As (III). Primero sintetizaron dos redes en forma de torta solvotermicamente, la MIL-125 obtuvo 0.7 nm y la HPMIL-125(Ti) (poros jerárquicos) 10 nm de diámetro, luego al añadir la solución de hierro la primera se destruyó pues probablemente sus microporos se bloqueaban con las partículas, por lo que la segunda fue más apropiada. Evaluaron el rendimiento de HPMIL-125 (Ti), con y sin Fe_2O_3 con área específica de 857,2 y 1479,7 m^2/g respectivamente, siendo la primera red superior en adsorción del As (III) con 28,7% de aumento y un rendimiento del 52,3 % en conversión a As (V) (en comparación a 19,7%), además de la capacidad de adsorción del As(V) en medio acuoso. Lo que resulta un material capaz de eliminar alrededor de 4,9 veces más As (III), si no estuviese modificado. Resaltando que estos tratamientos postsíntesis son muy atractivos para muchas aplicaciones, así como sugiere Bravo. Salimi et al ⁵⁶ análogo a la anterior investigación, estudiaron la fotodegradación con luz solar del fármaco cefixima en medio acuoso a través de una MIL-125 (Ti) decorándola con nitruro de carbono grafítico ($\text{g-C}_3\text{N}_4$). Variando la concentración del $\text{g-C}_3\text{N}_4$ en la red (5,10,20 y 30 % en peso), cantidad de catalizador (10,20,30 y 40 mg/L), pH (4,7 y 10) y evaluando ambos catalizadores a parte (MIL-125 y GC_3N_4), en primer lugar evidenciaron que el mejor material era con 20% peso de $\text{g-C}_3\text{N}_4$ pues degradaba en un 73,83% el contaminante, además el aumento del pH y la concentración inicial de la cefixima disminuía la actividad catalítica, pero por el contrario esta aumentaba cuando era mayor la dosis de

⁵⁵ GAO K., LI Y., and NA P., "Insight into Design of MIL-125(Ti)-Based Composite with Boosting Photocatalytic Activity: The Embedded Multiple Fe Oxide Count," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 7, no. 2, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1002/admi.201901449

⁵⁶ SALIMI M. et al., Op. Cit.

catalizador entre valores de 10 y 30 mg/L, por tanto los valores óptimos fueron 4 (pH) y 15 mg/L de cefixima y 30 mg/L de fotocatalizador.

3.1.4 Redes organometálicas para aplicaciones energéticas. Las redes organometálicas como se ha visto hasta el momento son excelentes para la adsorción de compuestos e incluso para usos como catalizador, pero un campo de aplicación muy poco explorado es el uso de este material para almacenamiento de energía. Ya sea como un capacitor, como un contenedor de hidrógeno o una batería ⁵⁷ estas redes poseen propiedades las cuales pueden posicionar esta línea para futuras investigaciones.

El hidrógeno es usado para usos energéticos desde celdas de combustible, para generar electricidad, hasta la fabricación de LEDs^{58 59} por lo que su separación y/o almacenamiento ha sido un reto donde el punto de interés se centra en el área superficial del material, es decir, la cantidad de gas que se puede almacenar. Con respecto a esto Lestari sintetizó una ZrBTC, por método solvotérmico (150°C, 24h), para el almacenamiento de H₂ ⁶⁰, a esta red organometálica además, se le agregaron nanopartículas de Pd debido a la altísima afinidad que posee el paladio con el H₂, obteniendo un material el cual exhibió un comportamiento peculiar con respecto a la cantidad de Pd, ya entre 1%-5% wt a mayor cantidad de Pd menor es el área superficial, pero con 10% wt el área aumenta y teniendo en cuenta esto la ZrBTC con 10% wt obtuvo una adsorción de H₂ 45 veces mayor que en un ZrBTC

⁵⁷ XU G., NIE P., DOU H., DING B., LI L., and ZHANG X., "Exploring metal organic frameworks for energy storage in batteries and supercapacitors," *Materials Today*, vol. 20, no. 4, pp. 191–209, 2017, doi: 10.1016/j.mattod.2016.10.003

⁵⁸ PFEFFERLE W. C., "Ultra-pure hydrogen for fuel cells." doi: 10.4271/640378

⁵⁹ RIBEIRO A. M., GRANDE C. A., LOPES F. V. S., LOUREIRO J. M., and RODRIGUES A. E., "A parametric study of layered bed PSA for hydrogen purification," *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 21, pp. 5258–5273, 2008, doi: 10.1016/j.ces.2008.07.017

⁶⁰ LESTARI W., SUWARNO H., and ARROZI U., "Spillover effect on Pd-embedded metal-organic frameworks based on zirconium(IV) and benzene 1,3,5-tricarboxylate as hydrogen storage materials," no. Iv, p. 8, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab1bc7 Manuscript

normal, además de ser mayor que muchas más redes organometálicas usadas para este fin.

En otro estudio, se empleó la CuBTC de Granados del GIP para la separación y almacenamiento de H₂ proveniente de una corriente de gases de combustión (CO₂, N₂, CH₄, H₂)⁶¹, donde esta red presentó un área superficial de 1556 m²/g la cual se sometió a presiones cercanas a los 2000 KPa debido a la alta afinidad de este tipo de red con el CO₂, por lo que si se trabaja a presión ambiente la CuBTC adsorbe el dióxido de carbono. La red organometálica presentó una capacidad de H₂ de 0.9 mol/kg que es similar a la capacidad del N₂ pero muy inferior a la capacidad del CO₂, por lo que una CuBTC para el almacenamiento de hidrógeno generado de una combustión no es favorable.

Como capacitor, Li et al realizaron un proceso similar al de Bravo en su ZrBDC, pero para una ZrBTC, más específicamente a la ZrBTC se le adicionó un complejo de molibdeno para generar un pseudocapacitor⁶², esta red en cuestión fue sintetizada por el mismo método y utilizando el mismo precursor metálico que utilizó Ardila del GIP para su estudio de la variación del tipo de precursor en la ZrBTC. El material obtuvo un área superficial de 2120 m²/g muy superior al de Ardila y cercano a la ZrBDC de Bravo, y posteriormente se recubrió con nanopartículas de Molibdeno (VI), que después por electroquímica se convierten en molibdeno metálico obteniendo un material pseudocapacitivo para usos eléctricos o electrónicos. Para comprobar su capacidad de almacenamiento, la Mo@ZrBTC se sometió a un voltaje y se midió su densidad de corriente además de compararse con la capacidad de

⁶¹ KLOUTSE F. A., HOURRI A., NATARAJAN S., BENARD P., and CHAHINE R., "Hydrogen separation by adsorption: Experiments and modelling of H₂-N₂-CO₂ and H₂-CH₄-CO₂ mixtures adsorption on CuBTC and MOF-5," Microporous and Mesoporous Materials, vol. 271, pp. 175–185, 2018, doi: 10.1016/j.micromeso.2018.05.042

⁶² LI J.-H. et al., "Electrochemical Evolution of Pore-Confined Metallic Molybdenum in a Metal–Organic Framework (MOF) for All-MOF-Based Pseudocapacitors," ACS Applied Energy Materials, vol. 3, no. 7, pp. 6258–6267, 2020, doi: 10.1021/acsaem.0c00399

almacenamiento de una ZrBTC sin modificaciones y como se esperaba la Mo@ZrBTC exhibió una densidad de corriente de $0.2 \text{ mA}/\text{cm}^2$, equivalente a un 20% mayor a la red organometálica sin modificación.

Choi, al igual que Li et al utilizó la ZrBDC, pero para obtener un supercapacitor el cual pudiese almacenar cierta cantidad de energía con un número de ciclos carga-descarga mucho más alto ⁶³, para este supercapacitor se sintetizó la ZrBDC por método solvotérmico y se adicionó a láminas de grafeno para obtener un material con un área superficial cercana a los $1000 \text{ m}^2/\text{g}$, menor a la obtenida por Li y por Bravo pero que se aceptó ya que el objetivo principal del estudio era generar un número mayor de ciclos. Una vez generado el material, se sometió a una corriente eléctrica de voltaje no especificado, obteniendo una capacitancia de $0.093 \text{ F}/\text{cm}^3$ la cual se mantuvo para más de 10000 ciclos carga-descarga y para generar comparación con los satisfactorios resultados de la ZrBDC, también se sintetizaron y analizaron otras redes organometálicas incluidas la CuBTC la cual tuvo $0.296 \text{ F}/\text{cm}^3$ para 6000 ciclos y la ZrBTC con una capacitancia de $0.068 \text{ F}/\text{cm}^3$ para 5000 ciclos.

Al igual que los capacitores, las baterías también son dispositivos diseñados para almacenamiento de energía, pero para usos cotidianos. Estas, por lo general son hechas a partir de iones de litio y por ello el nombre de baterías de litio, pero en algunos casos dichas baterías se modifican agregándole partículas de azufre para generar baterías Li-S, las cuales poseen mayor capacidad de almacenaje de corriente por lo que captan el interés de los investigadores. Las baterías Li-S se han sintetizado utilizando también redes organometálicas en su estructura para potenciar la capacidad de almacenamiento de energía, por ejemplo, Zhou et al

⁶³ CHOI K. M., JEONG H. M., PARK J. H., ZHANG Y. B., KANG J. K., and YAGHI O. M., "Supercapacitors of nanocrystalline metal-organic frameworks," ACS Nano, vol. 8, no. 7, pp. 7451–7457, 2014, doi: 10.1021/nn5027092

sintetizaron una batería de este tipo adicionando un 60%wt de azufre a una CuBTC y sometiéndola a varios ciclos de carga y descarga entre 1.8V y 2.8V donde se obtuvo una máxima capacidad de 526 mAh/g superior a las ZIF-8 (1.05 mAh/g) y a la MIL-53 (1.21 mAh/g) también estudiadas por Zhou. Además, a la CuBTC se le midió su capacidad de almacenamiento de energía para largos ciclos de carga-descarga, donde se sometió a 300 ciclos, siendo su capacidad reducida solo en un 30% por lo que se concluyó como una batería de larga duración con buena capacidad energética.

En otro estudio muy similar realizado a este tipo de baterías, se sintetizó la CuBTC por el mismo método y con los mismos precursores que Granados del GIP, pero a diferencia de Zhou con un 40%wt de azufre ⁶⁴ donde la capacidad de la batería fue de 500 mAh/g después de 170 ciclos, con un voltaje entre los 10V y 30V, lo que indicó que la reducción de la cantidad de azufre reduce la capacidad de almacenamiento, pero en baja magnitud siempre y cuando se aumente el voltaje aumente.

Todos estos estudios previamente presentados y otros se pueden sintetizar en la siguiente tabla donde toman importancia la cantidad de energía almacenada y la capacidad de carga-descarga del dispositivo de almacenamiento.

Tabla 2. Resultados de diferentes contenedores de energía.

Aplicación	Red Organometálica	Densidad de corriente	Ciclos carga-descarga	Referencia
Pseudocapacitor	ZrBTC	68 mA/g		65
Supercapacitor	ZrBDC	5,09 mF/cm ²	10000	66

⁶⁴ WANG Z. et al., "A metal-organic framework with open metal sites for enhanced confinement of sulfur and lithium-sulfur battery of long cycling life," *Crystal Growth and Design*, vol. 13, no. 11, pp. 5116–5120, 2013, doi: 10.1021/cg401304x

⁶⁵ LI J.-H. et al., Op. Cit.

⁶⁶ CHOI K. M., JEONG H. M., PARK J. H., ZHANG Y. B., KANG J. K., and YAGHI O. M., Op. Cit.

Aplicación	Red Organometálica	Densidad de corriente	Ciclos carga-descarga	Referencia
Batería	CuBTC	500 mA/g	170	67
Batería	CuBTC	474 mA/g	50	68
Batería	FeBTC	1021 mA/g	100	69

3.2 USOS DE LAS REDES ORGANOMETÁLICAS EN COLOMBIA

Una vez abordadas las redes estudiadas por el grupo de investigación en polímeros y de otras líneas investigativas que se aplican al grupo, se puede analizar los usos de este material para solucionar problemáticas o mejorar procesos en el sector industrial colombiano. Para ello, se pueden analizar problemáticas las cuales afectan a las personas como lo son calidad del agua, la contaminación del aire, y el medio ambiente como el uso de combustibles alternativos, además de posibles usos en refinería para mejorar los procesos de producción.

En primer lugar, la contaminación del agua es un problema muy conocido del cual se ha estudiado mucho sus causas y formas de remediación, donde se ha encontrado que los principales contaminantes son colorantes, plaguicidas, metales pesados, etc. Para solucionar este problema se han investigado las redes organometálicas desde dos puntos, uno como catalizador para la degradación y otro para la adsorción de dichos compuestos donde se ha encontrado la CuBTC y la ZrBTC para la degradación fotocatalítica de colorantes, medicamentos y lixiviados

⁶⁷ WANG Z. et al., Op. Cit.

⁶⁸ MAITI S., PRAMANIK A., MANJU U., and MAHANTY S., "Cu₃(1,3,5-benzenetricarboxylate)₂ metal-organic framework: A promising anode material for lithium-ion battery," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 226, pp. 353–359, 2016, doi: 10.1016/j.micromeso.2016.02.01

⁶⁹ HU X. et al., "Facile synthesis of the Basolite F300-like nanoscale Fe-BTC framework and its lithium storage properties," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 115, pp. 114483–114490, 2016, doi: 10.1039/C6RA22738D

⁷⁰ ⁷¹. Redes como la CuBTC y MIL-125 se han empleado en membranas híbridas para la separación de colorantes, metales pesados y pesticidas; como Reda y colaboradores ⁷² ⁷³, obtuvieron remociones de insecticidas en medio acuoso de hasta el 97%, con un material absorbente algodón@CuBTC, por lo que el uso de estas redes permite pensar en la industria del tratamiento de agua como un campo de aplicación para el GIP con el objetivo de remediar la contaminación.

Por el lado de la contaminación del aire, en Colombia este es un tema que cada día toma mayor importancia ya que es la responsable de miles de muertes al año debido a la cantidad de sustancias a las que se encuentran expuestas las personas diariamente: sustancias como CO₂, CO, NO_x y gases provenientes de plantas químicas ⁷⁴ necesitan ser removidos o eliminados definitivamente para mejorar la calidad del aire y para ello se han investigado múltiples alternativas, pero una opción nada común es el uso de redes organometálicas las cuales pueden ayudar a mitigar la contaminación al capturar dichas sustancias contaminantes. Las redes de cobre y las redes de zirconio han sido las más estudiadas en este campo para la adsorción de contaminantes como el amoníaco, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de

⁷⁰ RUSSO V., HMOUDAH M., BROCCOLI F., IESCE M. R., JUNG O.-S., and DI SERIO M., "Applications of Metal Organic Frameworks in Wastewater Treatment: A Review on Adsorption and Photodegradation," *Frontiers in Chemical Engineering*, vol. 2, p. 24, 2020, doi: 10.3389/fceng.2020.581487

⁷¹ HUANG J., HUANG D., ZENG F., MA L., and WANG Z., "Photocatalytic MOF fibrous membranes for cyclic adsorption and degradation of dyes," *Journal of Materials Science*, 2020, doi: 10.1007/s10853-020-05473-x

⁷² MAZANI M., AKTIJ S. A., RAHIMPOUR A., and HASSAN KIADEH N. T., "Cu-BTC metal-organic framework modified membranes for landfill leachate treatment," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/w12010091

⁷³ ABDELHAMEED R. M., ABDEL-GAWAD H., ELSHAHAT M., and EMAM H. E., "Cu-BTC@cotton composite: Design and removal of ethion insecticide from water," *RSC Advances*, vol. 6, no. 48, pp. 42324–42333, 2016, doi: 10.1039/c6ra04719j.

⁷⁴ PARDO T., "Contaminación del aire: un asesino anda suelto," *Periódico El Tiempo*, 2018, [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/contaminacion-del-aire-un-problema-para-la-salud-en-colombia-292226>

carbono ⁷⁵ ⁷⁶ consiguiendo remociones superiores al 70%. También la ZrBDC se han estudiado para la reducción catalítica de CO₂ por lo que se puede genera un mayor beneficio ya que en lugar de separar el contaminante, se degrada totalmente ⁷⁷ y para las separaciones de SO₂ se han estudiado por medio de redes tipo MIL-125 (Ti) y FeBTC⁷⁸ por lo que podrían emplearse para la separación de este compuesto responsable de aire y lluvias ácidas.

Todas estas sustancias contaminantes provienen en gran parte de automóviles, debido a la combustión generada en el motor por lo que se han dedicado grandes esfuerzos ya sea a reducir la producción de gases contaminantes o a encontrar fuentes de combustible no derivados del petróleo. Una de estas fuentes es el biogás, ya que este es producto de un proceso de digestión anaerobia donde aproximadamente el 70% es metano y el 25% es CO₂. El metano contenido en el biogás es aprovechado como combustible, pero para ello se le debe retirar el CO₂ y una red organometálica puede cumplir con este propósito, ya que como estudió Granados del GIP se puede hacer la separación CO₂/CH₄ por medio de una CuBTC o incluso se ha investigado la separación por medio de unas membranas híbridas utilizando MIL-125 (Ti) y ZrBDC ⁷⁹ ⁸⁰, como red organometálica para obtener el producto deseado en mayor pureza, evidenciado en la Tabla 3. En la industria del

⁷⁵ DECOSTE J. B. and PETERSON G. W., "Metal – Organic Frameworks for Air Purification of Toxic Chemicals," ACS Applied Materials and Interfaces, p. 33, 2013, doi: 10.1021/cr4006473

⁷⁶ SAVA GALLIS D. F., PARKES M. V., GREATHOUSE J. A., ZHANG X., and NENOFF T. M., "Enhanced O₂ selectivity versus N₂ by partial metal substitution in Cu-BTC," Chemistry of Materials, vol. 27, no. 6, pp. 2018–2025, 2015, doi: 10.1021/cm5042293

⁷⁷ WANG C., XIE Z., DEKRAFFT K. E., and LIN W., "Doping metal-organic frameworks for water oxidation, carbon dioxide reduction, and organic photocatalysis," Journal of the American Chemical Society, vol. 133, no. 34, pp. 13445–13454, 2011, doi: 10.1021/ja203564w

⁷⁸ BRANDT P., NUHNEN A., LANGE M., MÖLLMER J., WEINGART O., and JANIAC C., "Metal-Organic Frameworks with Potential Application for SO₂ Separation and Flue Gas Desulfurization," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 11, no. 19, pp. 17350–17358, 2019, doi: 10.1021/acscami.9b00029

⁷⁹ FRIEBE S., MUNDSTOCK A., UNRUH D., RENZ F., and CARO J., "NH₂-MIL-125 as membrane for carbon dioxide sequestration: Thin supported MOF layers contra Mixed-Matrix-Membranes," Journal of Membrane Science, vol. 516, pp. 185–193, 2016, doi: 10.1016/j.memsci.2016.06.015

⁸⁰ ERFANI A. and ASGHARI M., "Comparison of micro- and nano-sized CuBTC particles on the CO₂/CH₄ separation performance of PEBA mixed matrix membranes," Journal of Chemical Technology and Biotechnology, vol. 95, no. 11, pp. 2951–2963, 2020, doi: 10.1002/jctb.6456

biogás, también pueden tener lugar las redes del GIP como una mejora al proceso dándole un valor agregado a las investigaciones realizadas en el laboratorio.

Finalmente, en el proceso de refinación de crudo se pueden ver involucradas las redes organometálicas del GIP, ya que el uso de estas redes como separadores de CH_4 se ha estudiado para la purificación del gas natural obtenido de pozo o en corrientes de combustión de los hornos utilizados para calentar los crudos se puede separar el metano para obtener el producto directamente. Por otro lado, las MOFs se han estudiado en la separación de H_2 de corrientes de refinado, ya que estructuras como la CuBTC han separado y almacenado hidrógeno de corriente de gases producto de procesos de reinado ⁸¹, por lo que serían útiles para capturar este gas que es muy apetecido dentro de la misma refinería en procesos como el reformado catalítico, hidrocrackeo y en la producción de aceites nafténicos y ceras ⁸² ⁸³. También, la planta de hidrotratamiento es de gran importancia para estas grandes productoras de combustible ya que en esta se eliminan las impurezas (compuestos azufrados) que disminuyen la calidad del producto ⁸⁴; el uso de redes organometálicas como se observa en la tabla 4, se ha estudiado para la eliminación de compuestos azufrados presentes en la gasolina ⁸⁵ ⁸⁶ ⁸⁷, y estructuras como la CuBTC y la N/S@CuBTC han alcanzado hasta un 95% de eliminación de azufre, desempeñado un papel prometedor para reducir los costos de este proceso y por

⁸¹ HU J. et al., "Mixed-matrix membrane hollow fibers of $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$ MOF and polyimide for gas separation and adsorption," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 24, pp. 12605–12612, 2010, doi: 10.1021/ie1014958

⁸² NACIONAL U. T., "Reforma catalítica," 2010

⁸³ ICCT, "Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre," 2011

⁸⁴ *Ibíd.*

⁸⁵ ULLAH L. et al., "Highly efficient adsorption of benzothiophene from model fuel on a metal-organic framework modified with dodeca-tungstophosphoric acid," *Chemical Engineering Journal*, vol. 362, pp. 30–40, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.12.141

⁸⁶ LIU J., LI X. M., HE J., WANG L. Y., and DU LEI J., "Combining the photocatalysis and absorption properties of core-shell Cu-BTC@TiO₂ microspheres: Highly efficient desulfurization of thiophenic compounds from fuel," *Materials*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/ma11112209

⁸⁷ EBRAHIM A. M., Jagiello J., and BANDOSZ T. J., "Enhanced reactive adsorption of H_2S on Cu-BTC/S- and N-doped GO composites," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 3, no. 15, pp. 8194–8204, 2015, doi: 10.1039/c5ta01359c

ende el costo del producto generado por lo que este campo de acción tiene aplicabilidad para el GIP con el objetivo de mejorar el proceso.

En resumen, las problemáticas abordadas generan impacto en la industria, y en las personas de una u otra manera, donde una solución a través de las redes organometálicas puede representar esa ventaja sobre los demás materiales que buscan los investigadores y las empresas. Al haber identificado los usos de estas redes, el grupo de investigación en polímeros puede, ahora, pensar en un estudio completo en el cual se sintetice la red organometálica, se estudie a nivel laboratorio y se escale a nivel piloto para darle solución a un problema.

4. CONCLUSIONES

Las redes organometálicas del GIP difieren mucho en campos como los sensores y las imágenes diagnósticas ya que la síntesis para estos propósitos es muy diferente a la conocida en el grupo de investigación además los procesos de estudios requieren equipos que no están al alcance del grupo.

Campos como la catálisis, las separaciones y los contenedores de compuestos y energía están dentro de las capacidades del grupo tanto en precursores como métodos de estudio como síntesis por lo que puede abordar estos campos para expandir la investigación en torno a este material.

Se encontró aplicabilidad a las redes del GIP en Colombia para el tratamiento de aguas, remediación de la contaminación del aire, purificación de biogás y procesos de refinación de crudo para darle un valor agregado a las investigaciones hechas.

BIBLIOGRAFÍA

ABDELHAMEED R. M., ABDEL-GAWAD H., ELSHAHAT M., and EMAM H. E., “Cu-BTC@cotton composite: Design and removal of ethion insecticide from water,” RSC Advances, vol. 6, no. 48, pp. 42324–42333, 2016, doi: 10.1039/c6ra04719j.

ABRIL L. and DIAZ D., “Estudio del efecto de los parámetros de síntesis de la estructura metalorgánica C₆H₈O₇-Cu(NO₃)₂ sobre las propiedades del material y su evaluación en la capacidad de adsorción de plomo,” 2016

ARDILA-SUÁREZ C., Molina V.D. R., ALEM H., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., “Synthesis of ordered microporous/macroporous MOF-808 through modulator-induced defect-formation, and surfactant self-assembly strategies,” Physical Chemistry Chemical Physics, vol. 22, no. 22, pp. 12591–12604, 2020, doi: 10.1039/d0cp00287a

ARDILA-SUÁREZ C., PEREZ-BELTRAN S., RAMÍREZ-CABALLERO G. E., and BALBUENA P. B., “Enhanced acidity of defective MOF-808: Effects of the activation process and missing linker defects,” Catalysis Science and Technology, vol. 8, no. 3, pp. 847–857, 2018, doi: 10.1039/c7cy02462b.

ARDILA-SUÁREZ C., RODRÍGUEZ-PEREIRA J., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., “An analysis of the effect of zirconium precursors of MOF-808 on its thermal stability, and structural and surface properties,” CrystEngComm, vol. 21, no. 9, pp. 1407–1415, 2019, doi: 10.1039/c8ce01722k

ARDILA-SUÁREZ, C. DÍAZ-LASPRILLA A. M., DÍAZ-VACA L. A., BALBUENA P. B., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., “Synthesis,

characterization, and post-synthetic modification of a micro/mesoporous zirconium-tricarboxylate metal-organic framework: Towards the addition of acid active sites,” *CrystEngComm*, vol. 21, no. 19, pp. 3014–3030, 2019, doi: 10.1039/c9ce00218a

BHEMBE Y. A. and DLAMINI L. N., “Photoreduction of chromium (VI) by a composite of niobium (V) oxide impregnated with a Ti-based MOF,” *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, vol. 55, no. 8, pp. 1003–1020, 2020, doi: 10.1080/10934529.2020.176370

BORFECCHIA E. et al., “Insights into adsorption of NH₃ on HKUST-1 metal-organic framework: A multitechnique approach,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 116, no. 37, pp. 19839–19850, 2012, doi: 10.1021/jp305756k

BRANDT P., NUHNEN A., LANGE M., MÖLLMER J., WEINGART O., and JANIÁK C., “Metal-Organic Frameworks with Potential Application for SO₂ Separation and Flue Gas Desulfurization,” *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 11, no. 19, pp. 17350–17358, 2019, doi: 10.1021/acsami.9b00029

BRAVO C., “Síntesis y caracterización de redes organo-metalicas de titanio funcionalizadas con un complejo de dioxo-molibdeno (VI),” 2019

CADENA D., “Síntesis y caracterización de un polímero de coordinación de zinc y ácido p-tereftálico con potencial aplicación en la liberación controlada de ibuprofeno,” 2019

CHOI K. M., JEONG H. M., PARK J. H., ZHANG Y. B., KANG J. K., and YAGHI O. M., “Supercapacitors of nanocrystalline metal-organic frameworks,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 7, pp. 7451–7457, 2014, doi: 10.1021/nn5027092

CUENU CABEZAS Fernando Grupo de investigación en compuestos organometálicos y catálisis [en línea] disponible en: <https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000006025>

DECOSTE J. B. and PETERSON G. W., "Metal – Organic Frameworks for Air Purification of Toxic Chemicals," ACS Applied Materials and Interfaces, p. 33, 2013, doi: 10.1021/cr4006473

DEVARAJAN N. and SURESH P., "Iron-MOF-Catalyzed Domino Cyclization and Aromatization Strategy for the Synthesis of 2,4-Diarylquinolines," Asian Journal of Organic Chemistry, vol. 9, no. 3, pp. 437–444, 2020, doi: 10.1002/ajoc.201900708

DÍAZ A. and DÍAZ L., "Síntesis, modificación y caracterización de MOFs de zirconio para la obtención de sólidos ácidos," 2017

DONG H. et al., "Folic Acid Functionalized Zirconium-Based Metal–Organic Frameworks as Drug Carriers for Active Tumor-Targeted Drug Delivery," Chemistry - A European Journal, vol. 24, no. 64, pp. 17148–17154, 2018, doi: 10.1002/chem.201804153

EBRAHIM A. M., Jagiello J., and BANDOSZ T. J., "Enhanced reactive adsorption of H₂S on Cu-BTC/S- and N-doped GO composites," Journal of Materials Chemistry A, vol. 3, no. 15, pp. 8194–8204, 2015, doi: 10.1039/c5ta01359c

EFOME J. E., RANA D., MATSUURA T., and LAN C. Q., "Insight Studies on Metal-Organic Framework Nanofibrous Membrane Adsorption and Activation for Heavy Metal Ions Removal from Aqueous Solution," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 10, no. 22, pp. 18619–18629, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b01454

ERFANI A. and ASGHARI M., "Comparison of micro- and nano-sized CuBTC particles on the CO₂/CH₄ separation performance of PEBA mixed matrix membranes," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 95, no. 11, pp. 2951–2963, 2020, doi: 10.1002/jctb.6456

FRIEBE S., MUNDSTOCK A., UNRUH D., RENZ F., and CARO J., "NH₂-MIL-125 as membrane for carbon dioxide sequestration: Thin supported MOF layers contra Mixed-Matrix-Membranes," *Journal of Membrane Science*, vol. 516, pp. 185–193, 2016, doi: 10.1016/j.memsci.2016.06.015

GANDARA-LOE J. et al., "Metal-Organic Frameworks as Drug Delivery Platforms for Ocular Therapeutics," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 11, no. 2, pp. 1924–1931, 2019, doi: 10.1021/acsami.8b20222

GAO K., LI Y., and NA P., "Insight into Design of MIL-125(Ti)-Based Composite with Boosting Photocatalytic Activity: The Embedded Multiple Fe Oxide Count," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 7, no. 2, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1002/admi.201901449

GAO X., GUO B., GUO C., MENG Q., LIANG J., and LIU J., "Zirconium-Based Metal-Organic Framework for Efficient Photocatalytic Reduction of CO₂ to CO: The Influence of Doped Metal Ions," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 12, no. 21, pp. 24059–24065, 2020, doi: 10.1021/acsami.0c05631

GRANADOS G., "Síntesis y evaluación de adsorbentes organometálicos-MOFs para la captura y almacenamiento de CO₂," 2015

GUO H., LIN F., CHEN J., LI F., and WENG W., "Metal-organic framework MIL-125(Ti) for efficient adsorptive removal of Rhodamine B from aqueous solution," *Appl. Organomet. Chem.*, vol. 29, no. 1, pp. 12–19, 2015, doi: 10.1002/aoc.3237

HAYASHI Y., "Pot economy and one-pot synthesis," *Chemical Science*, vol. 7, no. 2, pp. 866–880, 2016, doi: 10.1039/c5sc02913a

HU J. et al., "Mixed-matrix membrane hollow fibers of Cu₃(BTC)₂ MOF and polyimide for gas separation and adsorption," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 24, pp. 12605–12612, 2010, doi: 10.1021/ie1014958

HU J., DING J., and ZHONG Q., "In situ fabrication of amorphous TiO₂/NH₂-MIL-125(Ti) for enhanced photocatalytic CO₂ into CH₄ with H₂O under visible-light irradiation," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 560, pp. 857–865, 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2019.11.003

HU X. et al., "Facile synthesis of the Basolite F300-like nanoscale Fe-BTC framework and its lithium storage properties," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 115, pp. 114483–114490, 2016, doi: 10.1039/C6RA22738D.

HU X. et al., "Facile synthesis of the Basolite F300-like nanoscale Fe-BTC framework and its lithium storage properties," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 115, pp. 114483–114490, 2016, doi: 10.1039/C6RA22738D

HUANG H. et al., "Toward visible-light-assisted photocatalytic nitrogen fixation: A titanium metal organic framework with functionalized ligands," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 267, no. October 2019, p. 118686, 2020, doi: 10.1016/j.apcatb.2020.118686

HUANG J., HUANG D., ZENG F., MA L., and WANG Z., "Photocatalytic MOF fibrous membranes for cyclic adsorption and degradation of dyes," *Journal of Materials Science*, 2020, doi: 10.1007/s10853-020-05473-x

HURTADO BELALCAZAR John Jady Grupo de investigación en química inorgánica catálisis y bioniorgánica [en línea] disponible en: <https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000014086>

ICCT, "Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre," 2011

JI P. et al., "Strongly Lewis Acidic Metal-Organic Frameworks for Continuous Flow Catalysis," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 141, no. 37, pp. 14878–14888, 2019, doi: 10.1021/jacs.9b07891

JIANG K. et al., "A Biocompatible Ti-based metal-organic framework for pH responsive drug delivery," *Materials Letters*, vol. 225, pp. 142–144, 2018, doi: 10.1016/j.matlet.2018.05.006

KLOUTSE F. A., HOURRI A., NATARAJAN S., BENARD P., and CHAHINE R., "Hydrogen separation by adsorption: Experiments and modelling of H₂-N₂-CO₂ and H₂-CH₄-CO₂ mixtures adsorption on CuBTC and MOF-5," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 271, pp. 175–185, 2018, doi: 10.1016/j.micromeso.2018.05.042

LARREA E. S., FERNÁNDEZ DE LUIS R., FIDALGO-MARIJUAN A., MAYA E. M., IGLESIAS M., and ARRIORTUA M. I., "Study of the versatility of CuBTC@IL-derived materials for heterogeneous catalysis," *CrystEngComm*, vol. 22, no. 17, pp. 2904–2913, 2020, doi: 10.1039/c9ce01157a

LESTARI W., SUWARNO H., and ARROZI U., "Spillover effect on Pd-embedded metal-organic frameworks based on zirconium(IV) and benzene 1,3,5-tricarboxylate

as hydrogen storage materials,” no. 4, p. 8, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab1bc7
Manuscript

LI J.-H. et al., “Electrochemical Evolution of Pore-Confined Metallic Molybdenum in a Metal–Organic Framework (MOF) for All-MOF-Based Pseudocapacitors,” *ACS Applied Energy Materials*, vol. 3, no. 7, pp. 6258–6267, 2020, doi: 10.1021/acsaem.0c00399

LIN S., ZHAO Y., and YUN Y. S., “Highly Effective Removal of Nonsteroidal Anti-inflammatory Pharmaceuticals from Water by Zr(IV)-Based Metal-Organic Framework: Adsorption Performance and Mechanisms,” *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 10, no. 33, pp. 28076–28085, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b08596

LIU J., LI X. M., HE J., WANG L. Y., and DU LEI J., “Combining the photocatalysis and absorption properties of core-shell Cu-BTC@TiO₂ microspheres: Highly efficient desulfurization of thiophenic compounds from fuel,” *Materials*, vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/ma11112209

LÓPEZ K. and MENDOZA J., “Efecto de la relación molar y la adición de acetato de sodio durante la síntesis de MOF CuBTC sobre la capacidad de adsorción de dióxido de carbono,” 2015

MAITI S., PRAMANIK A., MANJU U., and MAHANTY S., “Cu₃(1,3,5-benzenetricarboxylate)₂ metal-organic framework: A promising anode material for lithium-ion battery,” *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 226, pp. 353–359, 2016, doi: 10.1016/j.micromeso.2016.02.01

MAITI S., PRAMANIK A., MANJU U., and MAHANTY S., “Cu₃(1,3,5-benzenetricarboxylate)₂ metal-organic framework: A promising anode material for

lithium-ion battery,” *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 226, pp. 353–359, 2016, doi: 10.1016/j.micromeso.2016.02.011

MARTÍNEZ D., “Síntesis de nanopartículas de oro soportadas en óxido de silicio funcionalizado y su actividad catalítica en reacciones de epoxidación, cicloadición y carboxilación oxidativa,” 2014

MAZANI M., AKTIJ S. A., RAHIMPOUR A., and HASSAN KIADEH N. T., “Cu-BTC metal-organic framework modified membranes for landfill leachate treatment,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/w12010091

NACIONAL U. T., “Reforma catalítica,” 2010

PANGESTU T. et al., “The synthesis of biodiesel using copper-based metal-organic framework as a catalyst,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 4, p. 103277, 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103277

PARDO T., “Contaminación del aire: un asesino anda suelto,” *Periódico El Tiempo*, 2018, [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/contaminacion-del-aire-un-problema-para-la-salud-en-colombia-292226>

PFEFFERLE W. C., “Ultra-pure hydrogen for fuel cells.” doi: 10.4271/640378

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA Líneas de Investigación [en línea] disponible en: <https://ciencias.javeriana.edu.co/departamentos-instituto/quimica/investigación>

RIBEIRO A. M., GRANDE C. A., LOPES F. V. S., LOUREIRO J. M., and RODRIGUES A. E., “A parametric study of layered bed PSA for hydrogen

purification,” *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 21, pp. 5258–5273, 2008, doi: 10.1016/j.ces.2008.07.017

ROJAS Z. M., “Estructuras metal orgánicas de titanio (MIL-125 y MIL-125-NH 2): síntesis, caracterización y evaluación de la actividad en procesos fotocatalíticos,” 2017

ROSAS D., “Redes órgano-metálicas de zirconio con tamaño de poro ajustable obtenidas a partir de la síntesis asistida por emulsificantes para el desarrollo de catalizadores ácidos heterogéneos,” 2019

RUSSO V., HMOUDAH M., BROCCOLI F., IESCE M. R., JUNG O.-S., and DI SERIO M., “Applications of Metal Organic Frameworks in Wastewater Treatment: A Review on Adsorption and Photodegradation,” *Frontiers in Chemical Engineering*, vol. 2, p. 24, 2020, doi: 10.3389/fceng.2020.581487

SALAZAR-AGUILAR A. D. et al., “Direct hydroxylation of phenol to dihydroxybenzenes by H₂O₂ and Fe-based metal-organic framework catalyst at room temperature,” *Catalysts*, vol. 10, no. 2, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/catal10020172

SALIMI M. et al., “Photocatalytic degradation of cefixime with MIL-125(Ti)-mixed linker decorated by g-C₃N₄ under solar driven light irradiation,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 582, no. August, p. 123874, 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.123874.

SÁNCHEZ SÁENZ Carlos Ignacio Grupo de Ingeniería Electroquímica – GRIEQUI
[en línea] disponible en:
<https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000000954>

SAVA GALLIS D. F., PARKES M. V., GREATHOUSE J. A., ZHANG X., and NENOFF T. M., "Enhanced O₂ selectivity versus N₂ by partial metal substitution in Cu-BTC," *Chemistry of Materials*, vol. 27, no. 6, pp. 2018–2025, 2015, doi: 10.1021/cm5042293

SILVA V. and SUÁREZ M., "Estudio del efecto de parámetros de síntesis, coordinación modulada y funcionalización de la MOF FeBTC en la eficiencia de remoción de Ni de una solución acuosa," Universidad Industrial de Santander, 2016

SONG J. L. et al., "A facile synthesis of uniform hollow MIL-125 titanium-based nanoplatform for endosomal escape and intracellular drug delivery," *Chemical Engineering Journal*, vol. 396, no. April, p. 125246, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.125246

SONI S., BAJPAI P. K. and ARORA C., "A review on metal-organic framework: synthesis, properties and application," *Characterization and Application of Nanomaterials*, vol. 2, no. 2, pp. 1–20, 2018, doi: 10.24294/can.v2i2.551

SORRIBAS S. and TÉLLEZ C., "MOFs: propiedades y aplicación en separaciones más eficientes," *Boletín del Grupo Español del Carbón*, no. 41, pp. 19–22, 2016

STOCK N. and BISWAS S., "Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): Routes to various MOF topologies, morphologies, and composites," *Chemical Reviews*, vol. 112, no. 2, pp. 933–969, 2012, doi: 10.1021/cr200304e

SUHAIMI N. H., YEONG Y. F., JUSOH N., CHEW T. L., BUSTAM M. A., and SULEMAN S., "Separation of CO₂ from CH₄ using mixed matrix membranes incorporated with amine functionalized MIL-125 (Ti) nanofiller," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 159, pp. 236–247, 2020, doi: 10.1016/j.cherd.2020.04.020

ULLAH L. et al., "Highly efficient adsorption of benzothiophene from model fuel on a metal-organic framework modified with dodeca-tungstophosphoric acid," *Chemical Engineering Journal*, vol. 362, pp. 30–40, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.12.141

WANG C., XIE Z., DEKRAFFT K. E., and LIN W., "Doping metal-organic frameworks for water oxidation, carbon dioxide reduction, and organic photocatalysis," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 133, no. 34, pp. 13445–13454, 2011, doi: 10.1021/ja203564w

WANG Q. and ASTRUC D., "State of the Art and Prospects in Metal-Organic Framework (MOF)-Based and MOF-Derived Nanocatalysis," *Chemical Reviews*, vol. 120, no. 2, pp. 1438–1511, 2020, doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00223

WANG Z. et al., "A metal-organic framework with open metal sites for enhanced confinement of sulfur and lithium-sulfur battery of long cycling life," *Crystal Growth and Design*, vol. 13, no. 11, pp. 5116–5120, 2013, doi: 10.1021/cg401304x

XIE Y., LIU X., MA X., DUAN Y., YAO Y., and CAI Q., "Small Titanium-Based MOFs Prepared with the Introduction of Tetraethyl Orthosilicate and Their Potential for Use in Drug Delivery," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 10, no. 16, pp. 13325–13332, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b01175

XU G., NIE P., DOU H., DING B., LI L., and ZHANG X., "Exploring metal organic frameworks for energy storage in batteries and supercapacitors," *Materials Today*, vol. 20, no. 4, pp. 191–209, 2017, doi: 10.1016/j.mattod.2016.10.003

YANG Q., HONG H., and LUO Y., "Heterogeneous nucleation and synthesis of carbon dots hybrid Zr-based MOFs for simultaneous recognition and effective removal of tetracycline," *Chemical Engineering Journal*, vol. 392, no. November, p. 123680, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.123680

YANG Q., XU Q., and JIANG H. L., "Metal-organic frameworks meet metal nanoparticles: Synergistic effect for enhanced catalysis," *Chemical Society Reviews*, vol. 46, no. 15, pp. 4774–4808, 2017, doi: 10.1039/c6cs00724d

YANG X. et al., "A robust strategy of homogeneously hybridizing silica and Cu₃(BTC)₂ to in situ synthesize highly dispersed copper catalyst for furfural hydrogenation," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 596, no. March, p. 117518, 2020, doi: 10.1016/j.apcata.2020.117518

ZHOU H. C., LONG J. R., and YAGHI O. M., "Introduction to metal-organic frameworks," *Chemical Reviews*, vol. 112, no. 2, pp. 673–674, 2012, doi: 10.1021/cr300014x

ZHOU J. et al., "Rational Design of a Metal-Organic Framework Host for Sulfur Storage in Fast, Long-Cycle Li-S Batteries," *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, pp. 10715–10722, 2019, doi: 10.1039/b000000x

ZHOU S., GAO J., ZHU J., PENG D., ZHANG Y., and ZHANG Y., "Self-cleaning, antibacterial mixed matrix membranes enabled by photocatalyst Ti-MOFs for efficient dye removal," *Journal of Membrane Science*, vol. 610, p. 118219, 2020, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118219

ANEXOS

Anexo A. Redes organometálicas en el Grupo de Investigación en Polímeros (GIP)

N°	Título	Tipo de Documento	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
1	Síntesis y evaluación de adsorbentes organometálicos-MOFs para la captura y almacenamiento de CO ₂	Trabajo de grado	Estudiar la influencia de las variables de síntesis de una CuBTC para la adsorción de CO ₂	CuBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, Cu(NO ₃) ₂ , C ₂ H ₃ Na ₂	88
2	Efecto de la relación molar y la adición de acetato de sodio durante la síntesis de MOF CuBTC sobre la capacidad de adsorción de dióxido de carbono	Trabajo de grado	Evaluar la capacidad de adsorción de CO ₂ variando la relación molar de los precursores (Cu/BTC) y la relación con	CuBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, Cu(NO ₃) ₂ , C ₂ H ₃ NaO ₂	89

⁸⁸ GRANADOS G., Op. Cit.

⁸⁹ LÓPEZ K. and MENDOZA J., Op. Cit.

N°	Título	Tipo de Documento	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
			acetato de sodio (AcNa/BTC)				
3	Estudio del efecto de los parámetros de síntesis de la estructura metal orgánica C ₆ H ₈ O ₇ -CU(NO ₃) ₂ sobre las propiedades del material y su evaluación en la capacidad de adsorción de plomo	Trabajo de grado	Encontrar las condiciones óptimas de síntesis de una CuAC para la adsorción de plomo	CuAc	Solvotérmico	H ₃ BTC, Cu(NO ₃) ₂ , C ₆ H ₈ O ₇	90
4	Estudio del efecto de parámetros de síntesis, coordinación modulada y funcionalización de la MOF FeBTC en la eficiencia de remoción de Ni de una solución acuosa	Trabajo de grado	Investigar la capacidad de adsorción de níquel de una FeBTC en una solución acuosa	FeBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, C ₅ H ₉ NO ₄ , Fe(NO ₃) ₃	91
5	Synthesis, characterization, and	Artículo científico	Estudiar el efecto de la	ZrBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrCl ₄ ,	92

⁹⁰ ABRIL L. and DIAZ D., Op. Cit.

⁹¹ SILVA V. and SUÁREZ M., Op. Cit.

⁹² ARDILA-SUÁREZ, C. DÍAZ-LASPRILLA A. M., DÍAZ-VACA L. A., BALBUENA P. B., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., Op. Cit.

N°	Título	Tipo de Documento	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
	post-synthetic modification of a micro/mesoporous zirconium-tricarboxylate metal-organic framework: Towards the addition of acid active sites		concentración del modulador en el tamaño de poro de la ZrBTC				
6	An analysis of the effect of zirconium precursors of MOF-808 on its thermal stability, and structural and surface properties	Artículo científico	Analizar la influencia del precursor metálico en las propiedades fisicoquímicas de la MOF para posibles usos en catálisis	ZrBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrCl ₄ , ZrOCl ₂ /H ₂ O, (NO ₃) ₂ /H ₂ O	93
7	Synthesis of Ordered Microporous/Macroporous MOF-808 through Modulator-Induced Defect-Formation, and	Artículo científico	Se estudió la cristalinidad de la ZrBTC al agregarse en el proceso de síntesis, diferentes	ZrBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrOCl ₂ /8H ₂ O, CTAB, ácido acético, fórmico y propiónico	94

⁹³ ARDILA-SUÁREZ C., RODRÍGUEZ-PEREIRA J., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., Op. Cit.

⁹⁴ ARDILA-SUÁREZ C., MOLINA V.D. R., ALEM H., BALDOVINO-MEDRANO V. G., and RAMÍREZ-CABALLERO G. E., Op. Cit.

N°	Título	Tipo de Documento	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
	Surfactant Self-Assembly Strategies		moduladores y surfactantes				
8	Síntesis, modificación y caracterización de MOFs de zirconio para la obtención de sólidos ácidos	Trabajo de grado	Estudiar el efecto de la temperatura, tipo y concentración de modulador para obtener la mejor ZrBTC que tenga aplicación en catálisis heterogénea	ZrBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrOCl ₂ /8H ₂ O, CH ₃ COOH, HCl, TFA	95
9	Redes organometálicas de zirconio con tamaño de poro ajustable obtenidas a partir de la síntesis asistida por emulsificantes para el desarrollo de catalizadores ácidos heterogéneos	Trabajo de grado	Investigar el efecto de la adición de surfactantes en las propiedades texturales, térmicas y la actividad catalítica de MOFs de zirconio	ZrBTC	Sonoquímico	H ₃ BTC, ZrCl ₄ , C ₁₉ H ₄₂ BrN, C ₁₂ H ₂₅ NaO ₄ S, ácido plurónico	96

⁹⁵ DÍAZ A. and DÍAZ L., Op. Cit.

⁹⁶ ROSAS D., Op. Cit.

N°	Título	Tipo de Documento	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precursores de la MOF	Ref.
10	Enhanced Acidity of Defective MOF 808: Effects of Activation Process and Missing Linker Defects	Artículo científico	Se indagó en la acidez generada en la ZrBTC, debido a los baños ácidos para generar puntos ácidos, por medio de simulaciones	ZrBTC	Simuladores	No se sintetizó la red organometálica	97
11	Síntesis y caracterización de redes organometálicas de titanio funcionalizadas con un complejo de dioxomolibdeno (VI)	Trabajo de grado	Estudiar la obtención de una MOF de Ti que sirva como soporte para funcionalizarla con complejos de Molibdeno (VI) y mejorar su respuesta para aplicaciones foto catalíticas	MIL-125 (Ti) y ZrBDC	Solvotérmico y One-Pot	$C_{12}H_{28}O_4Ti$, $TiCl_4(THF)_2$, $KMnO_4$, H_2BPDC , $ZrCl_4$	98

⁹⁷ ARDILA-SUÁREZ C., PEREZ-BELTRAN S., RAMÍREZ-CABALLERO G. E., and BALBUENA P. B., Op. Cit.

⁹⁸ BRAVO C., Op. Cit.

Anexo B. Nuevas líneas de investigación en redes organometálicas

N°	Título	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
Separación y almacenamiento						
1	Insight Studies on Metal-Organic Framework Nanofibrous Membrane Adsorption and Activation for Heavy Metal Ions Removal from Aqueous Solution	Analizar la capacidad de adsorción de cadmio y zinc de una solución acuosa por medio de una membrana híbrida	Poliacrilonitrilo@ZrBTC	Para la MOF método solvotérmico y para la Unión polímero-MOF método de hilamiento eléctrico	poliacrilonitrilo, H ₃ BTC, ZrCl ₄	99
2	Separation of CO ₂ from CH ₄ using mixed matrix membranes incorporated with amine functionalized MIL-125 (Ti) nanofiller	Conocer la influencia de la cantidad de MIL-125 (Ti) en la membrana híbrida para la separación CO ₂ /CH ₄	6FDA@MIL-125 (Ti)	Para la MOF método solvotérmico y para la unión polímero-MOF disolución en caja petri	C ₅ H ₁₀ O ₂ , PDA, FDA, TEOS	100
3	A Biocompatible Ti-based metal-organic	Investigar la influencia del pH en la	MIL-125 (Ti)	Solvotérmico	C ₁₂ H ₂₈ O ₄ Ti, C ₈ H ₆ O ₄ ,	101

⁹⁹ EFOME J. E., RANA D., MATSUURA T., and LAN C. Q., Op. Cit.

¹⁰⁰ SUHAIMI N. H., YEONG Y. F., JUSOH N., CHEW T. L., BUSTAM M. A., and SULEMAN S. Op. Cit.

¹⁰¹ JIANG K. et al., Op. Cit.

N°	Título	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precursores de la MOF	Ref.
	framework for pH responsive drug delivery	liberación de diclofenaco			$C_8H_6O_4$	
4	Small Titanium-Based MOFs Prepared with the Introduction of Tetraethyl Orthosilicate and Their Potential for Use in Drug Delivery	Estudiar la liberación de ibuprofeno por medio de una red a base de titanio modificada con tetraetil ortosilicato	TEOS@MIL-125 (Ti)	Solvotérmico	$C_6H_4(COOH)_2$, $Ti(C_4H_9O)_4$, TEOS	102
5	A facile synthesis of uniform hollow MIL-125 titanium-based nanoplatform for endosomal escape and intracellular drug delivery	Conocer el efecto de la adición de ácido hialurónico en la liberación de doxorubicina en un ambiente fisiológico	MIL-125 (Ti)	One-Pot	$(C_{14}H_{21}NO_{11})_n$ $C_6H_4(COOH)_2$, $C_{12}H_{28}O_4Ti$	103
6	Folic Acid Functionalized Zirconium-Based Metal–Organic Frameworks as Drug Carriers for Active Tumor-Targeted Drug Delivery	Estudiar la liberación de 5-fluorouracilo en células cancerígenas al adicionar ácido fólico a una ZrBTC	ZrBTC	One-Pot	H_3BTC , $ZrCl_4$, $C_{19}H_{19}N_7O_6$,	104

¹⁰² XIE Y., LIU X., MA X., DUAN Y., YAO Y., and CAI Q., Op. Cit.

¹⁰³ SONG J. L. et al. Op. Cit.

¹⁰⁴ DONG H. et al. Op. Cit.

N°	Título	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
7	Metal-Organic Frameworks as Drug Delivery Platforms for Ocular Therapeutics	Comparar la capacidad de carga y descarga de brimonidina de una ZrBDC con una CuBTC, UiO-66 y una MIL-100 (Fe)	ZrBDC	Solvotérmico	H ₂ BDC, ZrCl ₄	105
8	Highly Effective Removal of Nonsteroidal Anti-inflammatory Pharmaceuticals from Water by Zr(IV)-Based Metal-Organic Framework: Adsorption Performance and Mechanisms	Investigar la capacidad de absorción de una ZrBTC ante diferentes antiinflamatorios	ZrBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrOCl ₂ /8H ₂ O	106
9	Heterogeneous nucleation and synthesis of carbon dots hybrid Zr-based MOFs for simultaneous recognition	Investigar la capacidad de remoción de tetraciclina de una ZrBDC con	ZrBDC	One-Pot	ZrCl ₄ , H ₂ BDC, nanopartículas de carbono	107

¹⁰⁵ GANDARA-LOE J. et al., Op. Cit.

¹⁰⁶ LIN S., ZHAO Y., and YUN Y. S., Op. Cit.

¹⁰⁷ YANG Q., HONG H., and LUO Y. Op. Cit.

N°	Título	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
	and effective removal of tetracycline	nanopartículas de carbono				
10	Self-cleaning, antibacterial mixed matrix membranes enabled by photocatalyst Ti-MOFs for efficient dye removal	Conocer la influencia de la cantidad de MIL-125 (Ti) en la membrana híbrida para la separación de rodamina B en agua	PVDF@MIL-125 (Ti)	Para la MOF método solvotérmico y para la Unión polímero-MOF método de inmersión de fase	$C_{12}H_{28}O_4Ti$, $C_8H_6O_4$, PVDF	108
11	Metal-organic framework MIL-125(Ti) for efficient adsorptive removal of Rhodamine B from aqueous solution	Estudiar la remoción de colorante rodamina B en un medio acuoso	MIL-125 (Ti)	Solvotérmico	$Ti(OiPr)_4$ $C_8H_6O_4$	109
Catálisis						
12	The synthesis of biodiesel using copper-based metal-organic framework as a catalyst	Producir biodiesel a partir de aceite de palma catalizando la reacción con una CuBTC para estudiar	CuBTC	Solvotérmico	$CuSO_4/5H_2O$ H_3BTC	110

¹⁰⁸ ZHOU S., GAO J., ZHU J., PENG D., ZHANG Y., and ZHANG Y., Op. Cit.

¹⁰⁹ GUO H., LIN F., CHEN J., LI F., and WENG W., "Metal-organic framework MIL-125(Ti) for efficient adsorptive removal of Rhodamine B from aqueous solution," Appl. Organomet. Chem., vol. 29, no. 1, pp. 12–19, 2015, doi: 10.1002/aoc.3237

¹¹⁰ PANGESTU T. et al., Op. Cit.

N°	Título	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
		el efecto de la temperatura, rendimiento y reutilización de este				
13	Study of the versatility of CuBTC@IL derived materials for heterogeneous catalysis	Sintetizar una CuBTC para funcionalizarla con líquidos iónicos a base de imidazoles en una reacción de CO ₂ , para estudiar capacidad de adsorción, rendimiento y reciclaje del material	CuBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, CuSO ₄ /5H ₂ O	111
14	Síntesis de nanopartículas de oro soportadas en óxido de silicio funcionalizado y su actividad catalítica en reacciones de epoxidación, cicloadición y carboxilación oxidativa	Sintetizar un catalizador con nanopartículas de oro para múltiples reacciones	CuBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, CuSO ₄ /5H ₂ O	112

¹¹¹ LARREA E. S., FERNÁNDEZ DE LUIS R., FIDALGO-MARIJUAN A., MAYA E. M., IGLESIAS M., and ARRIORTUA M. I., Op. Cit.

¹¹² MARTÍNEZ D., Op. Cit.

N°	Titulo	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
15	Iron-MOF Catalyzed Domino Cyclization and Aromatization Strategy for the Synthesis of 2,4-Diarylquinolines	Sintetizar un catalizador FeBTC altamente poroso para la producción de 2,4-diarilquinolinas variando los disolventes en la reacción	FeBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, Fe(NO ₃) ₃ /9H ₂ O	113
16	Direct Hydroxylation of Phenol to Dihydroxybenzenes by H ₂ O ₂ and Fe-based Metal-Organic Framework Catalyst at Room Temperature	Sintetizar una FeBTC para catalizar la generación de dihidroxibencenos estudiando la temperatura, relación molar de reactivos y FeBTC y tiempo	FeBTC	One-Pot	H ₃ BTC, FeCl ₃ /H ₂ O	114
17	Photocatalytic degradation of cefixime with MIL-125(Ti)-mixed linker decorated by-g-C ₃ N ₄ under solar driven light irradiation	Degradar la cefixima con un fotocatalizador MIL-125(Ti) decorado con el g-C ₃ N ₄ , estudiando su efecto y rendimiento en el	MIL-125(Ti)	Solvotérmico	Ti(OCH(CH ₃) ₂) ₄ H ₂ BDC, g - C ₃ N ₄	115

¹¹³ DEVARAJAN N. and SURESH P., Op. Cit.

¹¹⁴ SALAZAR-AGUILAR A. D. et al., Op. Cit.

¹¹⁵ SALIMI M. et al., Op. Cit.

N°	Titulo	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
		proceso, al variar el pH, concentración del fármaco y cantidad de catalizador				
18	Zirconium-Based Metal-Organic Framework for Efficient Photocatalytic Reduction of CO ₂ to CO: The Influence of Doped Metal Ions	Estudiar la reducción fotocatalítica de CO ₂ al adicionar nanopartículas de Re y Co	ZrBDC	Solvotérmico	H ₂ BDC, ZrCl ₄ , CoCl ₂ Re(CO) ₅ Cl	116
19	In situ fabrication of amorphous TiO ₂ /NH ₂ -MIL-125(Ti) for enhanced photocatalytic CO ₂ into CH ₄ with H ₂ O under visible-light irradiation	Sintetizar una MIL-125 (Ti) con partículas de TiO ₂ para la reducción catalítica de CO ₂ por medio de luz visible	MIL-125(Ti)	One-Pot	Ti(OC ₄ H ₉) ₄ H ₂ BPDC, Am – TiO ₂	117
20	Toward visible-light-assisted photocatalytic nitrogen fixation: A titanium metal organic	Analizar la captación de nitrógeno a condiciones de temperatura y presión ambiente	MIL-125(Ti)	Solvotérmico	C ₈ H ₆ O ₄ , Ti(OC ₄ H ₉) ₄ H ₂ BDC	118

¹¹⁶ GAO X., GUO B., GUO C., MENG Q., LIANG J., and LIU J., Op. Cit.

¹¹⁷ HU J., DING J., and ZHONG Q., Op. Cit.

¹¹⁸ HUANG H. et al., Op. Cit.

N°	Título	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
	framework with functionalized ligands	con luz visible para convertirse en amoniaco				
21	Insight into Design of MIL-125(Ti)-Based Composite with Boosting Photocatalytic Activity: The Embedded Multiple Fe Oxide Count	Obtener una red tipo MIL-125 (Ti) modificada con óxido de hierro para la oxidación fotocatalítica de As (III)	MIL-125(Ti) y α -Fe ₂ O ₃ /MIL-125(Ti)	La MIL por solvotérmico y la unión con Fe ₂ O ₃ por sol-gel	H ₂ BDC, TBOT, α -Fe ₂ O ₃	119
22	A robust strategy of homogeneously hybridizing silica and Cu ₃ (BTC) ₂ to in situ synthesize highly dispersed copper catalyst for furfural hydrogenation	Sintetizar un catalizador con CuBTC soportado en sílice para la hidrogenación furfural	CuBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, TEOS, Cu(NO ₃) ₂	120
23	Strongly Lewis Acidic Metal–Organic Frameworks for	Producir un catalizador acido	ZrOTf-BTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrOCl ₂ /8H ₂ O, Me ₃ SiOTf	121

¹¹⁹ GAO K., LI Y., and NA P., Op. Cit.

¹²⁰ YANG X. et al., "A robust strategy of homogeneously hybridizing silica and Cu₃(BTC)₂ to in situ synthesize highly dispersed copper catalyst for furfural hydrogenation," Appl. Catal. A Gen., vol. 596, no. March, p. 117518, 2020, doi: 10.1016/j.apcata.2020.117518

¹²¹ JI P. et al., "Strongly Lewis Acidic Metal–Organic Frameworks for Continuous Flow Catalysis," J. Am. Chem. Soc., vol. 141, no. 37, pp. 14878–14888, 2019, doi: 10.1021/jacs.9b07891

N°	Titulo	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precursores de la MOF	Ref.
	Continuous Flow Catalysis	modificando la ZrBTC por ZrOTf-BTC				
24	Photoreduction of chromium (VI) by a composite of niobium (V) oxide impregnated with a Ti-based MOF	Estudiar la fotoreducción de cromo hexavalente por medio de una MIL-125 (Ti) dopada con nanoesferas de Nb ₂ O ₅	MIL-125 (Ti)	Solvotérmico	C ₁₂ H ₂₈ O ₄ Ti, C ₈ H ₆ O ₄ , NbCl ₅	122
Aplicaciones Energéticas						
25	Spillover effect on Pd-embedded metal-organic frameworks based on zirconium(IV) and benzene 1,3,5-tricarboxylate as hydrogen storage materials	Estudiar el efecto de la cantidad de nanopartículas Pd en una ZrBTC con respecto a la cantidad de hidrógeno almacenado	ZrBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrCl ₄ , PdCl ₂	123
26	Hydrogen separation by adsorption: Experiments and modelling of H ₂ -N ₂ -	Conocer la capacidad de adsorción de hidrógeno en una	CuBTC	Solvotérmico	La CuBTC no se sintetizó	124

¹²² BHEMBE Y. A. and DLAMINI L. N., "Photoreduction of chromium (VI) by a composite of niobium (V) oxide impregnated with a Ti-based MOF," J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng., vol. 55, no. 8, pp. 1003–1020, 2020, doi: 10.1080/10934529.2020.176370

¹²³ LESTARI W., SUWARNO H., and ARROZI U., Op. Cit.

¹²⁴ KLOUTSE F. A., HOURRI A., NATARAJAN S., BENARD P., and CHAHINE R., Op. Cit.

N°	Titulo	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
	CO ₂ and H ₂ -CH ₄ -CO ₂ mixtures adsorption on CuBTC and MOF-5	corriente de gases de combustión				
27	Electrochemical Evolution of Pore-Confined Metallic Molybdenum in a Metal-Organic Framework (MOF) for All-MOF-Based Pseudocapacitors	Sintetizar un pseudocapacitor a partir de una ZrBTC recubierta con Mo (VI)	ZrBTC	Solvotérmico	H ₃ BTC, ZrOCl ₂ /8H ₂ O, MoO ₂	125
28	Supercapacitors of Nanocrystalline Metal-Organic Frameworks	Comparar la capacidad de almacenamiento de energía de una ZrBDC, ZrBTC y CuBTC adicionadas a láminas de grafeno	ZrBDC, ZrBTC, CuBTC	Solvotérmico	H ₂ BDC, Zr ₆ O ₄ (OH) ₄ , H ₂ BDC, H ₃ BTC, Cu(OAc) ₂ /3H ₂ O	126
29	A Metal-Organic Framework with Open Metal Sites for Enhanced Confinement of Sulfur and Lithium-Sulfur	Medir la capacidad de adsorción de energía de una batería Li-S	CuBTC	One-Pot	Cu(NO ₃) ₂ / 2.5H ₂ O, H ₃ BTC	127

¹²⁵ LI J.-H. et al., Op. Cit.

¹²⁶ CHOI K. M., JEONG H. M., PARK J. H., ZHANG Y. B., KANG J. K., and YAGHI O. M., Op. Cit.

¹²⁷ WANG Z. et al., Op. Cit.

N°	Título	Objetivo de investigación	Tipo de MOF	Método de síntesis usado	Precusores de la MOF	Ref.
	Battery of Long Cycling Life					
30	Rational Design of a Metal-Organic Framework Host for Sulfur Storage in Fast, Long-Cycle Li-S Batteries	Medir la capacidad de adsorción de energía de una batería Li-S con MOF además de su rendimiento después de ciclos carga-descarga	CuBTC	One-Pot	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/5\text{H}_2\text{O}$, H_3BTC	128
31	$\text{Cu}_3(1,3,5\text{-benzenetricarboxylate})_2$ Metal-Organic Framework: A Promising Anode Material for Lithium-ion Battery	Analizar las propiedades electroquímicas de la CuBTC utiliza como una batería de litio	CuBTC	Solvotérmico	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/2.5\text{H}_2\text{O}$, H_3BTC	129

¹²⁸ ZHOU J. et al., "Rational Design of a Metal-Organic Framework Host for Sulfur Storage in Fast, Long-Cycle Li-S Batteries," J. Mater. Chem. C, vol. 3, pp. 10715–10722, 2019, doi: 10.1039/b000000x

¹²⁹ MAITI S., PRAMANIK A., MANJU U., and MAHANTY S., " $\text{Cu}_3(1,3,5\text{-benzenetricarboxylate})_2$ metal-organic framework: A promising anode material for lithium-ion battery," Microporous Mesoporous Mater., vol. 226, pp. 353–359, 2016, doi: 10.1016/j.micromeso.2016.02.011