

Nanoquímica, perspectivas educativas y propuestas para su enseñanza

Nanochemistry, educational perspectives and teaching proposals

Jorge Meinguer Ledesma¹

¹ Universidad Nacional Autónoma de México, México (jormeinguer@yahoo.com.mx)

Cómo citar este artículo:

Meinguer Ledesma, J. (2025). Nanoquímica, perspectivas educativas y propuestas para su enseñanza. *Educación y ciencia*, 14(63), 189-208.

Recibido: 06 de octubre de 2024 | Aceptado: 10 de abril de 2025 | Publicado: 13 de junio de 2025

Resumen

La nanoquímica es una subdisciplina que utiliza teorías, modelos y aproximaciones provenientes de la química en la síntesis de productos y materiales que pueden situarse en la escala nanométrica. La importancia de esta área de conocimientos, se debe a las valiosas aportaciones que ha generado en el ámbito tecnológico, industrial y ambiental. En este trabajo, se busca contribuir a la discusión sobre la pertinencia de incorporar contenidos relacionados con esta subdisciplina en las asignaturas de química que se imparten en el nivel medio y superior, así como proponer una serie de elementos teóricos y actividades prácticas que favorezcan su tratamiento educativo.

Palabras clave: nanoquímica; enseñanza de la química; nanomateriales; currículo de química; educación en nanotecnología

Abstract

Nanochemistry is a subdiscipline that applies chemical theories, models, and methodologies to synthesize products and materials on a nanometric scale. This field has gained significance due to its valuable contributions to technology, industry, and environmental sectors. This work aims to contribute to the discussion on the importance of integrating nanochemistry-related content into chemistry courses at both secondary and higher education levels. It also proposes theoretical elements and practical activities to enhance its educational treatment.

Palabras clave: nanochemistry; chemistry teaching; nanomaterials; chemistry curriculum; nanotechnology education

Introducción

Relevancia disciplinar y educativa de la nanoquímica

Las nanociencias son un campo de conocimientos emergente que tiene como objetivo estudiar, obtener y caracterizar objetos y materiales que tienen su origen en la escala nanométrica. Siendo de su mayor interés, aquellos que poseen dimensiones entre 1 y 100 nanómetros. Un nanómetro (nm) es la milmillonésima parte de un metro (1×10^{-9} m), es decir, una unidad de medida mil veces menor que una micra (1×10^{-6} m). Lo que hace interesante y peculiar al campo de la investigación nano, es que las entidades que se sitúan en esta escala de medida, revisten propiedades únicas e inusitadas por efectos de superficie y la aparición de fenómenos cuánticos (Serena, Giraldo, Takeuchi & Tutor-Sánchez, 2014). Estas propiedades están siendo utilizadas para mejorar materiales ya existentes o para diseñar nuevas aplicaciones tecnológicas tanto en el ámbito científico como industrial. De hecho, la nanotecnología es el área de investigación encargada de buscar aplicaciones prácticas a los conocimientos y productos que generan las nanociencias (Takeuchi, 2011).

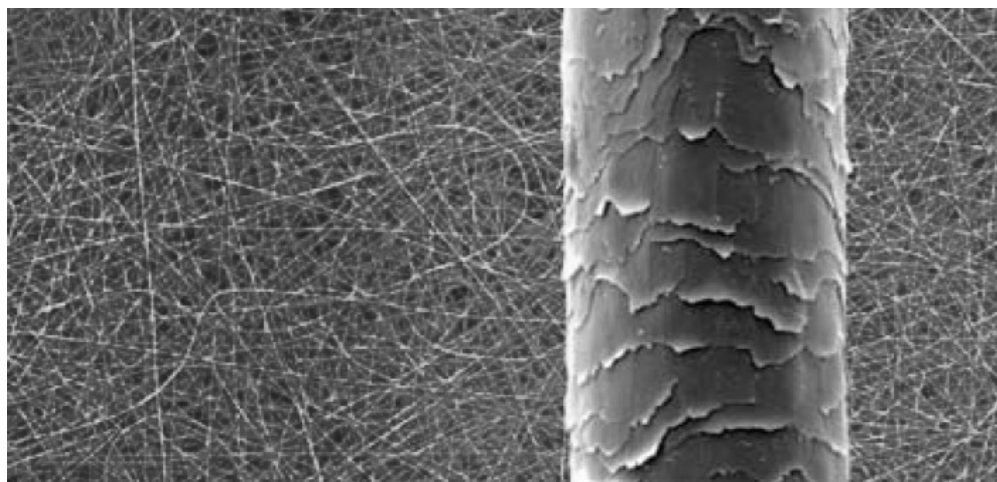
La nanoquímica forma parte de las nanociencias y hace uso de métodos, modelos, herramientas y aproximaciones provenientes de la química en la obtención de nuevos materiales y productos que puedan situarse en la escala nanométrica (Meinguer, 2021). Se fundamenta en métodos de síntesis ascendentes agrupados en un enfoque metodológico denominado bottom-up (de abajo hacia arriba), en el que los procesos de reconocimiento, autoensamblaje y crecimiento molecular juegan un papel relevante (Aguayo-González, Zarzuela & Lama-Ruiz, 2011). Al igual que otras nanociencias, la nanoquímica posee una visión multi e interdisciplinar, ya que fusiona conocimiento teóricos y prácticos provenientes de las cinco ramas representativas de la química, entre las que se encuentran, la química orgánica, inorgánica, analítica, teórica-computacional y la fisicoquímica (Atkins, 2013). Se auxilia también, de preceptos y avances provenientes de otras áreas de conocimiento como la física, la biología, la medicina, la ciencia de materiales entre otras.

La nanoquímica es un área de conocimientos relevante porque además de generar innovaciones que repercuten en los métodos de síntesis de sustancias y materiales, los productos que está creando esta subdisciplina poseen una amplia gama de aplicaciones en el ramo de la catálisis, la obtención de fármacos de mayor especificidad, la producción de dispositivos ópticos, celdas fotovoltaicas, semiconductores, composites y polímeros biodegradables (Ozin & Arsenault, 2015). Entre las líneas de investigación destacadas de la nanoquímica se puede mencionar, el estudio y la aplicación de nanomateriales basados en el elemento carbono como los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafeno; el diseño de nuevas membranas a base de capas nanoporosas que mejoran sus propiedades de flexibilidad, difusión y transporte; la fabricación de nanofibras con aplicaciones en la industria de los textiles, el refuerzo de materiales poliméricos y la fabricación dispositivos que hacen aportaciones en materia de sostenibilidad como es el caso de los paneles solares y el desarrollo de nuevas fuentes de energía. En consecuencia, el interés que despierta la nanoquímica en particular y las nanociencias en general, reside en que sus productos están

dotando de un valor agregado a la producción tecnológica, al procurar que sus avances sean más eficientes y tengan un menor impacto ambiental (Bauer, 2021).

Figura 1

Contrastación del tamaño de un cabello humano (frente) con nanofibras presentes en una membrana de electrohilado (fondo). Imagen obtenida por microscopia electrónica



Nota. Tomada de Caracciolo, Cortez, Buffa, Montini y Cuadrado (2014).

En el contexto escolar, la nanoquímica es una temática pertinente de incorporar y abordar en la educación química por varias razones. La primera es que, al ser un campo de conocimientos relativamente reciente, su comunicación en las aulas y laboratorios posibilita dotar de actualidad al proceso de enseñanza-aprendizaje de la química. En segundo lugar, al ser la nanoquímica una cuestión sociocientífica, es decir, una temática con implicaciones tecnológicas, sociales y ambientales, su análisis posibilita emprender un proceso de enseñanza-aprendizaje contextualizado. Esto, al referenciar la efectividad que tienen los conocimientos y aplicaciones que se desprenden de la nanoquímica en la resolución de problemas en el entorno cotidiano y ambiental, así como su problemática asociada. Una tercera razón que justifica la inclusión de esta temática en particular en los currículos de química del nivel medio y superior es que permite formar vocaciones científicas. Actualmente, las profesiones, áreas de investigación y empleos relacionados con el mundo de lo nano se están incrementando significativamente, por lo que resulta apremiante contar con profesionales que decidan especializarse en este campo (Ozin & Loh, 2022; Pagliaro, 2015).

La enseñanza de la nanoquímica en el nivel medio y superior

En el ámbito educativo, reconocer la percepción y las actitudes de los estudiantes y profesores hacia las nanociencias, resulta crucial para trazar un enfoque que permita incorporar contenidos relacionados con estas áreas de conocimiento en los planes y programas de estudio de las diferentes disciplinas científicas. Al respecto, se han publicado estudios realizados en países como Australia, EUA, Japón, Turquía, India, México, España entre otros. En estos se informa que, la comprensión del objeto de estudio de las nanociencias

y la nanotecnología es deficiente o limitado, para alumnos y profesores de la educación obligatoria (Much, Winkelmann & Hugerat, 2022). En estudios realizados con estudiantes matriculados en profesiones relacionadas con la ciencia y la tecnología, se menciona que un porcentaje significativo reconoce o asocia a las nanociencias con el estudio de entidades sumamente pequeñas. Sin embargo, este tipo de alumnos no logran establecer con claridad distinciones entre entidades microscópicas y nanoscópicas (NAS, 2016).

Otra tendencia ampliamente reportada en el ámbito de la educación nano es que, a pesar de las limitaciones en la comprensión del objeto de estudio de las nanociencias y la nanotecnología, impera en estudiantes y docentes altas expectativas en los logros que puede conseguir esta área de conocimientos en el desarrollo científico y tecnológico en general. No obstante, se reporta también, el desconocimiento de los riesgos e implicaciones sociales, económicas y ambientales asociadas con la investigación nano (Kahan, Braman, Slovic, Gastil & Cohen, 2009). Por lo anterior, se devela como necesario que, la incorporación de contenidos relacionados con las nanociencias en los planes y programas de estudio, incluyan el análisis de sus implicaciones éticas y socioambientales.

Específicamente, en el ámbito de la enseñanza, la nanoquímica como parte de las nanociencias posee una serie de obstáculos epistemológicos que dificultan su abordaje en las aulas y los laboratorios escolares. Estos, se relacionan principalmente con abstracciones de orden conceptual que dificultan su entendimiento. Entre los más citados en la literatura, se encuentran los siguientes:

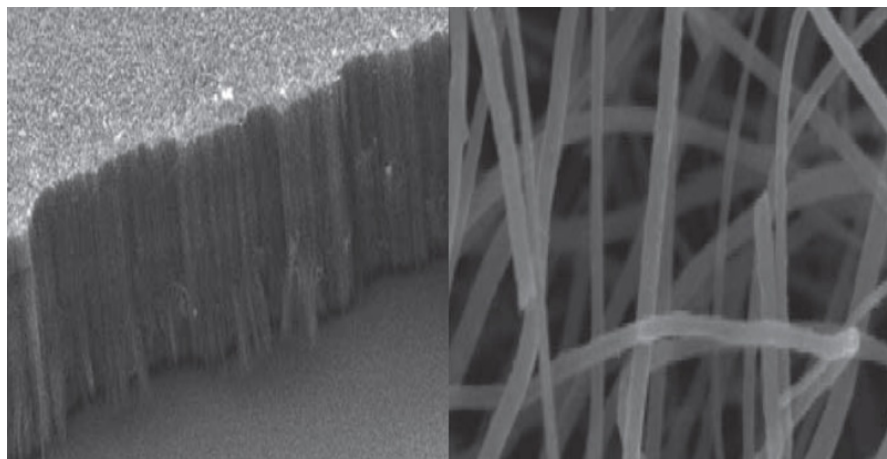
- *El tratamiento educativo de una escala sumamente pequeña que no puede ser percibida de forma directa por los sentidos.*
- *La presencia de nociones y una terminología abstracta asociada a fenómenos cuánticos o de superficie al explicar las propiedades de nanoestructuras y nanomateriales.*
- *La dimensión interdisciplinar de las nanociencias y la nanotecnología* (Sánchez-Mora & Tagüeña, 2023).
- *La difusión de una imagen errónea o deformada de la nanotecnología en los medios de comunicación y redes sociales.*
- *La poca o nula presencia de contenidos relacionados con la investigación nano en los programas y planes de estudio de las disciplinas científicas en la educación obligatoria* (Jones et al., 2013).

Para hacer frente a los obstáculos epistemológicos relacionados con la escala nanométrica, en la literatura se recomienda seguir un enfoque que parta de lo macro a lo nano. Por ejemplo, en las clases de química se puede referenciar a los materiales del carbono, partiendo del análisis del grafito, un alótropo macroscópico del elemento carbono y culminando con el estudio de los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafeno, alótropos nanoestructurados de este elemento. Para ello, se sugiere comparar las propiedades de estos materiales y asociarlas con su tamaño, configuración estructural y estableciendo diferencias al referenciar aplicaciones (Meinguer, 2019). También es importante, para despertar el

interés de los estudiantes sobre el mundo de lo nano, referenciar en las aulas y los laboratorios entidades nanoscópicas que son ampliamente conocidas como la molécula de ADN, la de glucosa o la penicilina (García-Betancourt, 2017).

Figura 2

Imágenes de nanotubos de carbono obtenidas con microscopía electrónica de barrido (SEM)



Nota. Readaptada de Alonso-Núñez (2015).

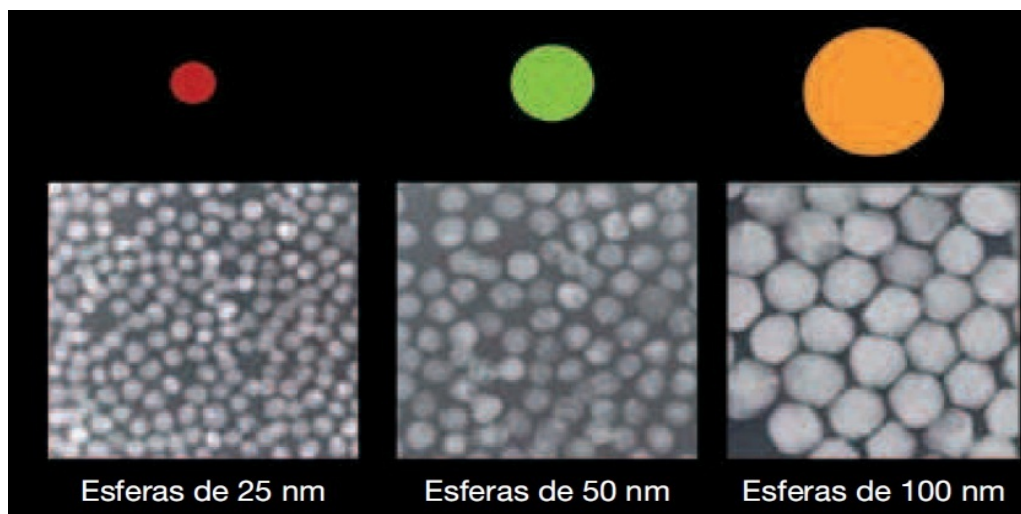
En lo concerniente al abordaje de conceptos abstractos provenientes de la mecánica cuántica o relacionados con la relación superficie/volumen, se sugiere hacer uso de un discurso analógico y vincular su explicación con aspectos o hechos cotidianos de dominio común (Reviglio, 2014). Otra ruta que puede favorecer el abordaje de contenidos nano, es el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Su utilización puede favorecer la modelación estructural de nanomateriales y nanoestructuras a través de animaciones, vídeos y la utilización de software's específicos (Ribeiro, Godoy, Neto & de Souza-Filho, 2018). En lo relativo a la dimensión multi e interdisciplinar es importante comunicar en los salones de clases que, esta característica no se agota en la articulación de conocimientos de otras disciplinas y subdisciplinas científicas en la construcción de un marco teórico-metodológico innovador sobre los procesos de síntesis química, sino también, en la influencia de disciplinas sociohumanistas al valorar el impacto de sus productos en la sociedad y el cuidado del medio ambiente (Ozin & Loh, 2022).

Sobre cuestiones relacionadas con las nanociencias en el contexto educativo-institucional, en la literatura se menciona que, en los niveles de la educación obligatoria son pocas las instituciones que han incorporado contenidos nano en los planes y programas de estudio de las asignaturas científicas (Pagliaro, 2015). En realidad, la mayoría de los estudios e investigaciones centradas en la educación nano, son elaboradas por docentes, divulgadores, investigadores o redes de académicos interesados por comunicar aspectos de esta área emergente de conocimientos en su práctica docente (Much et al., 2022). En este tipo de estudios, se suelen establecer asociaciones con algunos contenidos que se encuentran ampliamente consolidados en los currículos de las asignaturas científicas. En el caso de la

enseñanza de la química, el tratamiento de contenidos nano suele estar asociado con el estudio de la catálisis, la química de los metales, los polímeros, los composites, las celdas fotovoltaicas y los superconductores a través de metodologías educativas muy diversas.

Figura 3

Coloración de las nanopartículas de oro según su tamaño



Nota. Tomada de Takeuchi (2011).

La amplia variedad de temas y rutas didácticas reportadas en la literatura sobre el abordaje de contenidos nano en la educación química, ha impedido el establecimiento de estándares de aprendizaje y evaluación (Jones et al., 2013). Para hacer frente a la problemática anteriormente descrita, es necesario contar con un núcleo básico de conocimientos disciplinares y un mayor número de rutas didácticas probadas que, favorezcan el trabajo educativo sobre las nanociencias en general y la nanoquímica en particular. Pues ello permitirá que, la incorporación de contenidos nano en la educación científica formal, sea contemplada como una cuestión pertinente en los proceso de actualización curricular. En el siguiente apartado de este manuscrito, se analizan propuestas que giran en esta dirección.

Desarrollo

Propuestas educativas sobre nanoquímica en el ámbito escolar

En los siguientes párrafos, se describen publicaciones, metodologías de enseñanza y rutas didácticas que guardan relación con la nanoquímica. Esto, con el objetivo de incentivar la práctica educativa y robustecer el acervo de planeaciones didácticas en torno a esta subdisciplina en el contexto escolar. La primera propuesta es una publicación en la que se postulan nueve rubros o apartados disciplinares para dar cauce al estudio de las nanociencias en el ámbito escolar. Esta publicación fue hecha por la NSTA (National Science Teachers Association) en el año 2009 y lleva por título: The big ideas of nanoscale, science &

engineering (las grandes ideas de la nanoescala en ciencia e ingeniería). Esta propuesta resulta pertinente de referenciar porque las nueve ideas que la integran, guardan relación con los contenidos y estándares de aprendizaje que figuran en los programas de estudio en las asignaturas de química, al estudiar a la materia (Much et al., 2022). En la tabla 1, se describen de forma sintética cada una de las nueve ideas o apartados disciplinares que propone la NSTA y se asocian objetivos de aprendizaje.

Tabla 1.

Descripción de las grandes ideas de la nanoescala y algunos de sus objetivos de aprendizaje

Idea	Descripción	Objetivos de Aprendizaje
1. Tamaño y escala	Contenidos relacionados con el tamaño, la estructura y la geometría, permiten describir a la materia y predecir su comportamiento.	Los estudiantes comprenderán que, para analizar y entender las dimensiones de un objeto es necesario contar con una escala de medida como referencia.
2. Estructura de la materia	Los materiales están conformados por unidades o bloques de construcción jerarquizados. Los átomos interactúan unos con otros para formar moléculas y agregados, los cuales interactúan y se autoensamblan en la nanoescala, para formar los bloques de construcción de los nanomateriales.	Los estudiantes comprenderán que los átomos y las moléculas son parte fundamental de los precursores químicos que constituyen a los nanomateriales. Posibilitando con ello, la descripción de cómo se autoensamblan y organizan, para formar arreglos de orden superior.
3. Enlaces e interacciones	Todas las interacciones que se dan entre partículas pueden describirse por distintos tipos de fuerzas. En la escala nanométrica predominan fuerzas eléctricas de diferente intensidad.	Los estudiantes comprenderán que, las interacciones que se dan entre átomos, moléculas y bloques de construcción son de naturaleza eléctrica. Asimismo, reconocerán que su descripción, contempla el análisis de su intensidad y los cambios energéticos que puede generar en un sistema.
4. Efectos cuánticos	A medida que el tamaño de un objeto disminuye hasta aproximarse o situarse en la escala nanométrica, los efectos cuánticos adquieren relevancia.	Los estudiantes entenderán que, cuando un objeto disminuye su tamaño drásticamente hasta situarse en la nanoescala, se puede comportar como partícula y como onda. Por consiguiente, para predecir y explicar su comportamiento se necesita utilizar postulados, modelos y aproximaciones provenientes de la mecánica cuántica.
5. Dependencia de las	Las propiedades de los materiales pueden	Los estudiantes indagarán sobre la relación entre superficie y volumen. Lo que les permitirá inferir que, a medida que los

propiedades con el tamaño	modificarse con el cambio de tamaño.	objetos y materiales se aproximan a la escala nanométrica, su volumen disminuye y se incrementa el número de átomos presentes en su superficie. Un fenómeno que explica, las inusitadas propiedades que exhibe la materia en esta escala de medida.
6. Autoensamblaje	Bajo condiciones específicas, los precursores químicos o bloques de construcción pueden ensamblarse de forma espontánea, dando lugar a estructuras complejas y organizadas.	Los estudiantes comprenderán que, los procesos de autoensamblaje pueden ser descritos a partir de la estructura, composición y propiedades de sus constituyentes (átomos y moléculas), así como de las fuerzas y la energía implicadas en la formación de enlaces químicos.
7. Herramientas e instrumentación	El desarrollo tecnológico actual, ha permitido la obtención de nuevos instrumentos que han revolucionado el estudio de la materia y que permiten a los científicos su manipulación con un alto nivel de precisión.	Los estudiantes conceptualizarán que se requiere de una instrumentación tecnológica muy sofisticada, para caracterizar, aislar y manipular a la materia en la escala nanométrica y cuyo funcionamiento se basa en la interacción entre los átomos de un material con partículas presentes en estos dispositivos.
8. Modelos y simulaciones	El tamaño y la complejidad de las entidades que se sitúan en la escala nanométrica, requiere del uso de modelos, vídeos y simulaciones para su estudio y representación.	Los estudiantes comprenderán que, para el estudio de los fenómenos que ocurren en la nanoescala, se utilizan modelos para representar la estructura e interacciones que se suscitan entre partículas, átomos, moléculas y bloques de construcción.
9. Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS)	Las nanociencias y la nanotecnología son campos de conocimiento emergente. Por tal razón, representan una oportunidad para involucrar a la población en la discusión del uso que se le puede dar a sus aplicaciones en la resolución de problemas de interés social y ambiental.	Los estudiantes identificarán que, las nanociencias y la nanotecnología son campos que ilustran la dinámica que se da entre el avance científico, el desarrollo tecnológico y social e indagarán sobre la toxicidad y los riesgos ambientales que tienen asociados los nanomateriales.

Nota. Tabla con información readaptada de NSTA (2009).

La pertinencia de la publicación de la NSTA, se debe a que permite fomentar en los estudiantes una visión articulada, coherente y significativa de los principios teóricos que fundamentan a las nanociencias. Aunado a lo anterior, esta visión de conjunto de los nueve rubros disciplinares antes mencionados, posibilita que los alumnos puedan entender fenómenos dentro y entre diferentes disciplinas científicas, resaltando su dimensión multi e interdisciplinar. Es importante señalar que, para el análisis o comunicación en las aulas de un tema de interés que guarda relación con las nanociencias, algunos de los rubros de la

iniciativa de la NSTA pueden ser descartados y centrar la atención en aquellos elementos que guarden una relación sustancial. Esta propuesta en general resulta apropiada para incentivar la discusión y dotar de sentido a la incorporación de contenidos provenientes de las nanociencias en el ámbito escolar.

La segunda propuesta por referenciar en este apartado, corresponde a un curso diseñado y aplicado en el nivel superior por el investigador Mario Paglario (2015). En este, se sugiere abordar los siguientes temas: 1) aspectos relacionados con la síntesis de nanomateriales a través de métodos químicos, 2) la instrumentación que requieren dichos procesos y 3) las implicaciones socioambientales de los productos y aplicaciones que puede generar la nanoquímica. El curso está dirigido a estudiantes de los últimos semestres de licenciatura (pregrado) que estén interesados en la relación que guarda la química con la investigación nano, ya que este tipo de alumnos poseen conocimientos suficientes en química, física, matemáticas e ingeniería de materiales. El curso tiene una duración de seis semanas e inicia con el análisis de algunos nanomateriales en publicaciones reconocidas y especializadas. Posteriormente, se propone que los alumnos tomen un módulo basado en actividades experimentales y de corte documental. El curso culmina con la publicación de un artículo de investigación, elaborado por los estudiantes sobre los nanomateriales estudiados.

El material bibliográfico que se sugiere revisar en este curso de pregrado, es de la autoría de académicos e investigadores con amplia experiencia en la síntesis de nanomateriales. A su vez, el trabajo de laboratorio está orientado para que los estudiantes desarrollen habilidades experimentales, que guarden relación con las técnicas de síntesis reportadas en la obtención de los nanomateriales estudiados de forma teórica en el primer módulo del curso. Mientras que, la labor documental tiene la finalidad de potenciar la búsqueda de información sobre cuestiones toxicológicas, riesgos, aplicaciones y regulación en el uso de los nanomateriales en cuestión. Finalmente, con el desarrollo y la publicación de un artículo científico sobre los nanomateriales estudiados, se pretende que los alumnos participantes sean capaces de articular conocimientos disciplinares y contextuales, así como incentivar la adquisición de habilidades de escritura, argumentación y comunicación en torno a la nanoquímica (Meinguer, 2022). En los siguientes párrafos, se esbozan rutas didácticas basadas en el trabajo experimental y documental sobre temáticas que guardan relación con la nanoquímica.

Síntesis de nanopartículas metálicas en el laboratorio químico escolar

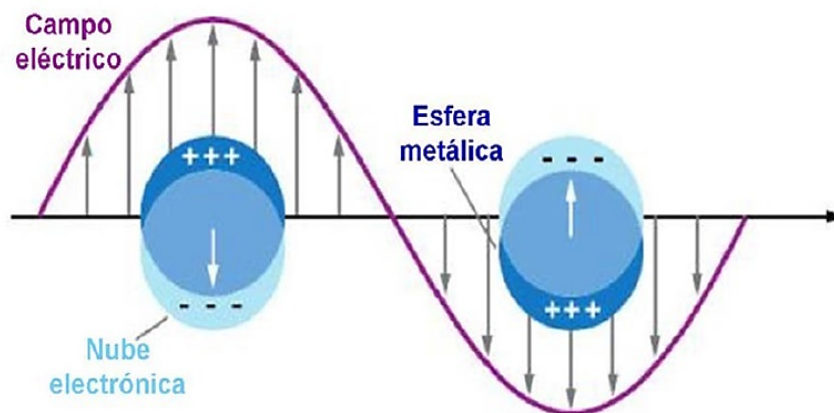
En este trabajo se propone implementar en el ámbito escolar, actividades didácticas que promuevan el trabajo experimental y documental. Una ruta didáctica que cumple con las características anteriores y resulta relativamente fácil de replicar en los laboratorios de docencia, es la síntesis de nanopartículas metálicas (NpM). Estos experimentos suelen ser vistosos, implican la preparación de suspensiones coloidales usando sustancias de uso común en los laboratorios escolares y pueden enmarcarse en el estudio de las reacción de óxido-reducción, un temática ampliamente consolidada en los currículos de química en el nivel medio y superior.

Concretamente, la síntesis de NpM puede ampliar y actualizar los aprendizajes relacionados con la química de los metales, fomentar la indagación documental al solicitar información sobre sus aplicaciones, toxicidad y regulación, así como despertar el interés de los estudiantes sobre las propiedades y el comportamiento que exhiben los elementos metálicos en la escala nanométrica (Heinzerling & Oetken, 2018). A continuación, se esbozan tres actividades experimentales tomadas de la literatura, relacionadas con la obtención de nanopartículas de plata (AgNPs), de cobre (CuNPs) y de hierro (FeNPs) en el laboratorio de química escolar.

La plata es un elemento químico de relevancia histórica y disciplinar, ya que desde la antigüedad es considerado un metal preciado por su utilización en la elaboración de monedas, joyas y ornamentación. Entre sus propiedades fisicoquímicas destaca su maleabilidad, su elevada conductividad térmica y eléctrica. En la escala nanométrica, las nanopartículas de plata (AgNPs) poseen tamaños menores a 100 nm, esta drástica reducción de tamaño provoca que las NPs exhiban propiedades diferentes de las que presenta este metal en sistemas macroscópicos denominados bulk (Ozin & Arsenault, 2015). Un ejemplo de ello, es su coloración, las nanopartículas de plata pueden tomar tonalidades amarillas y azules, diferenciándose del gris metálico que asociamos en el mundo macroscópico a este elemento químico. Otro fenómeno que experimentan las AgNPs es el denominado plasmón de superficie, el cual posibilita su identificación en los laboratorios de docencia (Martínez, Zuñiga & Sánchez, 2013).

Figura 4

Representación del efecto de oscilación de electrones en la superficie de las NPs metálicas al interactuar con la radiación electromagnética-línea morada-.



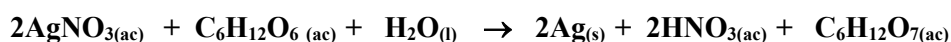
Nota. Adaptada de Martínez et al. (2013).

Se denomina plasmón de superficie a la oscilación que experimentan las cargas libres de un gas que se encuentra fuertemente ionizado, como resultado de su interacción con un campo eléctrico (Cruz, Rodríguez, López, Herrera, Orive & Creus, 2012). Aunque este

fenómeno comúnmente se asocia en la descripción de las propiedades del estado gaseoso, se ha reportado que lo experimentan las NPs de metales como la plata (Ag), el oro (Au) y el cobre (Cu) cuando se encuentran dispersas en suspensiones coloidales (Sanguineto y Estévez, 2019). En este tipo de suspensiones, los electrones presentes en los átomos de superficie de las nanopartículas oscilan al interactuar con una fuente de radiación electromagnética (un haz de luz visible).

La oscilación de los electrones de átomos superficiales, provoca fluctuaciones en la densidad de carga de las NPs metálicas, induciendo momentos dipolares en intervalos de tiempos determinados (Martínez et al., 2013), los cuales pueden explicarse como el resultado del acoplamiento de la frecuencia de la radiación electromagnética incidente con la frecuencia de las oscilaciones de los electrones perturbados en las NPs metálicas. El fenómeno de plasmón de superficie puede ser detectado sensorialmente, con la aparición de colores específicos que se difunden en las suspensiones coloidales de NPs metálicas. Un efecto que se debe a que las longitudes de onda involucradas en este fenómeno, poseen valores que oscilan entre los 400 a 700 nm, esto es, dentro del rango de la luz visible en el espectro electromagnético.

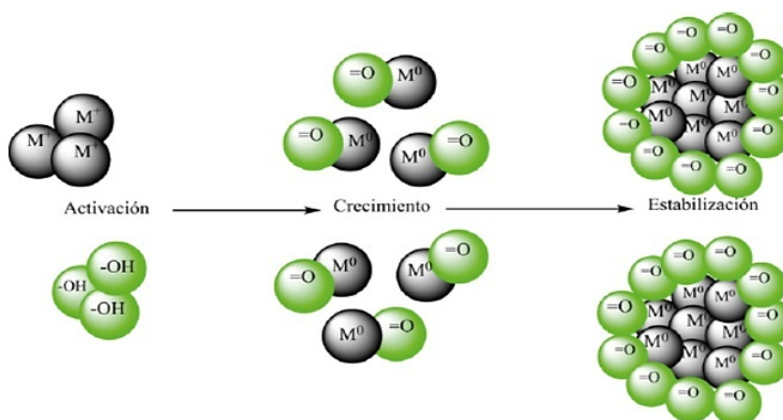
La preparación de suspensiones coloidales de AgNPs, se fundamenta en la reducción química de sales de plata, siendo el reactivo más utilizado el nitrato de plata (AgNO_3). Bajo este enfoque metodológico, Tutor-Sánchez (2014) propone la preparación de suspensiones de AgNPs, utilizando como agente estabilizante al almidón. La ecuación química que representa a este proceso experimental, se muestra a continuación:



En este método, la función de la glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) es reducir al nitrato de plata, hasta la obtención de las NPs de este metal. En el medio de reacción, las AgNPs son recubiertas por capas de almidón, para controlar su crecimiento. El experimento concluye con la identificación de la presencia de las AgNPs, al irradiar con un apuntador láser un vial que contiene un pequeño volumen de la suspensión coloidal preparada en el laboratorio. La difusión de la luz del apuntador láser en la suspensión coloidal, se considera una prueba positiva y puede ser explicada con el fenómeno de plasmón de superficie descrito con anterioridad. Para que los alumnos, puedan contrastar esta evidencia, se recomienda que como una acción comparativa, intenten hacer pasar la luz del puntero láser en una disolución de nitrato de Plata AgNO_3 0.1 M, en la que observaran que la luz del apuntador no se difunde.

Figura 5

Representación general de las etapas presentes en la síntesis de nanopartículas metálicas (NPM) en suspensiones coloidales

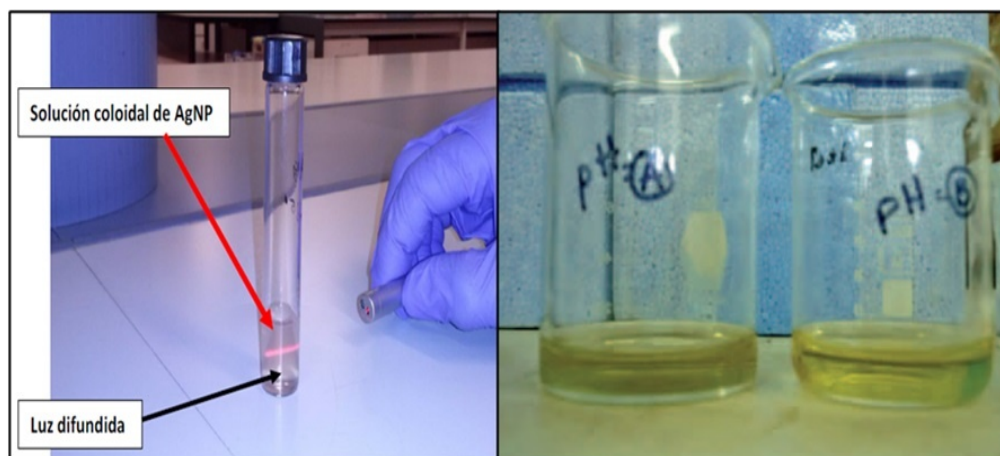


Nota. Tomada de Valenzuela-Amaro, Vázquez, Zazueta-Álvarez, López-Miranda & Rojas-Conteras (2023).

Otra actividad experimental reportada sobre la síntesis de AgNPs que sigue una metodología similar, es la descrita por Chhatre, Solasa, Sakle, Thaokar y Mehra (2012) y Martínez y et al. (2013). En esta se sugiere utilizar como agente reductor y estabilizante al ácido ascórbico ($C_6H_7O_5$) y al citrato de potasio ($C_6H_5K_3O_7 \cdot H_2O$) respectivamente, así como realizar ajustes de pH, agregando pequeños volúmenes de hidróxido de sodio ($NaOH$) en diferentes concentraciones. Como resultado, se pueden obtener suspensiones coloidales de diferentes tonalidades de amarillo (el color característico de las AgNPs cuando se aproxima a los 100 nm).

Figura 6

Efecto óptico y tonalidades de suspensiones coloidales con AgNPs

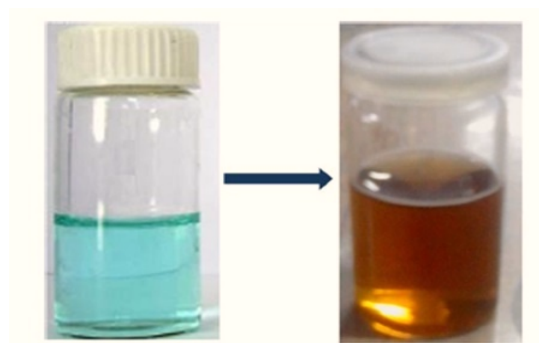


Nota. Adaptada de Tutor-Sánchez (2014) y Martínez et al. (2013).

En lo relativo a la obtención de nanopartículas de cobre (CuNPs), en la literatura se sugiere preparar suspensiones coloidales utilizando sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), el cual puede ser reducido sucesivamente en las especies Cu^+ y Cu^0 por la acción del ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_5$). En este método, se recomienda utilizar nuevamente al almidón como un agente estabilizante, agua desionizada como disolvente e hidróxido de sodio (NaOH) para realizar ajustes de pH (Heinzerling et al., 2018). La preparación de disoluciones coloidales de CuNPs, requiere de la agitación vigorosa de la mezcla de reacción por varios minutos. La evidencia de la síntesis de CuNPs, será el cambio de color de las suspensiones coloidales resultantes, las cuales virarán del azul al verde en la primera reducción que experimenta el cobre y, posteriormente, al marrón (al obtener la especie Cu^0). Al igual que con las AgNPs, se puede utilizar un apuntador láser para su identificación. Se recomienda consultar la publicación de Khalid, Shamaila, Zafar y Shahzadi (2015), para obtener información más específica en la obtención de CuNPs en los laboratorios de docencia.

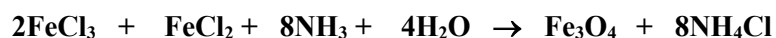
Figura 7

Tonalidad característica de las suspensiones coloidales de CuNps



Nota. El color azul-verde característico del cobre en disolución se torna rojizo, por la presencia de NPs de este metal en suspensiones coloidales. Adaptada de Khalid et al. (2015).

Para ejemplificar las propiedades magnéticas que exhiben algunas NPs metálicas, docentes e investigadores han planteado la síntesis NPs de óxido de hierro (Fe_3O_4) en los laboratorios escolares (Gomes da Silva et al, 2016; Maya, Calderón & Vericat, 2014). Este tipo de NPs revisten propiedades superparamagnéticas, lo que les permite absorber energía electromagnética en frecuencias determinadas e interaccionar con campos magnéticos (Gomes da Silva et al., 2016). Razón por la cual, sus aplicaciones están siendo utilizadas en diferentes ámbitos como la medicina, la electrónica e inclusive en el ramo ambiental, ya que se ha reportado que pueden ser útiles para remover contaminantes como el arsénico en proceso de tratamiento de aguas residuales (Valenzuela et al., 2023). Las NPs de Fe_3O_4 , se pueden preparar con cierta facilidad en los laboratorios de docencia, siguiendo la siguiente ecuación química:



La preparación de suspensiones coloidales de NPs de Fe_3O_4 , requiere mezclar una disolución de una sal férrica ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y otra ferrosa (FeCl_2). Ambas disoluciones deben ser preparadas por separado, usando ácido clorhídrico (HCl) diluido como disolvente. Al preparar estas disoluciones, los estudiantes pueden observar como el Fe (II) se oxida lentamente a Fe (III), ya que se percibe un viraje del verde claro a una tonalidad parda (Berger, Adelman, Beckman, Campbell, Allis & Lisensy, 1999). Las disoluciones de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y de FeCl_2 se mezclan lentamente en un vaso de precipitados con agitación vigorosa, en un tiempo de una hora. Se recomienda agregar lentamente a este medio de reacción, pequeños volúmenes de hidróxido de amonio (NH_4OH) diluido en agua desionizada (Maya et al., 2014). La suspensión resultante tendrá una coloración parda o negra. En este proceso de síntesis, se utiliza como surfactante o sustancia estabilizadora al hidróxido de tetrametilamonio ($\text{C}_4\text{H}_{13}\text{NO}$), una sustancia que hace posible que el tamaño de las NPs oscile entre 20 a 60 nm (Berger et al., 1999).

Para que los estudiantes identifiquen la presencia de nanopartículas de Fe_3O_4 , se sugiere someter el vaso de precipitados o un vial con la suspensión coloidal resultante a la acción de un campo magnético, utilizando un imán. Los alumnos podrán comprobar las propiedades paramagnéticas de las NPs de Fe_3O_4 , al observar cómo se agrupan las partículas suspendidas entorno al imán, esta acción puede permitir también, la decantación magnética de las NPs de óxido de hierro (Much et al., 2022).

La dimensión CTS-A de nanopartículas y nanomateriales

La lectura, la escritura y la argumentación son aptitudes ampliamente reconocidas en la educación científica. Su promoción en las aulas y los laboratorios de química favorece que los estudiantes internalicen e interpreten de forma reflexiva información disciplinar y se formen una opinión informada del acontecer en materia de ciencia y tecnología. Una forma de impulsar procesos de lectura, escritura y argumentación sobre la nanoquímica en el contexto escolar es mediante el desarrollo de investigaciones documentales sobre la dimensión CTS-A (Ciencia, Tecnología, Sociedad y Ambiente) de los avances y productos que está generando la nanoquímica (Villa, 2022).

Tomando en cuenta lo anterior, se puede ampliar el trabajo educativo sobre las NPs metálicas referenciadas en párrafos anteriores, al solicitar a los estudiantes que documenten cuestiones relacionadas con sus aplicaciones, toxicidad, regulación y los riesgos ambientales que implica su utilización. Por ejemplo, las AgNPs por sus propiedades antifúngicas y antibacteriales están siendo utilizadas en tratamientos médicos, en procesos de potabilización de agua, en la fabricación de pinturas y recubrimientos, así como en la ingeniería textil (Díaz-Acosta, 2019). Por su parte, las CuNPs tiene aplicaciones en la elaboración de nanocatalizadores, como aditivos de la industria de los electrónicos y por sus efectos antimicrobianos en el tratamiento de plagas en procesos relacionados con la agricultura (Ozin y Loh, 2022). Mientras que, las FeNPs por sus propiedades paramagnéticas son un componente importante de algunos biosensores, se están empleando en la administración de fármacos de mayor especificidad, en mejorar las imágenes de contraste obtenidas por

resonancia magnética al establecer diagnósticos médicos y en proceso de remediación ambiental que involucran la remoción de arsénico (Valenzuela et.al, 2023).

Es importante que, el alumnado al documentar información sobre la nanoquímica reconozca su relación con la sostenibilidad, una noción que se ha consolidado en los últimos años en la actividad científica, el desarrollo tecnológico y la educación (Serena, 2021). Otras temáticas que pueden guiar el trabajo documental sobre nanoquímica en el contexto escolar y que guardan relación con el desarrollo sostenible, son el uso de los fullerenos C_{60} en la fabricación de paneles solares, la incorporación de nanocelulosa para reforzar fibras textiles y favorecer su biodegradación, las investigaciones sobre nanotubos de carbono en la obtención de celdas de combustible, el papel de las NPs de dióxido de Titanio (TiO_2) como fotocatalizadores en los procesos de tratamiento y potabilización de agua (Névarez-Martínez, Esponzoa-Montero, Quiroz-Chavez & Ohtani, 2017), entre otros.

Además de indagar sobre las aplicaciones de los productos que genera la nanoquímica y su relación con la sostenibilidad, se sugiere que los alumnos recopilen información sobre sus riesgos toxicológicos, ambientales, la existencia de protocolos que favorezcan su regulación industrial y aspectos relacionados con la gobernanza de las nanociencias y la nanotecnología. En el caso de las NPs metálicas referenciadas en este trabajo, sus riesgos suelen estar asociados con su tamaño, movilidad y reactividad superficial. Al ser entidades casi mil veces menores que los glóbulos rojos, pueden penetrar con relativa facilidad las membranas de las células y alterar su metabolismo, lo que puede ocasionar efectos degenerativos (Serena, 2021). De tal forma que, la capacidad que tienen algunas NPs metálicas para ser usadas en el tratamiento y diagnóstico de enfermedades, se puede revertir y resultar perjudicial al modificarse las circunstancias de su propagación. A este respecto, es importante señalar que, los riesgos toxicológicos de mayor probabilidad de ocurrencia, están vinculados con NPs que se difunden en estado libre en el organismo o en el medio ambiente en comparación con aquellas que se encuentran fijas a una resina o sustrato. En estas últimas, su problemática reside con los procedimientos de desecho y degradación (Villa, 2022). En la actualidad, existe una rama de conocimiento científico denominada econanotoxicología, la cual se dedica a estudiar el impacto de los nanomateriales durante sus ciclo de vida útil, los seres vivos y los ecosistemas (Serena, 2021). Los estudiantes pueden rastrear en la literatura de este campo de conocimiento, información sobre entidades nanoscópicas que resulten de interés.

En el ámbito social, los riesgos asociados por la creciente producción de nanomateriales se vinculan con el aumento de la brecha tecnológica entre países desarrollados y subdesarrollados. Una problemática que, de ocurrir, puede generar desequilibrios socioeconómicos mayores de los que existen en la actualidad. El reto de la gobernanza en nanociencias y nanotecnología estriba en el establecimiento de leyes y normas que posibiliten el uso adecuado de los avances y productos de la investigación nano en el marco de la sostenibilidad, la ética y la equidad en el desarrollo de los países. En consecuencia, el abordaje de contenidos nano en la educación química, debe permitir a los estudiantes reconocer el rostro jánico de las nanociencias y la nanotecnología, al valorar sus beneficios y sus riesgos. Una cuestión que, les permitirá interpretar de forma reflexiva

conocimientos sobre nanoquímica, así como adquirir una opinión informada sobre su relevancia en el ámbito científico, tecnológico, socioambiental y sus desafíos en el mundo contemporáneo.

La labor documental y experimental entorno a la nanoquímica que se sugiere llevar a cabo en este trabajo, puede dar lugar a proyectos de investigación escolar que potencien la formación de vocaciones científicas y la comunicación de la ciencia. Esto, al ser presentados en ponencias, conferencias, exposiciones, concursos relacionados con la iniciación en la investigación o al ser comunicados en periódicos y revistas difundidas al interior de las instituciones educativas (Meinguer, 2022). Actividades que robustecen y diversifican el trabajo educativo.

Conclusión

La nanoquímica forma parte de las nanociencias, se fundamenta en un enfoque metodológico interdisciplinar denominado *bottom-up* (de abajo hacia arriba), el cual se caracteriza por hacer uso de aproximaciones, modelos y conocimientos provenientes de las ramas representativas de la química y otras ciencias en la síntesis de materiales que se sitúan en la escala nanométrica (Ozin & Arsenault, 2015). La importancia de esta subdisciplina radica en que está generando aplicaciones destacadas en el ramo científico, tecnológico, industrial y ambiental.

En el contexto educativo, la incorporación de contenidos relacionados con la nanoquímica, permite ofrecer una visión actualizada de la química en los procesos de enseñanza-aprendizaje de esta ciencia, promover la innovación educativa, impulsar la formación de vocaciones científicas en el campo de las nanociencias y contribuir en la construcción de una visión informada y reflexiva del acontecer científico. A pesar de que, desde hace más de una década se reconoce como pertinente la incorporación de contenidos nano en la educación química, son pocos los avances que se han conseguido al respecto. Esto se debe a que, los programas de estudio de las asignaturas de química en la educación obligatoria se encuentran sobresaturados de contenidos denominados fundamentales, lo que dificulta la creación de espacios curriculares enfocados en áreas de innovación. Otro hecho que abona a este problema, es la falta de estándares de aprendizaje y evaluación sobre contenidos provenientes de las nanociencias en el ámbito escolar (Jones et al., 2013).

Para contribuir a hacer frente a este panorama, en este trabajo se han descrito algunas iniciativas teóricas y actividades prácticas reportadas en la literatura, las cuales tienen como finalidad amalgamar un núcleo de nociones disciplinares básicas y sugerir rutas didácticas que favorezcan el trabajo educativo entorno a la nanoquímica en el nivel medio y superior. Específicamente, se ha puesto énfasis en promover una serie de actividades experimentales y documentales relacionadas con la síntesis y el de estudio nanopartículas (NPs) metálicas de Ag, Cu y Fe₃O₄. La razón es que este tipo de NPs se pueden obtener mediante experimentos fáciles de replicar en los laboratorios de docencia, su análisis se puede enmarcar en el aprendizaje de las reacciones redox (una temática que figura en los programas de estudio de la mayoría de las asignaturas de química que se imparten en el nivel medio y

superior) y la indagación entorno a sus implicaciones CTS-A, resulta pertinente para ilustrar la fuerte relación que guarda la nanoquímica con el desarrollo sostenible y el avance tecnológico. Un objetivo ampliamente compartido en la ciencia y la educación contemporánea.

En síntesis, lo que persigue este manuscrito, es ofrecer elementos que resulten útiles a los docentes y académicos interesados en incorporar contenidos provenientes de la nanoquímica en su práctica educativa. Esto, en el entendido que, contar con más y mejores prácticas sobre esta subdisciplina, es un condicionante que favorecerá su incorporación en los currículos de química en el corto y mediano plazo.

Referencias

- Aguayo-González, F., Zarzuela Roldán, E., & Lama-Ruiz, J. R. (2011). Nanotecnología y nanoquímica. *Sevilla Técnica*, 36, 28-37.
- Alonso-Núñez, G. (2015). Nanoquímica: ingeniería de nanomateriales. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 1(1), 45-50. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2008.1.53559>
- Atkins, P. (2013). *What is Chemistry?* Oxford University Press.
- Bauer, J. (2021). Teaching nanotechnology through research proposals. *Journal of Chemical Education*, 98(7), 2347-2355. DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c01251
- Berger, P., Adelman, N. B., Beckman, K. J., Campbell, D. J., Allis A. B., & Lisensky, G. C. (1999). Preparation and properties of an aqueous ferrofluid. *Journal of chemical education*, 76(7), 943-948. <https://doi.org/10.1021/ed076p943>
- Caracciolo, P. C., Tornello, P. R. C., Buffa, F., Ballarin, F. M., Cuadrado, T. R., y Abraham, G. A. (2011). Pequeñas fibras, grandes aplicaciones. *Ciencia hoy*, 21(121), 57-64.
- Chhatre, A., Solasa, P., Sakle, S., Thaokar, R., & Mehra, A. (2012). Color and surface plasmon effects in nanoparticle systems: Case of silver nanoparticles prepared by microemulsion route. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 404, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.04.016>
- Cruz, D. A., Rodríguez, M. C., López, J. M., Herrera, V. M., Orive, A. G., & Creus, A. H. (2012). Nanopartículas metálicas y plasmones de superficie: una relación profunda. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(2), 67-78.
- Díaz-Acosta, M. (2019). Nanopartículas de plata: síntesis y funcionalización. Una breve revisión. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 12(22), 1-11. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.60758>
- García-Betancourt, M. (2017). Perspectivas para la innovación en educación con nanociencia y nanotecnología. *Revista de educación y desarrollo*, 41, 93-101.

- Gomes da Silva, D., Menegatti de Melo, F., Silveira, A. T., da Cruz, B. C., Pestana Prado, C. C., Pereira de Vasconcelos L. C., Sanches Luca, V. A., & Toma, H. E. (2016). Introducing environmental and sustainable chemistry topics using a nanotechnology approach: removing hazardous metal ions by means of humic-acid-modified superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Chemical Education*, 93(11), 1929-1934. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00172>
- Jones, M. G., Blonder, R., Gardner, G. E., Albe, V., Falvo, M., & Chevrier, J. (2013). Nanotechnology and Nanoscale Science: Educational challenges. *International Journal of Science Education*, 35 (9), 1490-1512. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.771828>
- Kahan, D. M., Braman, D., Slovic, P., Gastil, J., & Cohen, G. (2009). Cultural cognition of the risks and benefits of nanotechnology. *Nature nanotechnology*, 4(2), 87-90. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.341>
- Khalid, H., Shamaila, S., Zafar, N., & Shahzadi, S. (2015). Synthesis of copper nanoparticles by chemical reduction method. *Sci. Int*, 27(4), 3085-3088.
- Heinzerling, P., & Oetken, M. (2018). Nanochemistry-A Split between 18th Century and Modern Times. *World Journal of Chemical Education*, 6(1), 1-7.
- Martínez, F. M., y Zuñiga, G. E., y Sánchez, A. K. (2013). Método de síntesis de nanopartículas de plata adaptable a laboratorios de docencia relacionado con la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 6(10), 101-108. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.10.50967>
- Maya, J., Calderón., M., & Vericat., C. (2014). Síntesis de Nanopartículas de Óxido de Hierro. En P. Serena, N. Giraldo, N. Takeuchi, & J. Tutor. *Guía didáctica para la enseñanza de la nanotecnología en la educación secundaria* (pp. 121-126). nanoDYF.
- Meinguer, J. (2019). La comunicación de la nanotecnología del carbono a través del análisis crítico de textos informales en la educación química preuniversitaria. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 12(22), 3-35. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.61953>
- Meinguer, J. (2021). Nanoquímica, un campo de conocimientos de alto valor educativo y disciplinar. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 15(28), 1e-24-e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69674>
- Meinguer, J. (2022). Elementos disciplinares y educativos a considerar en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la nanoquímica en el bachillerato. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 8(8), 24-33.

- Much, R. A., Winkelmann, K., & Hugerat, M. (2022). *Nanochemistry for Chemistry Educators*. Royal Society of Chemistry.
- NAS. (2016). *Effective Chemistry Communication in Informal Environments*. The National Academies Press.
- Nevárez-Martínez, M. C., Espinoza-Montero, P. J., Quiroz-Chávez, F. J., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances en Química*, 12(3), 45-59.
- NSTA. (2009). *The Big Ideas of Nanoscale, Science & Engineering. A guide for secondary teachers*. NSTA Press.
- Ozin, G. A., & Loh J. Y. (2022). *Energy Materials Discovery. Enabling a Sustainable Future*. Royal Society of Chemistry.
- Ozin, G. A., & Arsenault, A. (2015). *Nanochemistry: a chemical approach to nanomaterials*. Royal Society of Chemistry Publishing.
- Pagliaro, M. (2015). Advancing nanochemistry education. *Chemistry—A European Journal*, 21(34), 11931-11936. <https://doi.org/10.1002/chem.201501042>
- Reviglio, A. (2014). Por qué y para qué enseñar nanotecnología en las escuelas. En S. Silvestri, A. Munuce, M. Alassia, A. Seferian, A. Reviglio, & L. Soria, (coords.). *Nanotecnología Hoy: el desafío de conocer y enseñar* (pp. 159-183). Ministerio de Educación de la Nación.
- Ribeiro, A. V., Godoy, G. C., Neto, L. B., & de Souza-Filho, M. P. (2018). Holografía y realidad virtual en la enseñanza de nanotecnología: Nuevos horizontes dirigido a educación secundaria. *Momento*, (56E), 34-45.
- Sánchez-Mora, M. C., & Tagüeña, J. (2011). El manejo de las escalas como obstáculo epistemológico en la divulgación de la nanociencia. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 4(2), 83-102. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2011.2.45011>
- Sanguineto, P., Estevez, M. B., Faccio, R., & Alborés, S. (2018). Nanopartículas de plata biogénicas a partir del hongo *Punctularia atropurpurascens* para el control de microorganismos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología*, 12(22), 101-110. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.6762>
- Serena, P. A., Giraldo, J.J., Takeuchi, N., & Tutor-Sánchez J. D. (2014). *Guía didáctica para la enseñanza de la nanotecnología en la educación secundaria*. nanoDYF.
- Serena, P. A. (2021). *Nanotecnología para el desarrollo sostenible*. CSIC.

- Tutor-Sánchez, J. D. (2014). Síntesis de Nanopartículas de plata (AgNP). En P. A. Serena, J. J. Giraldo, N. Takeuchi, & J. D. Tutor-Sánchez (coords). *Guía didáctica para la enseñanza de la nanotecnología en la educación secundaria* (131-135). nanoDYF.
- Takeuchi, N. (2011). *Nanociencia y nanotecnología: la construcción de un mundo mejor átomo por átomo*. FCE-UNAM.
- Valenzuela-Amaro, H. M., Vázquez, P. G., Zazueta-Álvarez, D. E., López-Miranda, J., & Rojas-Contreras, J. A. (2022). Síntesis verde de nanopartículas de magnetita (NPs-Fe₃O₄): factores y limitaciones. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16 (30), 1e-18e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69744>
- Villa, L. (2022). Educación de las nanotecnologías en México y las implicaciones sociales, riesgos y medio ambiente. *Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad*, 11(3), 1-12. <https://doi.org/10.37467/revtechno.v11.3812>