



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2024,
Volumen 8, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5

FISICOQUÍMICA DE SUPERFICIES: LA CIENCIA DE LOS MATERIALES POROSOS

SURFACE PHYSICOCHEMISTRY: THE SCIENCE OF POROUS MATERIALS

Paloma Montserrat Rosas Licona

Universidad Autónoma de Puebla, México

Adrian Gustavo Badillo Morales

Universidad Autónoma de Puebla, México

Jorge Raúl Cerna Cortez

Universidad Autónoma de Puebla, México

Victorino Gilberto Serafín Alatraste Bueno

Universidad Autónoma de Puebla, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14148

Fisicoquímica de Superficies: la Ciencia de los Materiales Porosos

Paloma Montserrat Rosas Licona¹rosaspaloma122@gmail.com<https://orcid.org/0009-0001-0025-4444>Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México**Jorge Raúl Cerna Cortez**jorge.cerna@correo.buap.mx<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México**Adrian Gustavo Badillo Morales**adrianbadillo060@gmail.com<https://orcid.org/0009-0003-1371-7166>Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México**Victorino Gilberto Serafín Alatraste Bueno**victorino.alatraste@correo.buap.mx<https://orcid.org/0000-0001-8680-5018>Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla
México

RESUMEN

En este artículo se analiza el papel de los materiales porosos en la ciencia y la tecnología, destacando sus propiedades distintivas y su amplia gama de aplicaciones. Caracterizados por la presencia de cavidades, permiten la adsorción y transformación química de moléculas, lo que los convierte en sistemas fundamentales para la catálisis y el almacenamiento de energía. La condensación capilar y la histéresis de sorción adquieren particular relevancia al proporcionar información crucial sobre la distribución y el tamaño de los poros. Modelos teóricos como el de unión en sitios duales (DSBM) describen interacciones cooperativas dentro de redes porosas, facilitando la predicción del comportamiento en medios complejos. Paralelamente, el enfoque termodinámico refuerza la comprensión de los cambios de fase, y la simetría de los poros influye en la dinámica de fluidos y gases. Además, diferentes tipos de materiales porosos, como las zeolitas, sobresalen por su alta estabilidad química y térmica, su capacidad catalítica y su utilidad en la producción de combustibles. Finalmente, se abordan las aplicaciones biomédicas de los materiales porosos, posicionándolos como herramientas críticas en las ciencias biológicas.

Palabras clave: materiales porosos, fisicoquímica, propiedades, aplicaciones

¹ Autor principal

Correspondencia: rosaspaloma122@gmail.com

Surface Physicochemistry: the Science of Porous Materials

ABSTRACT

This article discusses the role of porous materials in science and technology, highlighting their distinctive properties and wide range of applications. These materials are characterized by cavities, allowing molecules to transform their adsorption and chemicals into fundamental systems for catalysis and energy storage. Capillary condensation and sorption hysteresis acquire particular relevance by providing crucial information about the distribution and size of the pores. Theoretical models such as dual site-binding (DSBM) describe cooperative interactions within porous networks, facilitating predicting behavior in complex media. In parallel, the thermodynamic approach reinforces the understanding of phase changes, and the symmetry of the pores influences the dynamics of fluids and gases. Different types of porous materials, such as zeolites, stand out for their high chemical and thermal stability, their catalytic capacity, and their usefulness in the production of fuels. Finally, the biomedical applications of porous materials are covered, positioning them as critical tools in biological sciences.

Keywords: porous materials, physicochemistry, properties, applications

Artículo recibido 05 septiembre 2024

Aceptado para publicación: 10 octubre 2024



INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, los materiales porosos han cobrado gran relevancia en la investigación científica y tecnológica debido a sus características únicas y su amplio rango de aplicaciones. Estos materiales poseen regiones con huecos, canales o cavidades donde las moléculas pueden ser adsorbidas, he incluso ser transformadas químicamente (Bennett *et al.*, 2021). Sus propiedades y funciones dependen de factores como su composición, tamaño, distribución y la geometría de los poros (Ahumada *et al.*, 2019). Consecuentemente, la producción de materiales porosos demanda un conocimiento detallado de sus mecanismos de formación, las transiciones estructurales o de fase, y las relaciones entre estructura y propiedades (Chen *et al.*, 2023). Por lo tanto, resultan ser de gran interés en diversas áreas, que van desde la catálisis, la adsorción, el almacenamiento de energía y para cuestiones biotecnológicas (Lu & Schüth, 2006).

Respecto al empleo de estos materiales, aquellos con capacidad catalizadora destacan por su alta eficiencia (Zhu *et al.*, 2021). Cada átomo puede participar directamente en las reacciones catalíticas, optimizando su uso y mejorando la selectividad de los procesos (Zhu *et al.*, 2021). Los materiales porosos también se destinan para la adsorción de líquidos y gases. La adsorción es un proceso en el que las moléculas se adhieren a la superficie de un sólido (Mhemeed, 2018). Se ha determinado que los materiales adsorbentes suelen ser porosos con grandes áreas superficiales maximizadas para una captura eficaz para sustancias como los gases (Mangun *et al.*, 1998). Es posible obtener una gran cantidad de información relacionada con el volumen de los poros y su distribución del tamaño a partir de isothermas de adsorción (Horikawa *et al.*, 2011). Incluso pueden ofrecer oportunidades optimizadas de conversión y almacenamiento de energía debido a su capacidad de ajuste topológico, logrando la mejora del rendimiento de un material en términos de energía y densidad de potencia (Hoseini *et al.*, 2023).

Existen múltiples tipos de materiales porosos, por ejemplo; las sílicas son materiales química y térmicamente estables, con tamaño de poro uniforme, área superficial alta y, gran capacidad de adsorción (Shinde *et al.*, 2021). Frecuentemente son aprovechadas en áreas medioambientales, biomédicos, y como soportes de catalizadores (Shinde *et al.*, 2021). A su vez existen los materiales organomodificados, los cuales han surgido a partir de la incorporación de grupos funcionales orgánicos a su estructura (Day *et al.*, 2021).



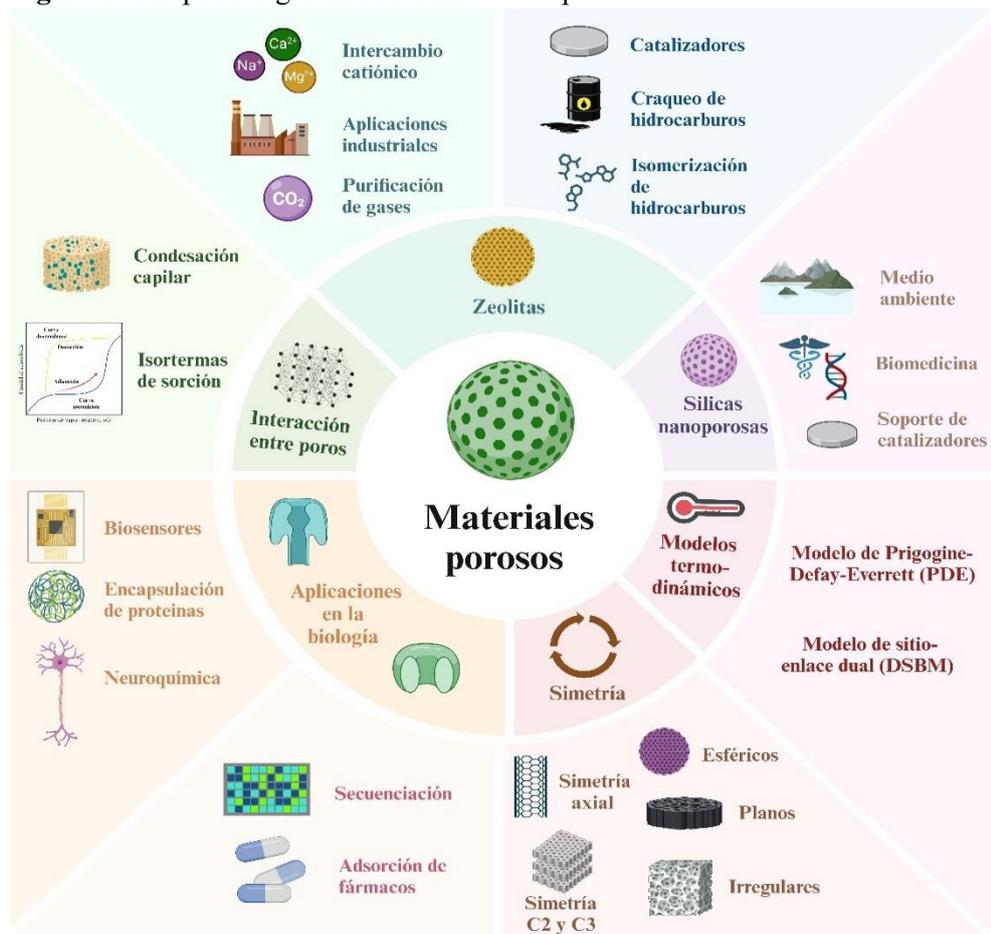
Se añaden estas propiedades con el fin de personalizar su capacidad de almacenamiento o selectividad de las redes porosas (Day *et al.*, 2021). No obstante, las zeolitas (derivados minerales de aluminosilicato con poros altamente ordenados) actúan como catalizadores, y favorecen el craqueo e isomerización de hidrocarburos (Day *et al.*, 2021). Además, dentro de esta gama de materiales funcionales, derivan las redes porosas, principalmente reconocidas por su gran potencial en el campo del almacenamiento y la conversión de energía (Li *et al.*, 2024).

Adicionalmente, han surgido diversas teorías que profundizan las investigaciones referentes a los materiales porosos. En relación con los modelos clásicos, destaca la teoría de Brunauer-Emmett-Teller (BET), ya que describe la adsorción física de moléculas de gas en superficies sólidas y constituye la base de una técnica clave para medir el área superficial específica de los materiales (Nasrollahzadeh *et al.*, 2019). Posteriormente, Everett introdujo el concepto de dominio de histéresis para explicar los resultados de experimentos de escaneo sistemático (Sing, 2004). De esta manera poco a poco se han introducido otras variables, como la energía libre de Gibbs; donde a través del equilibrio de un proceso fisicoquímico se concede una mejor comprensión de las propiedades de los materiales porosos (Kornhauser *et al.*, 2010).

Cabe mencionar, que, dentro de las metodologías aplicadas para el estudio de los materiales porosos, resalta la condensación capilar, en la cual un líquido es condensado dentro de los poros debido a la interacción entre las paredes del material y el vapor (Morishige, 2021). Principalmente en los mesoporos ocurre este fenómeno, precedido por la estratificación molecular en las paredes de los poros, mientras que en los microporos el mecanismo principal es el llenado directo, sin transiciones de fase (Horikawa *et al.*, 2011). La histéresis de sorción también juega un papel importante refiriéndose al bloqueo de poros provocado por transiciones líquido-vapor interrumpidas, en las que el estado de un dominio es condicionado por los estados de los dominios circundantes. (Mayagoitia *et al.*, 1985).

Bajo este contexto, y dada la importancia de los materiales porosos (Figura 1), el objetivo de este artículo de revisión es proporcionar una visión integral sobre los avances en el estudio de estos sistemas. Con énfasis en los fenómenos de condensación capilar e histéresis de sorción en redes porosas, termodinámica química, simetría, modificaciones estructurales y, aplicaciones biológicas.

Figura 1. Perspectiva global de los materiales porosos



A lo largo del manuscrito se profundiza acerca de las interacciones entre poros, modelos termodinámicos, materiales como zeolitas y silicas, la importancia de la simetría y, perfiles biológicos. Creado en BioRender.com/c83v238

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda bibliográfica de la información científica relacionada con aspectos fisicoquímicos de superficies porosas a través de la base de datos Scopus. Se detectó un total de 60,829 documentos mediante el lenguaje de búsqueda “porous AND materials AND surfaces AND (properties OR characteristics OR model OR adsorption OR sorption OR capillary OR hysteresis OR intrusion OR thermodynamics)”. Respecto a los criterios de exclusión, se eliminaron capítulos de libro, ponencias, informes y trabajos de congreso. Se excluyeron artículos y revisiones redactados con un idioma diferente al inglés, y se eliminaron los elementos duplicados para evitar la repetición de la información. Únicamente se tomó en cuenta que la información procediera de revistas de química y ciencia de materiales. De esta manera el número de manuscritos fue de 3,142. Posteriormente, se realizó una revisión detallada de los artículos seleccionados para asegurar que los temas tratados fueran relevantes a la fisicoquímica de las superficies porosas.

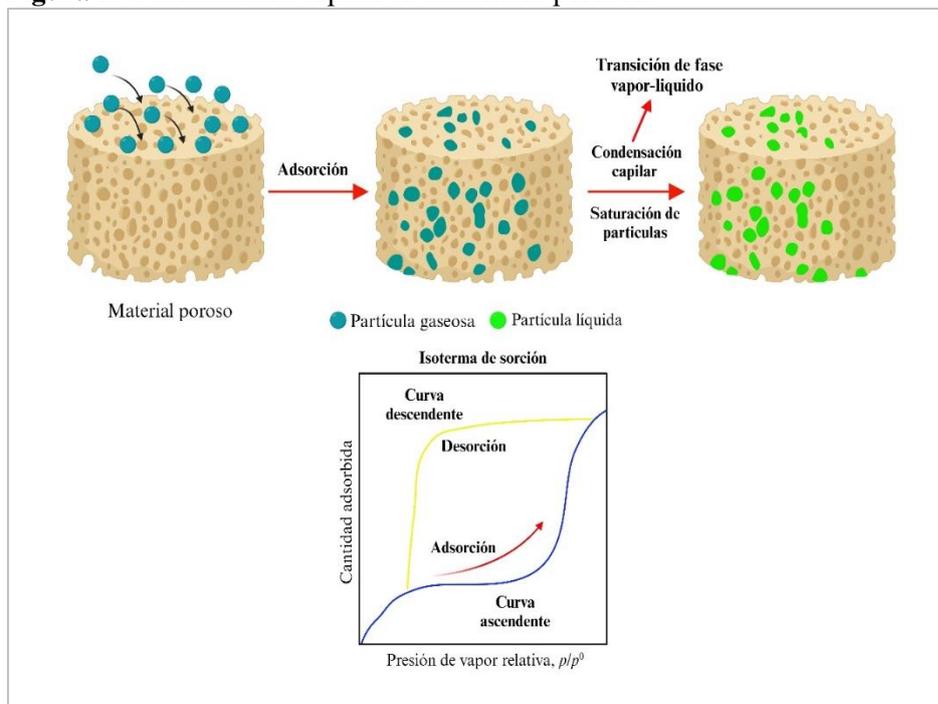
Se procedió a filtrar los documentos en primera instancia por título, descartando la información que no estaban relacionada directamente con el tema de esta revisión. A continuación, se aplicó un filtro basado en el contenido de los resúmenes, asegurando que los estudios seleccionados ofrecieran información específica sobre las propiedades y aplicaciones de los materiales porosos. Finalmente se llevó a cabo una evaluación exhaustiva del contenido de los artículos, verificando la eficacia de la investigación presentada en cada uno de ellos. Con esta revisión minuciosa se identificó estudios que ofrecían datos sólidos y relevantes para el tema en cuestión. Tras aplicar estos filtros y evaluaciones, se obtuvo un total de 44 artículos y revisiones que cumplen con los criterios establecidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condensación capilar e interacción entre redes de poros

Se han desarrollado modelos de red porosa con el fin de describir las interacciones cooperativas entre los meniscos en los poros, lo que permite calcular la curva ascendente (adsorción) y predecir cómo la red se llena de condensado capilar (Mayagoitia *et al.*, 1985). Esta cuestión resulta relevante ya que, con las curvas de adsorción y desorción (Figura 2), es posible determinar la distribución del tamaño del poro y los posibles errores inducidos debido al fenómeno de bloqueo (Morishige, 2021).

Figura 2. Condensación capilar en materiales porosos.



La adsorción ocurre mediante interacciones en redes porosas, donde se manifiesta la condensación capilar. Se presenta una isoterma de sorción que muestra cómo el material poroso adsorbe partículas gaseosas, mientras que en la desorción implica el vaciado de los huecos. Creado en BioRender.com/e54d949

Para el análisis de las interacciones dentro de redes porosas durante procesos de condensación capilar, Mayagoitia *et al.* (1985) describieron cómo las transiciones de fase de vapor a líquido pueden verse asistidas o amplificadas debido a la coalescencia de meniscos en los puntos de unión de los capilares. Los autores proponen un modelo de red porosa que explica cómo estos efectos cooperativos deben considerarse para obtener una descripción precisa del proceso de condensación ascendente. De este modo, determinaron que los procesos ascendentes pueden generar transiciones de fases asistidas entre vapor y líquido, a medida que la red porosa se llena. La histéresis en la desorción está directamente relacionada con el bloqueo de poros, esto resulta de transiciones obstaculizadas, donde el estado de un dominio depende de sus vecinos. En contraste, durante el proceso de adsorción, no se observan efectos de bloqueo de poro. Lo anterior podría sugerir que los poros se llenan sin las restricciones impuestas por los efectos de la red, que sí están presentes durante la desorción.

Es importante resaltar que los poros en materiales no actúan de forma aislada, ya que sus interacciones entre adsorbato y cavidad porosa pueden influir notablemente en los procesos de condensación y evaporación (Rojas *et al.*, 2001). La condensación capilar, que ocurre cuando el líquido llena pequeños poros, es un desarrollo complejo que depende de la forma y distribución de los poros, así como de la energía asociada a la tensión superficial (Morishige, 2021).

Mediante la teoría de Everett, se ha asumido que los dominios porosos eran independientes entre sí, prediciendo el comportamiento de la adsorción y desorción en poros individuales (Cimino *et al.*, 2013). Lo anterior se interpreta de tal forma que cada poro experimenta una transición irreversible de vapor a líquido (condensación) y de líquido a vapor (evaporación), generando histéresis cuando el comportamiento de los poros se suma a nivel de la red. Sin embargo, Rojas *et al.* (2001) critican esta independencia, proponiendo que es necesario tener en cuenta la interdependencia de los dominios porosos, lo cual, se configura de manera más adecuada con el modelo de sitio-enlace dual (DSBM). En lugar de tratar a los poros como iguales, el DSBM distingue entre sitios (cavidades) y enlaces (cuellos y ventanas), por lo que es útil para simular fenómenos capilares y procesos de adsorción que ocurren en medios complejos. El DSBM considera la distribución de tamaños de los poros y la conectividad entre ellos. Por consiguiente, las cavidades pueden tener diferentes tamaños y estar conectadas por enlaces que varían de un sitio a otro, influyendo directamente en la adsorción y desorción.



Así, con el implemento de DSBM, es posible correlacionar la condensación capilar con la interacción entre redes de poros. Rojas *et al.* (2002) extienden el concepto de interacción cooperativa entre meniscos durante la condensación capilar al modelar redes tridimensionales. Lo anterior favorece el análisis de cómo la conectividad y la correlación de tamaños en estas redes afectan los bucles de histéresis y los mecanismos de sorción. Los autores al emplear DSBM, determinan como las características estructurales afectan los procesos de adsorción y desorción de vapores, y revelan que la morfología de las redes porosas produce distintos tipos de bucles de histéresis. Además, los efectos cooperativos en la red pueden influir en la condensación y evaporación capilar.

Termodinámica química en los materiales porosos

La paradoja de Schomaker & Waser (1988) se basa en el siguiente postulado: en un sistema cerrado, una muestra líquida de éter se evapora parcialmente al romperse un bulbo de paredes delgadas. A pesar de que es un proceso irreversible, se esperaría que la variación en la energía libre de Gibbs fuera menor que cero. Lo que genera la siguiente pregunta: ¿Por qué la variación de la energía libre de Gibbs es igual a cero?

En materiales porosos, procesos como la adsorción de gases o vapores y su posterior desorción, pueden implicar cambios en la energía libre de Gibbs (Abdulsattar *et al.*, 2023). Estos procesos a menudo ocurren en condiciones de presión y temperatura constantes, lo que los hace comparables a la situación descrita en el problema de Schomaker & Waser (1988). Al igual que en ese ejemplo, cuando un gas se adsorbe en un material poroso, el sistema puede no estar en equilibrio inmediatamente, y los procesos de adsorción o desorción son irreversibles hasta alcanzar el equilibrio (Rojas *et al.*, 2002).

Kornhauser *et al.* (2010) presentan la solución de esta paradoja, sugiriendo un nuevo enfoque de tres variables que incluye el grado de reacción a través del modelo de Prigogine-Defay-Everrett (PDE). Demostrando así que la energía libre de Gibbs es negativa, confirmando la espontaneidad del proceso. Los autores destacan que al igual que en la transición de fase del éter de líquido a vapor, en los materiales porosos los procesos de adsorción y desorción generan un aumento de la entropía, como establece la segunda ley de la termodinámica. Estos procesos están gobernados por la afinidad fisicoquímica (A), la cual indica si un proceso es espontáneo ($A > 0$) o si el sistema ha alcanzado el equilibrio ($A = 0$).

Los conceptos son aplicables tanto a los procesos de transición de fase como a la dinámica de adsorción en materiales porosos en relación con la energía libre de Gibbs. Se concede una mejor comprensión de las propiedades de los poros y posibilita múltiples aplicaciones, por ejemplo; Shi *et al.* (2022) introducen una estructura porosa jerárquica biométrica como reactor termoquímico basándose a partir de la energía libre de Gibbs. Con el fin de mejorar la eficiencia de la conversión termoquímica solar que puede optimizar tanto el campo de radiación como de la temperatura.

Nanoporosidad en zeolitas

Las zeolitas constituyen a una familia de minerales que tienen una estructura formada por una red de poros y que se utilizan ampliamente en catálisis y adsorción (Blatov *et al.*, 2020). En la síntesis de estos materiales se fomenta en gran medida la reducción del tamaño a nanocristales, debido a las restricciones que presentan los cristales de zeolita convencionales, que suelen ser de tamaño micrométrico (Na & Somorjai, 2015). Los cristales de gran proporción pueden sufrir limitaciones de difusión, lo que ralentiza el transporte de masa hacia y desde los sitios catalíticos dentro de los microporos, aumentando la posibilidad de reacciones secundarias no deseadas (Na *et al.*, 2013; Na & Somorjai, 2015). Reducir el tamaño de los cristales a una escala nanométrica aumenta la accesibilidad de las moléculas a la superficie de la zeolita, lo que mejora la eficiencia catalítica y la adsorción de moléculas de diferentes tamaños (Na *et al.*, 2013).

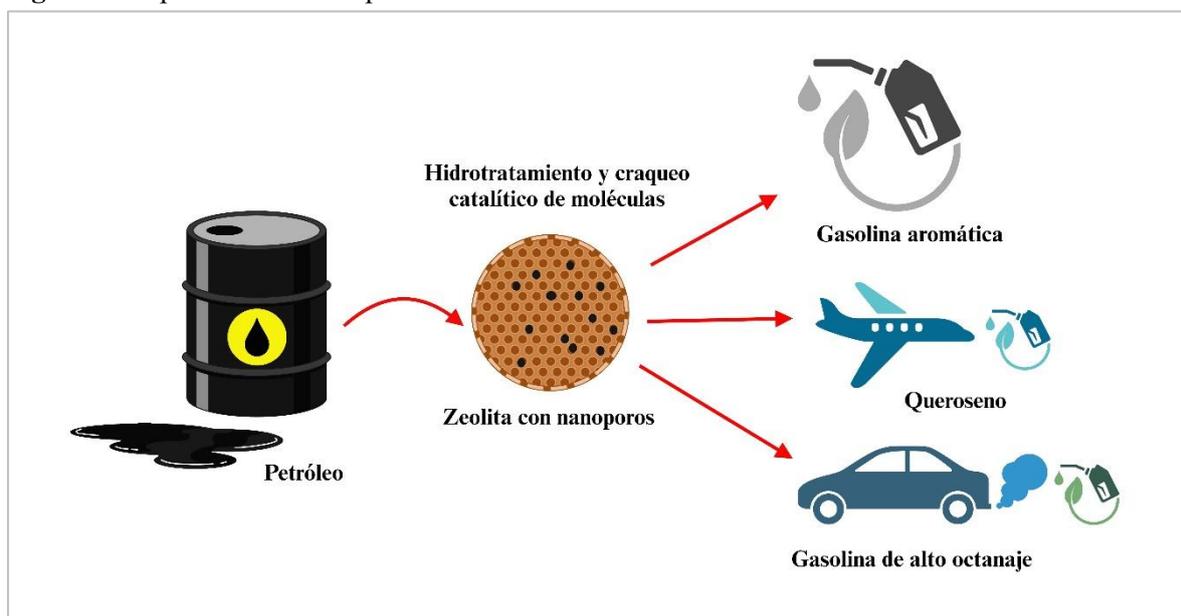
Particularmente, las zeolitas se destacan entre las diversas familias de materiales porosos debido a su capacidad para intercambiar cationes y, la nanoporosidad potencia esta característica. Hernández *et al.* (2016) analizaron la creación de nanoporos en la zeolita erionita natural mediante tratamientos de intercambio iónico con soluciones acuosas de Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} . Los resultados muestran que el intercambio con Na^+ es el más eficaz, favoreciendo la formación de poros emergentes y aumentando la capacidad de adsorción en las nanocavidades. Por otro lado, los tratamientos con Mg^{2+} y Ca^{2+} generan principalmente mesoporosidad. Durante este proceso, los cationes grandes que bloquean las entradas de los poros son reemplazados por protones o cationes más pequeños. Esto facilita el acceso a los canales de la erionita y provoca la ampliación de estos, transformando las estructuras ultramicroporosas en supermicroporosas.



Esto sugiere que los materiales nanoporosos resultantes son adecuados para aplicaciones industriales, como la purificación de gases o la catálisis, debido a su mayor eficiencia en la adsorción.

En presencia de zeolitas, los hidrocarburos se convierten en moléculas más pequeñas (craqueo) o se recombinan para formar compuestos ramificados (isomerización) (Benco *et al.*, 2003). Según Kimura *et al.* (2012) es posible el craqueo de materiales a través de catalizadores híbridos nanoporosos, lo que favorece convertir el aceite en productos alternativos al petróleo. Los nanoporos de estos catalizadores, son clave en el hidrotratamiento y craqueo catalítico de moléculas (Figura 3). En consecuencia, se obtienen productos como gasolina aromática, queroseno semi isoparafínico/olefínico y gasolina de alto octanaje, mejorando la eficiencia y selectividad en comparación con los catalizadores tradicionales. De esta manera los nanoporos posibilitan el control preciso de las reacciones, accediendo a la producción de combustibles de alta calidad. Bajo esta línea, de acuerdo con Na & Somorjai (2015), la isomerización de hidrocarburos también es clave para mejorar el índice de octano de la gasolina. Ya que se beneficia significativamente del uso de zeolitas jerárquicas con nanoporos. Se evita la desactivación rápida y la formación de productos de craqueo no deseados al mejorar la eficiencia de la difusión molecular.

Figura 3. Impacto de los nanoporos de zeolitas en el tratamiento catalítico de hidrocarburos.



Estos sistemas desempeñan un papel clave en procesos como el hidrotratamiento y el craqueo de moléculas, facilitando la producción de gasolina aromática, queroseno y combustibles de alto octanaje. Creado en BioRender.com/b43e116

Respecto a otras aplicaciones, se han utilizado las zeolitas nanoporosas para la síntesis de polímeros biodegradables que, gracias a su alta área superficial y volumen de poro, logra una súper hidrofobicidad,

adsorbe gas etileno y presenta actividad antibacteriana (Lee *et al.*, 2024). Esto convierte al material en una solución multifuncional ideal para el almacenamiento de alimentos (Lee *et al.*, 2024). También pueden poseer diversas funciones biomédicas, como agentes antidiarreicos, adyuvantes en tratamientos antitumorales y, de contraste para resonancias magnéticas (Derakhshankhah *et al.*, 2020). De igual modo se emplean en estudios de formación ósea, Alzheimer, hemodiálisis, administración de fármacos y en odontología (Derakhshankhah *et al.*, 2020).

Importancia de la simetría en los poros

Los poros pueden presentar diferentes tipos de simetría, dependiendo de su estructura geométrica. Cada simetría afecta las propiedades de transporte de fluidos, la intrusión o la adsorción de gases dentro del material (Kornhauser *et al.*, 2013). Así, los poros pueden adoptar formas regulares, como esféricas o planas, o formas irregulares, y pueden estar organizados en un patrón alineado o aleatorio (Guo & Zhou 2021).

Según Guo & Zhou (2021), los poros esféricos ofrecen la mayor superficie por unidad en comparación con otras formas. Métodos como las gotas de agua y aceite en tintas de emulsión, las burbujas de gas en tintas espumosas y, las microesferas, son opciones efectivas para generar este tipo de poros. Son ideales para aplicaciones que requieren bajo peso, aislamiento térmico y acústico. Por otra parte, los poros con simetría radial presentan una estructura que se repite uniformemente alrededor de un punto central; curiosamente, materiales como el bambú poseen esta cualidad, la cual influye en su capacidad de almacenamiento de fluidos y en sus atributos mecánicos (Yang *et al.*, 2023).

Kornhauser *et al.* (2013) mencionan que un poro tiene simetría axial cuando su forma se mantiene constante alrededor de un eje central. Esto es común en poros cilíndricos o con forma tubular, donde cualquier sección transversal perpendicular al eje es la misma. Sin embargo, cuando varía su sección transversal a lo largo de un eje, se generan efectos sobre la histéresis e inducen intrusión abrupta. Los autores al estudiar los efectos de la intrusión de mercurio en poros con esta característica sobre su simetría determinaron que; a medida que el ángulo de inclinación se modifica, cambia la presión necesaria para que el mercurio avance. En lugar de una penetración gradual y continua, el mercurio entra en los poros de forma abrupta. Esto ocurre porque el mercurio se acumula en ciertos puntos y luego avanza repentinamente cuando la presión alcanza un umbral específico.



También existe la simetría axial de pliegues N que corresponde a poros que tienen un eje de simetría n-ádico (Ekneligoda & Zimmerman, 2006). Lo anterior significa que su forma se repite en un número específico de pliegues o lados alrededor de un punto central (Ekneligoda & Zimmerman, 2006). Estos poros pueden modelarse utilizando funciones de mapeo, como las series de Schwarz–Christoffel, que permiten describir su impacto en el rendimiento elástico de materiales porosos (Ekneligoda & Zimmerman, 2006). Abuzeid *et al.* (2020) refieren que en otro tipo de simetrías, denominadas de rotación, se pueden obtener diferentes ordenes: a) la simetría C2 (orden 2) se vincula con una distribución que puede rotarse 180 ° alrededor de un punto y permanecer invariable. b) La simetría C3 (orden 3), que se caracteriza por formar una estructura que gira 120° alrededor de un punto central y mostrarse igual. Este tipo de simetría es común en estructuras hexagonales o en marcos donde las unidades básicas se agrupan en tríos. Las simetrías C2 y C3 están relacionadas con la geometría de los bloques de construcción usados en materia orgánica covalente, generando la captura de CO₂.

Materiales porosos en las ciencias biológicas

La fisicoquímica de superficies, especialmente en materiales porosos, está profundamente interconectada con las ciencias biológicas. Ambas disciplinas estudian fenómenos esenciales con enfoque molecular, biomédico y biotecnológico.

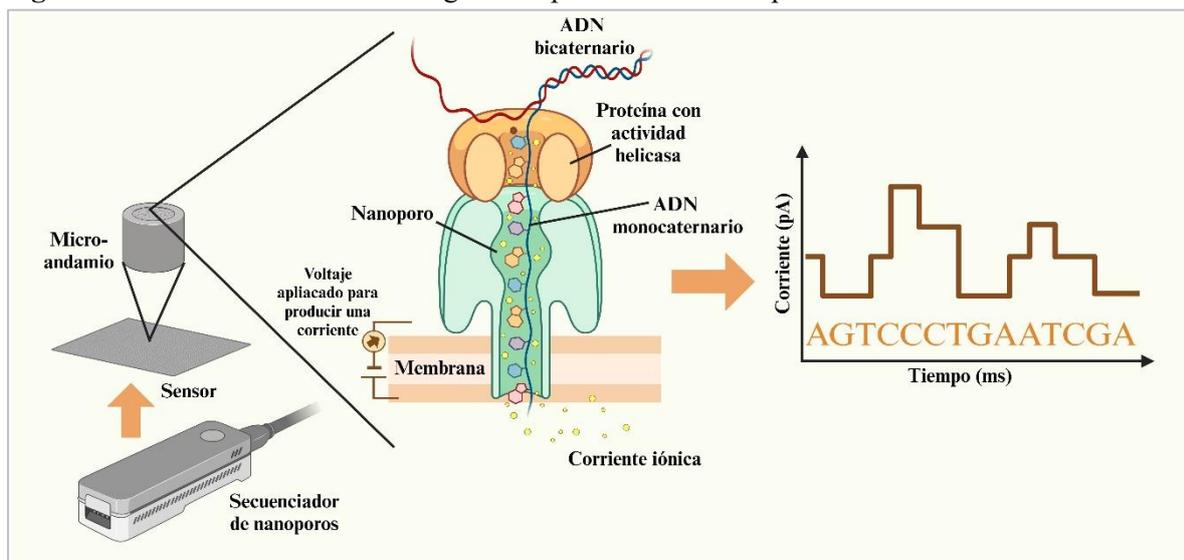
Por ejemplo, se han desarrollado metodologías para acoplar covalentemente macrociclos tetrapirrólicos (como las porfirinas) a las paredes de los poros de redes de óxidos metálicos (Quiroz-Segoviano *et al.*, 2014). Lo anterior con el objetivo de optimizar la emisión de fluorescencia de las bases libres de porfirina unidas a superficies de sílice funcionalizadas (Quiroz-Segoviano *et al.*, 2014). Las nanopartículas de silicio poroso ofrecen un enfoque prometedor en la terapia fotodinámica contra el cáncer debido a su biodegradabilidad y su capacidad para ser excitadas por luz infrarroja cercana de dos fotones (Secret *et al.*, 2014). Además, sus propiedades ópticas útiles para la obtención de imágenes las posicionan como una alternativa segura frente a nanopartículas tóxicas (Secret *et al.*, 2014).

Otra aplicación de estos materiales involucra la secuenciación del material genético (Figura 4). De acuerdo con la información recopilada por Wang *et al.* (2021), este procedimiento se basa en un nanoporo de proteína incrustado en una membrana, actuando como biosensor.



En una solución electrolítica, se induce una corriente iónica al aplicar un voltaje. Esto provoca que las moléculas de ADN o ARN sean atraídas hacia el lado positivo del nanoporo. La velocidad de translocación es controlada por una proteína motora con actividad helicasa. Durante este proceso, los cambios en la corriente iónica que ocurren cuando las moléculas atraviesan el nanoporo corresponden a la secuencia de nucleótidos. Decodifican en tiempo real mediante algoritmos computacionales, logrando secuenciar moléculas individuales.

Figura 4. Secuenciación de material genético por medio de nanoporos.



La corriente iónica inducida por un voltaje atrae moléculas de ADN hacia el nanoporo. La proteína motora con actividad helicasa regula la velocidad de translocación, y los cambios en la corriente se correlacionan con la secuencia de nucleótidos, permitiendo la secuenciación en tiempo real. Creado en BioRender.com/q36i114

Por otro lado, como tendencia emergente, los nano, micro y, mesoporos han atraído gran atención para la encapsulación y liberación controlada de sustancias, debido a sus características estructurales de poro ajustables (Su *et al.*, 2024). Proporcionan una vía potencial para mejorar la disolución de fármacos de baja solubilidad al influir en la superficie específica o en la cristalinidad (Ahuja & Pathak, 2009). Adicionalmente, es posible la encapsulación de proteínas, las cuales abarcan diferentes tamaños y puntos isoeléctricos (Tu *et al.*, 2016). Para ello es necesario el diseño de superficies que contengan poros con un diámetro >5 nm, alineados de manera paralela al eje de la partícula. Lo anterior facilita el transporte y la liberación de moléculas dentro y fuera del material (Tu *et al.*, 2016).

Paralelamente, los materiales porosos resultan ser relevantes en el campo de la neuroquímica. Han logrado la detección en tiempo real de neurotransmisores, esto debido a que los nanoporos puede unirse selectivamente a iones Cu^{2+} y moléculas como el L-glutamato, la dopamina y la noradrenalina (Zhang

et al., 2021). El proceso genera señales eléctricas específicas que visibilizan el monitoreo electrofisiológico (Zhang *et al.*, 2021). Incluso se ha demostrado que un nanoporo biológico puede mapear y cuantificar con precisión la agregación de péptido amiloide- β , ofreciendo perspectivas valiosas para el pronóstico y el tratamiento de Alzheimer (Subramanian *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

Los materiales porosos sobresalen por su versatilidad estructural y se consolidan como piezas clave en múltiples ámbitos industriales. La condensación capilar y las interacciones en redes porosas posibilitan una comprensión profunda de los procesos de adsorción y desorción. La investigación sobre la nanoporosidad en zeolitas abre nuevas puertas en la optimización de procesos catalíticos y de purificación. La simetría de los poros influye en el comportamiento de fluidos y gases dentro de ellos. Por otra parte, la termodinámica química proporciona un marco teórico esencial para resolver problemas fisicoquímicos en estos materiales. Sus aplicaciones biotecnológicas y biomédicas permiten enfoques eficientes para el tratamiento contra el cáncer, transporte de fármacos, secuenciación genética y estudios neuroquímicos. De esta manera, los materiales porosos representan una herramienta fundamental para desarrollar nuevas tecnologías.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdulsattar, M. A., Mahmood, T. H., Abed, H. H., & Abduljalil, H. M. (2023). Adsorption and desorption of acetone by TiO₂ clusters: Transition state theory and sensing analysis. *ChemPhysMater*, 2(4), 351-355.
- Abuzeid, H. R., EL-Mahdy, A. F., & Kuo, S. W. (2020). Hydrogen bonding induces dual porous types with microporous and mesoporous covalent organic frameworks based on bicarbazole units. *Microporous and Mesoporous Materials*, 300, 110151.
- Ahuja, G., & Pathak, K. (2009). Porous carriers for controlled/modulated drug delivery. *Indian journal of pharmaceutical sciences*, 71(6), 599.
- Ahumada, M., Jacques, E., Calderon, C., & Martínez-Gómez, F. (2019). Porosity in biomaterials: A key factor in the development of applied materials in biomedicine.
- Benco, L., Demuth, T., & Hutschka, F. (2003). Catalytic conversion of hydrocarbons over zeolites from first principles. *Computational materials science*, 27(1-2), 87-95.



- Bennett, T. D., Coudert, F. X., James, S. L., & Cooper, A. I. (2021). The changing state of porous materials. *Nature Materials*, 20(9), 1179-1187.
- Blatov, V. A., Blatova, O. A., Daeyaert, F., & Deem, M. W. (2020). Nanoporous materials with predicted zeolite topologies. *RSC advances*, 10(30), 17760-17767.
- Chen, Z., Mo, S., Lin, H., Wu, Z., Zhao, Y., Hua, X., & Zhao, P. (2023). Understanding porous materials with pair distribution functions. *Cell Reports Physical Science*, 4(12).
- Cimino, R., Cychosz, K. A., Thommes, M., & Neimark, A. V. (2013). Experimental and theoretical studies of scanning adsorption–desorption isotherms. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 437, 76-89.
- Day, G. S., Drake, H. F., Zhou, H. C., & Ryder, M. R. (2021). Evolution of porous materials from ancient remedies to modern frameworks. *Communications Chemistry*, 4(1), 114.
- Derakhshankhah, H., Jafari, S., Sarvari, S., Barzegari, E., Moakedi, F., Ghorbani, M., ... & Tayebi, L. (2020). Biomedical applications of zeolitic nanoparticles, with an emphasis on medical interventions. *International journal of nanomedicine*, 363-386.
- Ekneligoda, T. C., & Zimmerman, R. W. (2006). Compressibility of two-dimensional pores having n-fold axes of symmetry. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 462(2071), 1933-1947.
- Guo, Z., & Zhou, C. (2021). Recent advances in ink-based additive manufacturing for porous structures. *Additive Manufacturing*, 48, 102405.
- Hernández, M. A., Rojas, F., Portillo, R., Salgado, M. A., Rubio, E., & Ruíz, S. (2016). Creating nanoporosity in Na, Ca and Mg exchanged erionite zeolite. *International Journal of Nanotechnology*, 13(1-3), 28-43.
- Horikawa, T., Do, D. D., & Nicholson, D. (2011). Capillary condensation of adsorbates in porous materials. *Advances in colloid and interface science*, 169(1), 40-58.
- Hoseini, S. S., Seyedkanani, A., Najafí, G., Sasmito, A. P., & Akbarzadeh, A. (2023). Multiscale architected porous materials for renewable energy conversion and storage, *Energy Storage Mater.* 59 (2023) 102768.



- Kimura, T., Liu, C., Li, X., Maekawa, T., & Asaoka, S. (2012). Conversion of isoprenoid oil by catalytic cracking and hydrocracking over nanoporous hybrid catalysts. *BioMed Research International*, 2012(1), 637125.
- Kornhauser, I., Rojas, F., & Domínguez, A. (2010). Resolution of an Instructive Gibbs-Energy Problem from the Prigogine-Defay-Everett Framework of Chemical Thermodynamics. *Chem. Educator*, 15, 334-339.
- Kornhauser, I., Felipe, C., Esparza, J. M., Domínguez, A., & Rojas, F. (2013). Mercury intrusion effects modelled in pores with axial symmetry and attenuated cross section. *Adsorption Science & Technology*, 31(2-3), 249-261.
- Lee, J., Kong, T., Park, J., Han, S., Choi, H., Sun, J., ... & Park, J. J. (2024). Modified nanoporous zeolites on a biodegradable polymer film with excellent hydrophobicity, ethylene gas adsorption, and antibacterial activity through surface charge accumulation. *Chemical Engineering Journal*, 155236.
- Li, R., Wen, X., Zhao, Y., Fan, S., Wei, Q., & Lan, K. (2024). Metal-based mesoporous frameworks as high-performance platforms in energy storage and conversion. *Energy Reviews*, 100108.
- Lu, A. H., & Schüth, F. (2006). Nanocasting: a versatile strategy for creating nanostructured porous materials. *Advanced Materials*, 18(14), 1793-1805.
- Mangun, C. L., Daley, M. A., Braatz, R. D., & Economy, J. (1998). Effect of pore size on adsorption of hydrocarbons in phenolic-based activated carbon fibers. *Carbon*, 36(1-2), 123-129.
- Mayagoitia, V., Rojas, F., & Kornhauser, I. (1985). Pore network interactions in ascending processes relative to capillary condensation. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 81(12), 2931-2940.
- Morishige, K. (2021). Revisiting the nature of adsorption and desorption branches: temperature dependence of adsorption hysteresis in ordered mesoporous silica. *Acs Omega*, 6(24), 15964-15974.
- Mhemeed, A. H. (2018). A general overview on the adsorption. *Indian Journal of Natural Sciences*, 9(51), 16127-16131.



- Na, K., Choi, M., & Ryoo, R. (2013). Recent advances in the synthesis of hierarchically nanoporous zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*, 166, 3-19.
- Na, K., & Somorjai, G. A. (2015). Hierarchically nanoporous zeolites and their heterogeneous catalysis: current status and future perspectives. *Catalysis Letters*, 145, 193-213.
- Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., & Issaabadi, Z. (2019). Plant-mediated green synthesis of nanostructures: mechanisms, characterization, and applications. In *Interface science and technology* (Vol. 28, pp. 199-322). Elsevier.
- Quiroz-Segoviano, R. I., Serratos, I. N., Rojas-González, F., Tello-Solís, S. R., Sosa-Fonseca, R., Medina-Juárez, O., ... & García-Sánchez, M. A. (2014). On tuning the fluorescence emission of porphyrin free bases bonded to the pore walls of organo-modified silica. *Molecules*, 19(2), 2261-2285.
- Rojas, F., Kornhauser, I., Felipe, C., & Cordero, S. (2001). Everett's sorption hysteresis domain theory revisited from the point of view of the dual site-bond model of disordered media. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 167(1-2), 141-155.
- Rojas, F., Kornhauser, I., Felipe, C., Esparza, J. M., Cordero, S., Dominguez, A., & Riccardo, J. L. (2002). Capillary condensation in heterogeneous mesoporous networks consisting of variable connectivity and pore-size correlation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 4(11), 2346-2355.
- Schomaker, V., & Waser, J. (1988). An instructive Gibbs function problem. *Journal of Chemical Education*, 65(11), 968.
- Secret, E., Maynadier, M., Gallud, A., Chaix, A., Bouffard, E., Gary-Bobo, M., ... & Cunin, F. (2014). Two-photon excitation of porphyrin-functionalized porous silicon nanoparticles for photodynamic therapy. *Adv. Mater*, 26(45), 7643-7648.
- Shi, X., Xun, Y., Dong, Y., Wang, F., Zhang, X., & Cheng, Z. (2022). Analysis of biomimetic hierarchical porous structure regulating radiation field to improve solar thermochemical performance based on minimum Gibbs free energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(5), 2832-2845.



- Shinde, P. S., Suryawanshi, P. S., Patil, K. K., Belekar, V. M., Sankpal, S. A., Delekar, S. D., & Jadhav, S. A. (2021). A brief overview of recent progress in porous silica as catalyst supports. *Journal of Composites Science*, 5(3), 75.
- Sing, K. S. (2004). Characterization of porous materials: past, present and future. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 241(1-3), 3-7.
- Su, X., Li, B., Chen, S., Wang, X., Song, H., Shen, B., ... & Yue, P. (2024). Pore engineering of micro/mesoporous nanomaterials for encapsulation, controlled release and variegated applications of essential oils. *Journal of Controlled Release*, 367, 107-134.
- Subramanian, N., Watson, B., Li, C. Z., Moss, M., & Liu, C. (2023). Patterning amyloid- β aggregation under the effect of acetylcholinesterase using a biological nanopore-an in vitro study. *Sensors and actuators reports*, 6, 100170.
- Tu, J., Boyle, A. L., Friedrich, H., Bomans, P. H., Bussmann, J., Sommerdijk, N. A., ... & Kros, A. (2016). Mesoporous silica nanoparticles with large pores for the encapsulation and release of proteins. *ACS applied materials & interfaces*, 8(47), 32211-32219.
- Wang, Y., Zhao, Y., Bollas, A., Wang, Y., & Au, K. F. (2021). Nanopore sequencing technology, bioinformatics and applications. *Nature biotechnology*, 39(11), 1348-1365.
- Yang, X., Pang, X., Liu, X., Yang, S., & Li, X. (2023). Determining the pore structure and radial variability of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). *Wood Science and Technology*, 57(2), 345-357.
- Zhang, X., Dou, L., Zhang, M., Wang, Y., Jiang, X., Li, X., ... & Geng, J. (2021). Real-time sensing of neurotransmitters by functionalized nanopores embedded in a single live cell. *Molecular Biomedicine*, 2, 1-9.
- Zhu, T., Han, Y., Liu, S., Yuan, B., Liu, Y., & Ma, H. (2021). Porous materials confining single atoms for catalysis. *Frontiers in Chemistry*, 9, 717201.