

UN VISTAZO A LOS MATERIALES NANOCOMPUESTOS

A LOOK AT NANOCOMPOSITE MATERIALS

Yolanda Torres-Salcedo, Enrique González-Vergara, Teresa Zayas-Pérez, Guillermo Soriano-Moro*,
Brenda Leonor Sánchez-Gaytán*

Centro de Química, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 sur, Ciudad Universitaria, San Manuel, Puebla, 72570
jesus.soriano@correo.buap.mx; brendale.sanchez@correo.buap.mx

Recibido: 08-Julio-2025

Aceptado: 06-Agosto-2025

RESUMEN

Los materiales nanocompuestos son importantes en la sociedad actual pues exhiben propiedades mejoradas y versátiles respecto a sus constituyentes. Estos materiales combinan dos o más componentes en donde al menos uno de estos tiene la escala nanométrica en una o más de sus dimensiones y se encuentra disperso, por lo tanto, es conocido como relleno. La combinación resulta en características que no se encuentran en los componentes por separado y esto afecta algunas propiedades como lo son la resistencia mecánica, conductividad eléctrica, reactividad y estabilidad térmica, entre otras. Los nanocompuestos son clasificados en función de su matriz y son separados en tres grupos; cerámicos, metálicos, y poliméricos y al ser tan adaptables, sus aplicaciones impactan de forma significativa amplios sectores. A pesar de su gran potencial, estos materiales aún enfrentan desafíos que mejorar. Las proyecciones futuras apuntan al desarrollo de nuevos nanomateriales mediante nuevas técnicas de síntesis y estrategias de funcionalización para mejorar su biocompatibilidad y competencias con el fin minimizar impactos negativos. En el ámbito académico, en el centro de química del ICUAP-BUAP se trabaja en el desarrollo de nanocompuestos poliméricos con propiedades conductoras, antimicrobianas y no citotóxicas, abriendo nuevas posibilidades para la electrónica flexible y aplicaciones médicas.

Palabras Clave: nanocompuestos, nanorellenos, propiedades funcionales, estrategias de diseño

ABSTRACT

Nanocomposite materials are important in today's society because they exhibit enhanced and versatile properties compared to their constituents. These materials combine two or more components, at least one of which is at the nanoscale in one or more of its dimensions and is dispersed; therefore, they are known as fillers. The combination results in characteristics not found in the individual components, affecting some properties such as mechanical strength, conductivity, reactivity, and thermal stability, among others. Nanocomposites are classified based on their matrix and are separated into three groups: ceramic, metallic, and polymeric. Because they are highly adaptable, their applications significantly impact broad sectors. Despite their great potential, these materials still face challenges that need to be addressed. Future projections point to the

development of new nanomaterials through new synthesis techniques and functionalization strategies to improve their biocompatibility and minimize negative impacts. In the academic field, the ICUAP-BUAP Chemistry Center is working on the development of polymeric nanocomposites with conductive, antimicrobial, and non-cytotoxic properties, opening up new possibilities for flexible electronics and medical applications.

Keywords: Nanocomposites, nanofillers, functional properties, design strategies

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el progreso de la humanidad ha estado ligado a la creación y transformación de materiales con el fin de cubrir necesidades (Callister y Rethwisch, 2018). En este contexto, surgieron los materiales compuestos, los cuales resultan de la unión de dos o más componentes distintos, generando un nuevo material con propiedades fisicoquímicas mejoradas respecto a las de cada constituyente (Chinta, 2017) y a su vez exhiben una mejor relación costo beneficio (Ibraheem y Bandyopadhyay, 2017). Es posible decir que los materiales compuestos se utilizan prácticamente desde hace siglos, como por ejemplo el hormigón usado mayormente en construcción (Reduwan Billah, 2019) y que está constituido por cemento, agua, arena y grava, o el acero, usado en estructuras y compuesto principalmente de hierro y carbono (Smallman y Ngan, 2014) y que sustituye aplicaciones que requieren alta resistencia.

Además de los compuestos tradicionales y debido a la creciente popularidad de la nanotecnología, se han desarrollado nanocompuestos. El término "nanocompuesto" es relativamente nuevo pues se acuñó durante un periodo entre 1982-1983 por Roy, Komarneni y colegas (Yosri y col., 2024) pero es necesario definir un nanocompuesto y el requisito primordial para ser clasificado de esta manera es que al menos uno de sus componentes tenga al menos una dimensión en *tamaño nano*, es decir, en una escala de entre 1 y 100 nm (Iordache y col., 2016; Pirsá y col., 2022) donde la fase nanométrica está embebida en una matriz la cual puede ser de algún polímero, metal o un material cerámico (Reduwan Billah, 2019) esta fase también suele ser denominada "relleno".

Los nanocompuestos se han convertido en una de las opciones más relevantes en diversos sectores de alta tecnología y son considerados como materiales del siglo XXI por sus diversas prestaciones con posibilidades de diseño únicas y combinaciones de propiedades excepcionales (Abid y col., 2022) ya que aprovechan fenómenos fisicoquímicos exclusivos de la escala nanométrica. Esta característica les permite resultar en propiedades superiores a las de los rellenos convencionales, las cuales pueden ser aprovechadas en diferentes aplicaciones, por ejemplo, son utilizados como membranas, sensores, dispositivos de almacenamiento de energía, en la óptica, usos automotrices, retardantes de llama, entre otras muchas (Ates y col., 2020).

Los nanocompuestos pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos o una mezcla, esto usualmente propicia nuevas y mejores propiedades las cuales se denominan sinérgicas, pues su efecto es superior a la suma de los efectos individuales (Komarneni, 2005).

Si se habla de las propiedades de este tipo de compuestos, es posible resaltar sus propiedades químicas, ópticas, alta resistencia mecánica, alta conductividad eléctrica, reactividad redox, actividad catalítica y sus propiedades multifuncionales como una alta relación superficie-volumen para la carga de biomoléculas como enzimas (Nambiar y col., 2024; Omanović-Mikličanin y col., 2020).

En la mayoría de los casos, los nanocompuestos son obtenidos mediante la combinación de diferentes componentes a través de reacciones químicas o interacciones físicas (Komarneni, 2005), donde serán de vital importancia ya que determinan las estructuras y propiedades deseadas en el nanocompuesto (Lu y col., 2021; Weber y col., 2024).

2. RELLENOS NANOMÉTRICOS

Los rellenos o nanoestructuras empleados en los materiales nanocompuestos son seleccionados por contar con tres características que les otorgan ventajas. Primero, a escala nanométrica, estos rellenos exhiben propiedades distintas a las del mismo material en estado en masa, como sus características catalíticas, eléctricas, ópticas, etc. Segundo, su reducido tamaño implica la presencia de defectos pequeños ya que estos ejercen una influencia considerable sobre sus propiedades y su comportamiento funcional (Folorunso y col., 2024; Viswanathan y col., 2006). Finalmente, su gran relación superficie/volumen favorece una mayor interacción en la zona de unión entre la matriz y las nanoestructuras, lo que da lugar a un volumen considerable de material con propiedades diferenciadas respecto a la matriz en estado de granel (Schadler y col., 2007). Esto les confiere a los nanocompuestos un desempeño sobresaliente y versatilidad funcional que les otorga ventajas frente a otros materiales pues son capaces de mejorar múltiples propiedades simultáneamente y adaptarse a necesidades específicas con cargas de relleno más bajas (Guchait y col., 2022).

Existen varias maneras de clasificar los rellenos nanométricos, y estas pueden cambiar dependiendo del enfoque que se utilice. Sin embargo, una de las clasificaciones más comunes se basa en las dimensiones nanométricas que presentan, como se ilustra en la Figura 1. Aquellos que poseen solo una dimensión nanométrica incluyen a las nano plaquetas u hojas, dos dimensiones nanométricas engloban a las nano fibras o nano tubos y tres dimensiones nanométricas corresponden a las nano partículas (Sundarram y col., 2015).

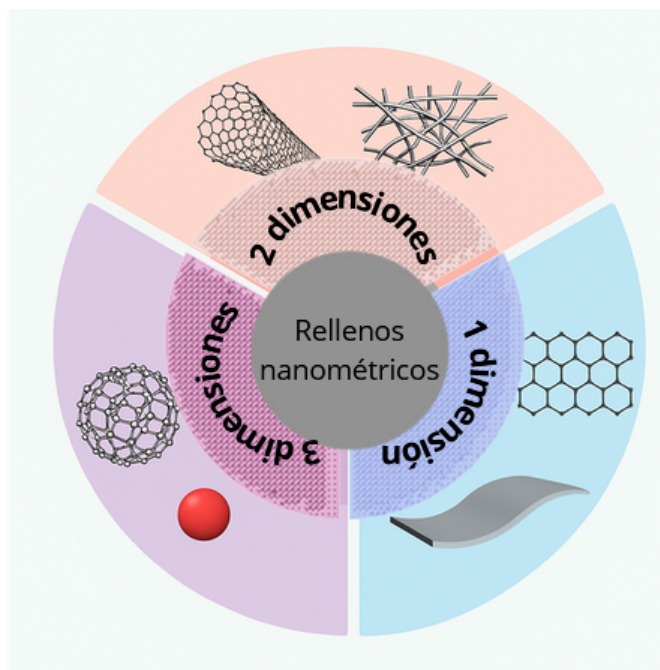


Figura 1. Clasificación de los nanorrellenos según sus dimensiones nanométricas

Una clasificación por considerar es aquella que divide los rellenos en orgánicos e inorgánicos. Los rellenos orgánicos son aquellos que provienen de fuentes naturales como plantas, animales y residuos (Jagadeesh y col., 2021). Así mismo, los inorgánicos derivan de fuentes meramente inorgánicas o de lo que tradicionalmente se considera orgánicas.

Una vez considerados estos criterios y debido a la variedad de clasificaciones, los nanorrellenos pueden organizarse en cuatro grupos representativos: materiales orgánicos, inorgánicos y nanoestructuras de carbono y arcillas (Yadav y col., 2024), aunque estas últimas dos, en algunos casos, también suelen estar clasificados dentro de los inorgánicos debido a que no contienen enlaces carbono-hidrógeno.

Los nano rellenos derivados del carbono como nanotubos, el grafeno, los fulerenos y el negro carbón “carbon black” sobresalen en el ámbito de los conductores y semiconductores debido a sus excelentes propiedades eléctricas y mecánicas, su amplia disponibilidad, peso ligero y sus bajos costos (Kuang y col., 2023), estas características los hacen prospectos ideales en aplicaciones energéticas y ambientales (Lyu y col., 2017).

En otra categorización están englobadas las nanoarcillas que son nanopartículas minerales que incluyen dentro de su estructura silicio y tienen una alta estabilidad térmica y resistencia química (Fernandes y col., 2016). Las nanoarcillas destacan pues son capaces de modificar la microestructura de la matriz mejorando las propiedades físicas del nanocompuesto (Depan y col., 2021). Son prometedoras ya que se obtienen fácilmente pues generalmente son encontradas de manera natural, son económicas y son fáciles de usar (Na y col., 2024). Algunos ejemplos incluyen a la montmorillonita, la saponita, la bentonita, la mica y la hectorita.

Las nanoestructuras inorgánicas tienen propiedades únicas tales como las mecánicas, magnéticas, eléctricas, catalíticas y ópticas (Basavegowda y Baek, 2021) e incluyen metales puros tales como oro, plata y platino, paladio, hierro y óxidos metálicos como CuO, ZnO, y TiO₂ (Sothornvit, 2019). En estas destacan las nanopartículas metálicas pues son nanoestructuras consideradas como modulables debido a que es fácil controlar la forma, tamaño, estructura, ensamblaje y propiedades ópticas (Thakur y col., 2021) y han ganado mucha atención gracias a sus propiedades ópticas, grandes energías de superficie, excitación plasmónica y confinamiento cuántico (M. Sharma, 2018). Otro ejemplo común son los puntos cuánticos “Quantum dots” y son nanocristales semiconductores de 1–10 nm que presentan fluorescencia cuya intensidad y color varía en función de su tamaño. Están compuestos por metales como Ag, Cd, Hg, Ln, P, Pb, Se, Te, Zn. Además de su alta fotoluminiscencia, se destacan por su resistencia al fotoblanqueo, es decir, la resistencia a la destrucción de las moléculas presentes responsables de su fluorescencia y su capacidad para emitir múltiples colores simultáneamente. Estas propiedades los hacen útiles en bioimagen, electrónica y fotónica (Kesrevani y Sharma, 2016).

Por último, están los rellenos nanométricos orgánicos, estos como ya se había mencionado, comprenden aquellos derivados de fuentes naturales, como plantas, animales o residuos agrícolas. Estos nanorrellenos se están investigando ampliamente por su biocompatibilidad, sostenibilidad y bajo impacto ambiental, tomando aplicaciones en el ámbito médico, particularmente en la cicatrización de heridas y en sistemas de liberación controlada de fármacos, algunos ejemplos son las fibras de hidroxipropilcelulosa y quitosano (Ahmed y Ali, 2020) o los nanocristales de celulosa (Ghosh y col., 2024).

3. TIPOS DE MATERIALES NANOCOMPUESTOS

Para comprender mejor la diversidad y funcionalidad de los materiales nanocompuestos, resulta útil explorar los distintos tipos existentes según la naturaleza de su matriz ya que esta actúa como fase continua y determina en gran medida las propiedades del material. (Malik y col., 2020). La Figura 2 ilustra las principales estructuras de nanocompuestos metálicos, cerámicos y poliméricos.

Como se ha mencionado, uno de los grupos más estudiados corresponde a los nanocompuestos con matriz cerámica (CMNC), los cuales los cuales pueden estructurarse de tres maneras, la primera es un nanorrelleno cerámica dentro de una matriz cerámica, también es posible un nanorelleno de carbono en una matriz cerámica, asimismo, toma en cuenta la inclusión de un metal como segundo componente en dicha matriz (Liu y Webster, 2016). Estos materiales fueron creados para resolver las limitaciones de los cerámicos tradicionales los cuales son propensos a fracturarse bajo cargas mecánicas o termomecánicas intensas debido a grietas originadas por diminutos defectos o rayones (Behera y col., 2020) por ello, los nanocompuestos cerámicos representan una alternativa pues la inclusión de nanorellenos refuerza la matriz y contribuye a bloquear la propagación de grietas haciéndolo más resistente. La matriz de estos materiales puede ser clasificada como óxidos cerámicos que incluyen al óxido de aluminio (Al₂O₃), dióxido de silicio (SiO₂), dióxido de circonio (ZrO₂) y como no óxidos cerámicos donde resaltan el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de silicio (Si₃N₄) (N. Sharma y col., 2022). Para la producción de diversos nanocompuestos cerámicos se emplean distintas técnicas de síntesis, como la reacción en estado sólido, el método Pechini

modificado, la molienda con bolas planetarias, el método sol-gel, la deposición electroforética, entre otras (Samantaray y col., 2024). Las aplicaciones de los nanocompuestos cerámicos son bastas que abarcan desde aplicaciones biomédicas (Garmendia y col., 2013), de almacenamiento de energía, aeroespaciales, automotrices, de construcción e infraestructura, entre muchas otras (Ahmad y col., 2014).

Otro tipo de nanocompuestos son aquellos con matriz metálica o MMNC, los cuales son clasificados como aquellos materiales o estructuras avanzadas en las cuales se combina un material ligero, es decir un metal o una aleación con un relleno nanométrico el cual, le brinda una mayor resistencia (Ghahremani y col., 2022). Desde el año 2000, el interés por emplear agentes de refuerzo a escala nanométrica en metales como Al, Mg, Ti, Ni y Cu ha crecido significativamente (Malaki, 2021) ya que ofrecen una combinación de propiedades atractivas como ductilidad, alta resistencia y rigidez, alta conductividad térmica y resistencia a la fluencia (Sarode y col., 2023). Los métodos de síntesis para esta clase de nanocompuestos son diversos e incluyen la fundición por agitación, deposición de material fundido desintegrado (DMD), fundición semisólida (SSC), metalurgia de polvos (PM), procesamiento por fricción y agitación (FSP) y la unión por rodillos acumulativos (Malaki y col., 2019).

Los materiales nanocompuestos con matriz metálica han atraído una gran atención en las industrias aeroespacial, automotriz, biomédica, electrónica y tecnológica debido a su gran potencial para aplicaciones generalizadas. Las inusuales y mejoradas propiedades mecánicas, físicas y químicas de estos, abren nuevas oportunidades para dispositivos y productos de alto rendimiento en diversas industrias (Cao y col., 2024).

Por último, pero no menos relevantes, se encuentran los nanocompuestos poliméricos que comprenden a aquellos compuestos que contienen típicamente, aunque no siempre, estructuras nanométricas inorgánicas dispersas en diferentes matrices poliméricas orgánicas con el objetivo de mejorar o modular sus propiedades (Khan y col., 2022). Estos materiales ofrecen una alternativa innovadora para reemplazar los polímeros convencionales ya que presentan propiedades mecánicas mejoradas, conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la llama, capacidad de autocuración y alta resistencia a la corrosión en comparación del polímero original (Tran y col., 2025).

Existen dos métodos principales de síntesis. En el método ex- situ, los rellenos se encapsulan físicamente dentro de la estructura polimérica, proceso que proporciona estabilidad a la fase nanométrica, lo que reduce su tendencia a agregarse ((Hussain y Thomas, 2021) y la metodología in-situ que utiliza un precursor del relleno nanométrico en un solvente inerte no reactivo junto con monómeros. Los precursores experimentan ciertas reacciones que inician la formación de la nanopartícula antes o durante el proceso de polimerización (Adnan y col., 2018).

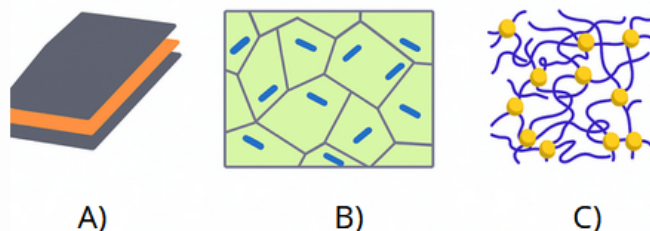


Figura 2. Representación de distintos tipos de nanocompuestos: A) metálico reforzado con láminas, B) cerámico y C) polimérico.

Este tipo de materiales son los que cuentan con mayor variedad de aplicaciones en el campo *nano* e incluyen distintos campos, como la producción de equipos médicos, tratamientos contra el cáncer, materiales para prótesis, dispositivos militares y electromecánicos, así como en la industria automotriz, el embalaje, la generación de energía, la seguridad y el transporte. También se utilizan en el blindaje electromagnético, sistemas de defensa, sensores, catálisis y en la industria de la información, entre otros sectores (Gobena y Woldeyannes, 2024).

Frente al vasto panorama de aplicaciones, los nanocompuestos poliméricos sobresalen como una de las áreas de alto interés en la investigación, en particular, investigadores adscritos a los cuerpos académicos de Investigación experimental- computacional de nuevos materiales y sistemas biomoleculares y química ambiental pertenecientes al ICUAP-BUAP, han reunido esfuerzos en desarrollar materiales nanocompuestos derivados de acrilamida rellenos de nanopartículas metálicas utilizando el método de fotopolimerización y síntesis in situ, en donde las materias primas se mezclan en solución y se exponen a luz ultravioleta dando como resultado materiales nanocompuestos que se forman de forma simultánea. Las aplicaciones de los materiales obtenidos se proyectan en áreas como la electrónica flexible y médicas, pues, ha sido posible observar que presentan una respuesta a la corriente eléctrica y que reaccionan a estímulos externos como la flexión y elongación cambiando su resistencia, así mismo, se ha podido verificar que son citocompatibles y presentan actividad antimicrobiana. En la Figura 3 se presentan algunos hidrogeles rellenos de nanopartículas de oro con distintas concentraciones de estas obtenidos durante el trabajo experimental dentro de los laboratorios de la institución.

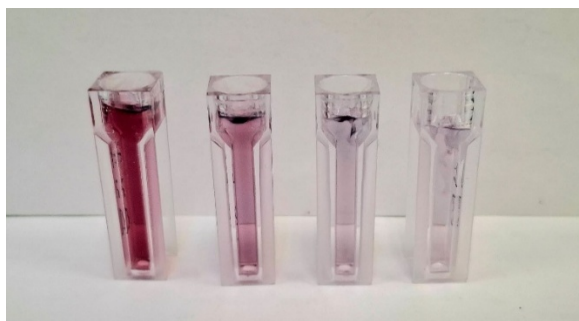


Figura 3. Hidrogeles rellenos de oro obtenidos mediante técnicas desarrolladas en la BUAP

4. RETOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de que estos materiales están en constante desarrollo por sus características y aplicaciones, también enfrentan algunos desafíos. Uno de los retos a superar es la mala dispersión de nanopartículas ya que la agregación de nanopartículas en la matriz limita su efectividad, por lo tanto, se requieren técnicas de funcionalización para mejorar la compatibilidad con la fase nanométrica (Tariq I., 2020), es crucial es mejorar su estabilidad coloidal y tener en cuenta su toxicidad con el fin de reducirla para que sea útil en aplicaciones biomédicas (Shi y col., 2025). También se puede considerar que la fabricación de algunos nanocompuestos a gran escala sigue siendo costosa y compleja por lo tanto los métodos de síntesis actuales aún deben optimizarse para su escalabilidad y viabilidad económica (Samantaray y col., 2024)

Un desafío que vale la pena mencionar es el que surge en la aplicación de las membranas nanocompuestas ya que en ellas se suele dar el fenómeno de lixiviación en donde los nanorrellenos se desprenden afectando la durabilidad del material y generando riesgos tóxicos para el medio ambiente y la salud. También enfrentan el ensuciamiento de la superficie, que disminuye la permeabilidad y eficiencia (Omar y col., 2024).

Igualmente es importante superar la mala dispersión de nanopartículas ya que la agregación de nanopartículas en la matriz limita su efectividad, por lo tanto, se requieren técnicas de funcionalización para mejorar la compatibilidad con la fase nanométrica (Tariq y col., 2020), es crucial es mejorar su estabilidad coloidal y tener en cuenta su toxicidad con el fin de reducirla para que sea útil en aplicaciones biomédicas (Shi y col., 2025). También se puede considerar que la fabricación de algunos nanocompuestos a gran escala sigue siendo costosa y compleja por lo tanto los métodos de síntesis actuales aún deben optimizarse para su escalabilidad y viabilidad económica (Samantaray y col., 2024)

Es necesario proponer perspectivas futuras que estén dirigidas hacia la funcionalización de nanopartículas con el fin de mejorar su compatibilidad, así mismo, es importante plantear nuevas técnicas de síntesis orientadas a la investigación para seguir innovando en el área de materiales para lograr ser capaces de desarrollar materiales compuestos que presenten alto potencial para resolver menesteres emergentes en distintas aplicaciones.

5. CONCLUSIONES

Los materiales nanocompuestos son un área de investigación prometedora debido a las oportunidades de innovación en diferentes aplicaciones e industrias. Las propiedades consideradas sinérgicas y únicas presentes en estos materiales comparadas con el material en bloque tradicional, son la razón por la cual se proponen de manera entusiasta como un medio prometedor para solucionar y satisfacer menesteres emergentes que van en aumento en algunas áreas. A medida que se vayan superando los retos relacionados con su producción e impacto ambiental, es probable que sean consideradas cada vez más en diversas, y diferentes industrias, impulsando avances tecnológicos y científicos revolucionando procesos y competencias. Por ello es relevante mencionar los esfuerzos que se han realizado en diversas instituciones nacionales incluyendo al Centro de Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla pues dedica esfuerzos a la investigación, síntesis, caracterización y aplicaciones posibles de estos materiales, que contribuye

al conocimiento del área consolidando a la BUAP como un actor activo en el panorama científico internacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado a través del proyecto VIEP-2025 (ID 00364), así como a la SECIHTI por la beca de maestría otorgada a Y.T.-S.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses al elaborar y publicar este artículo de difusión.

REFERENCIAS

Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., Haider, J., Khan, M., Khan, Q., y Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 300, 102597, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>

Adnan, M. M., Dalod, A. R. M., Balci, M. H., Glaum, J., y Einarsrud, M. A. (2018). In situ synthesis of hybrid inorganic-polymer nanocomposites. *Polymers* 10(10), 1129, <https://doi.org/10.3390/polym10101129>

Ahmad, I., Yazdani, B., y Zhu, Y. (2014). Recent advances on carbon nanotubes and graphene reinforced ceramics nanocomposites. *Nanomaterials* 5(1), 90–114, <https://doi.org/10.3390/nano5010090>

Ahmed, S., y Ali, W. (2020). *Advanced Structured Materials Green Nanomaterials Processing, Properties, and Applications*. Esslingen, Alemania. Springer.

Ates, B., Koytepe, S., Ulu, A., Gurses, C., y Thakur, V. K. (2020). Chemistry, structures, and advanced applications of nanocomposites from biorenewable resources. *Chemical Reviews*. 120(17), 9304–9362 <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00553>

Basavegowda, N., y Baek, K. H. (2021). Advances in functional biopolymer-based nanocomposites for active food packaging applications. *Polymers*. 13(23), 1498, <https://doi.org/10.3390/polym13234198>

Behera, A., Swain, B., y Sahoo, D. K. (2020). *Fiber-Reinforced Nanocomposites: Fundamentals and Applications*. Amsterdam, Países Bajos, Elsevier.

Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering an Introduction*. Hoboken, NJ, Estados Unidos de America, Wiley.

Cao, C., Killips, A., y Li, X. (2024). Advances in the Science and Engineering of Metal Matrix Nanocomposites: A Review, *Advanced Engineering Materials*. 26(20), 2400217, <https://doi.org/10.1002/adem.202400217>

Chinta, J. P. (2017). Coinage metal nanoparticles based colorimetric assays for natural amino acids: A review of recent developments. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. 248(9), 733–752, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.028>

Depan, D., Chirdon, y Khattab, A. (2021). Morphological and chemical analysis of low-density polyethylene crystallized on carbon and clay nanofillers. *Polymers*, 13(10)1558, <https://doi.org/10.3390/polym13101558>

Folorunso, O., Hamam, Y., Sadiku, R., y Kupolati, W. (2024). Effects of Defects on the Properties of Polymer Nanocomposites: A Brief Review. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 34(7), 5667–5690 <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03179-0>

Garmendia, N., Olalde, B., y Obieta, I. (2013). *Ceramic Nanocomposites*. Cambridge, Reino Unido. Elsevier.

Ghahremani, A., Abdullah, A., y Fallahi Arezoodar, A. (2022). Wear behavior of metal matrix nanocomposites. *Ceramics International*. 48(24), 35947–35965, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.273>

Ghosh, T., Roy, S., Khan, A., Mondal, K., Ezati, P., y Rhim, J. W. (2024). Agricultural waste-derived cellulose nanocrystals for sustainable active food packaging applications. *Food Hydrocolloids*. 154(9), 110141 <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110141>

Gobena, S. T., y Woldeyannes, A. D. (2024). A review of synthesis methods, and characterization techniques of polymer nanocomposites for diverse applications. *Discover Materials*. 4(52), <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00119-0>

Guchait, A., Saxena, A., Chattopadhyay, S., y Mondal, T. (2022). Influence of Nanofillers on Adhesion Properties of Polymeric Composites. En *ACS Omega*. 7(5), 3844–3859, <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05448>

Hussain, C. M., y Thomas, S. (2021). *Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology*. Cham, Suiza. Springer

Ibraheem, S., y Bandyopadhyay, S. (2017). *Hybrid Polymer Composite Materials: Structure and Chemistry* Duxford, Reino Unido. Elsevier.

Iordache, F., Gheorghe, I., Lazar, V., Curutiu, C., Ditu, L. M., Grumezescu, A. M., y Holban, A. M. (2016). *Food Preservation*. San Diego, CA, Estados Unidos de América. Elsevier.

Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Mavinkere Rangappa, S., & Siengchin, S. (2021). Influence of nanofillers on biodegradable composites: A comprehensive review. *Polymer Composites*. 42(11), 5691–5711, <https://doi.org/10.1002/pc.26291>

Kesrevani, R. K., y Sharma, A. K. (2016). *Nanoarchitectonics for Smart Delivery and Drug Targeting*. Oxford, Reino Unido. Elsevier.

Khan, I., Khan, I., Saeed, K., Ali, N., Zada, N., Khan, A., Ali, F., Bilal, M., y Akhter, M. S. (2022). *Smart Polymer Nanocomposites: Design, Synthesis, Functionalization, Properties, and Applications*. Amsterdam, Países Bajos. Elsevier.

Komarneni, S. (2005). *Chemical Processing of Ceramics*. Boca Ratón, Florida Estados Unidos de América. CRC Press.

Kuang, T., Zhang, M., Chen, F., Fei, Y., Yang, J., Zhong, M., Wu, B., y Liu, T. (2023). Creating poly(lactic acid)/carbon nanotubes/carbon black nanocomposites with high electrical conductivity and good mechanical properties by constructing a segregated double network with a low content of hybrid nanofiller. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 6(1), 48, <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00622-z>

Liu, W., & Webster, T. J. (2016). *Nanocomposites for Musculoskeletal Tissue Regeneration*. Duxford, Reino Unido. Elsevier.

Lu, X., Deng, W., Wei, J., Zhu, Y., Ren, P., Wan, Y., Yan, F., Jin, L., Zhang, L., & Cheng, Z. Y. (2021). Filler size effects on the microstructure and properties of polymer-ceramic nanocomposites using a semicrystalline matrix. *Journal of Materials Science*, 56(104844), 19983–19995, <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06555-0>

Lyu, H., Gao, B., He, F., Ding, C., Tang, J., & Crittenden, J. C. (2017). Ball-Milled Carbon Nanomaterials for Energy and Environmental Applications. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 5(11), 9568–9585, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02170>

Malaki, M. (2021). *Encyclopedia of Materials: Composites*. Dublin, Irlanda. Elsevier.

Malaki, M., Xu, W., Kasar, A. K., Menezes, P. L., Dieringa, H., Varma, R. S., y Gupta, M. (2019). Advanced metal matrix nanocomposites. *Metals*, 9(3), 330, <https://doi.org/10.3390/met9030330>

Malik, R., Tomer, V. K., & Chaudhary, V. (2020). *Metal Oxide Nanocomposites: Synthesis and Applications*. Beverly, Massachusetts, Estados Unidos de America. Wiley.

Na, C., Kwac, L. K., Kim, H. G., y Chang, J. H. (2024). Effect of organoclay on the physical properties of colorless and transparent copoly(amide imide) nanocomposites. *RSC Advances*, 14(13), 9062–9071, <https://doi.org/10.1039/d3ra08605d>

Nambiar, R. B., Perumal, A. B., y Sadiku, E. R. (2024). Advances in Nanocomposites: Preparation, Characterization, Properties, and Applications. *Molecules*, 29(24), 5924, <https://doi.org/10.3390/molecules29245924>

Omanović-Miklićanin, E., Badnjević, A., Kazlagić, A., y Hajlovac, M. (2020). Nanocomposites: a brief review. *Health and Technology*, 10(6), 51–59, <https://doi.org/10.1007/s12553-019-00380-x>

Omar, N. M. A., Othman, M. H. D., Tai, Z. S., Rabuni, M. F., Amhamed, A. O. A., Puteh, M. H., Jaafar, J., Rahman, M. A., y Kurniawan, T. A. (2024). Overcoming challenges in water purification by nanocomposite ceramic membranes: A review of limitations and technical solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 57(1), 104613, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104613>

Pirsa, S., Sani, I. K., y Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*. 31(3), 100789, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100789>

Reduwan Billah, S. M. (2019). *Functional Polymers*, Cham, Suiza. Springer.

Samantaray, S., Mallick, P., Hung, I. M., Moniruzzaman, M., Satpathy, S. K., y Mohanty, D. (2024). Ceramic-ceramic nanocomposite materials for energy storage applications: A review. *Journal of Energy Storage*. 99(A), 113330, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113330>

Sarode, P. U., Raul, J. G., Gaikwad, A. S., y Gawande, S. (2023). Metal Matrix Nanocomposites: A Brief Overview. *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*, 13(2), 24-42, <https://doi.org/10.2174/2210681213666230301152349>

Schadler, L. S., Brinson, L. C., y Sawyer, W. G. (2007). Polymer nanocomposites: A small part of the story. *JOM*. 59(5), 53–60, <https://doi.org/10.1007/s11837-007-0040-5>

Sharma, M. (2018). Applications of Targeted Nano Drugs and Delivery Systems: Nanoscience and Nanotechnology in Drug Delivery. Amsterdam, Países bajos. Elsevier.

Sharma, N., Saxena, T., Alam, S. N., Ray, B. C., Biswas, K., y Jha, S. K. (2022). Ceramic-based nanocomposites: A perspective from carbonaceous nanofillers. *Materials Today Communications*. 31(6), 103764, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103764>

Shi, K., Nokhodchi, A., y Ghafourian, T. (2025). Magnetic microscale polymeric nanocomposites in drug delivery: advances and challenges. *Drug Discovery Today*. 30(1), 104276, <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2024.104276>

Smallman, R. E., y Ngan, A. H. W. (2014). Modern Physical Metallurgy. Oxford, Reino Unido. Elsevier.

Sothornvit, R. (2019). Nanostructured materials for food packaging systems: new functional properties. *Current Opinion in Food Science*. 25(2), 82–87, <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.03.001>

Sundarram, S., Kim, Y. H., y Li, W. (2015). En Manufacturing of Nanocomposites with Engineering Plastics. Cambridge, Reino Unido. Elsevier.

Tariq, A., Rehan, Z. A., Akram, S., Rashid, A., y Nawab, Y. (2020). Nanocomposite Membranes for Water and Gas Separation. Amsterdam, Países Bajos. Elsevier.

Thakur, M., Sharma, A., Chandel, M., y Pathania, D. (2021). Green Functionalized Nanomaterials for Environmental Applications. Amsterdam, Países Bajos. Elsevier.

Tran, L. C., Su, X., Nguyen, H., La, L. B. T., Adu, P., Jia, Q., Lee, I., Kuan, H.-C., Liu, X., y Ma, J. (2025). Advancing polymer nanocomposites through mechanochemical approaches. *Advanced Nanocomposites*. 2(1), 86–107, <https://doi.org/10.1016/j.adna.2025.03.002>

Viswanathan, V., Laha, T., Balani, K., Agarwal, A., y Seal, S. (2006). Challenges and advances in nanocomposite processing techniques. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 54(5), 121–285, <https://doi.org/10.1016/j.mser.2006.11.002>

Weber, F., Dötschel, V., Steinmann, P., Pfaller, S., y Ries, M. (2024). Evaluating the impact of filler size and filler content on the stiffness, strength, and toughness of polymer nanocomposites using coarse-grained molecular dynamics. *Engineering Fracture Mechanics*. 307(8), 110270, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110270>

Yadav, V., Pal, D., y Poonia, A. K. (2024). Nanofillers as a potential key for shaping the future of the industries. *Hybrid Advances*. 7(12), 100340, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100340>

Yosri, N., Khalifa, S. A. M., Attia, N. F., Du, M., Yin, L., Abolibda, T. Z., Zhai, K., Guo, Z., y El-Seedi, H. R. (2024). Advancing sustainability in the green engineering of nanocomposites based on marine-derived polymers and their applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 274(1), 133249, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133249>