

# Un acercamiento a la Nanoescala

José Alberto Ruiz Gayosso y Yareli Rojas Aguirre  
Facultad de ciencias UNAM, Instituto de  
Investigaciones en materiales UNAM.

[albertoruiz@ciencias.unam.mx](mailto:albertoruiz@ciencias.unam.mx)  
[yareli.rojas@materiales.unam.mx](mailto:yareli.rojas@materiales.unam.mx)

## Resumen

**E**n la actualidad, la palabra nano ha adquirido gran popularidad debido a la creciente expectación que generan términos como el de nanotecnología o nanomateriales. Sin embargo, aunque existe una idea generalizada acerca de estos términos que involucra la creación de tecnología a escalas muy pequeñas, el porqué de su relevancia debe ser comprendido. Para poder entender la importancia de la nanotecnología es necesario hablar del concepto de nanoescala, que, aunque abstracto, resulta de fundamental importancia para entender los cambios en las propiedades de los sistemas a escalas atómicas y moleculares. En este artículo se explica la relación entre nanoescala y nanotecnología, la importancia de la relación área superficial-volumen y finalmente se presenta a las nanopartículas de oro como el ejemplo que evidencia el cambio de las propiedades ópticas en función del tamaño de dichas nanopartículas.

## Introducción

Desde el punto de vista de la Física, existen cuatro fuerzas fundamentales que permiten describir todas las interacciones presentes entre los diferentes constituyentes del universo. Estas fuerzas, , es la interacción electromagnética de la cual la ciencia tiene un mejor entendimiento. Esto no es casualidad, ni tiene relación con cuestiones históricas, más bien es consecuencia de la gran cantidad de situaciones en las cuales las interacciones electromagnéticas dominan los fenómenos. En efecto, todas las interacciones mecánicas, las reacciones químicas, así como la formación de diferentes materiales mediante la unión de átomos y moléculas son fundamentalmente interacciones de tipo electromagnético.

Después de lo anterior expuesto, resulta que la idea de manipular y organizar los átomos, de uno por uno, de forma deliberada para la creación de materiales con propiedades únicas, no es del todo irrealizable, siempre que dicha manipulación sea consistente con las leyes de la Física. Sin embargo, esta visión no es nueva. En 1959, en una conferencia impartida por el doctor en física

Richard Feynman en el Instituto de Tecnología de California (CALTECH), se habló sobre el control y la manipulación de las cosas a pequeña escala. En dicha plática, titulada "There's plenty of room at the bottom", se exponen ideas tales como el almacenaje de información en escalas atómicas, el uso de microscopios electrónicos para la escritura y lectura de dicha información, el reto de fabricar computadoras cada vez más pequeñas (miniaturización) y la creación de máquinas diminutas del tamaño de unos cuantos átomos (Feynman, 1960).

Esta última idea fue también explorada por el doctor Eric Drexler, en la cual concibe la creación de máquinas ensambladoras capaces de realizar copias de sí mismas, pero también de crear dispositivos útiles y con aplicaciones en diferentes áreas tales como la medicina o la computación (Drexler, 1986).

Esta tarea de miniaturización de la tecnología resulta sumamente interesante, debido a que el comportamiento de los sistemas a escalas cada vez menores cambia de forma considerable, pues cuando se reduce el tamaño de los materiales, se observa que sus propiedades y las interacciones con otros sistemas






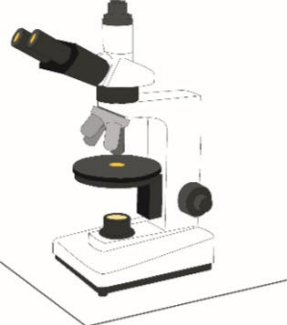
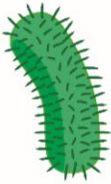

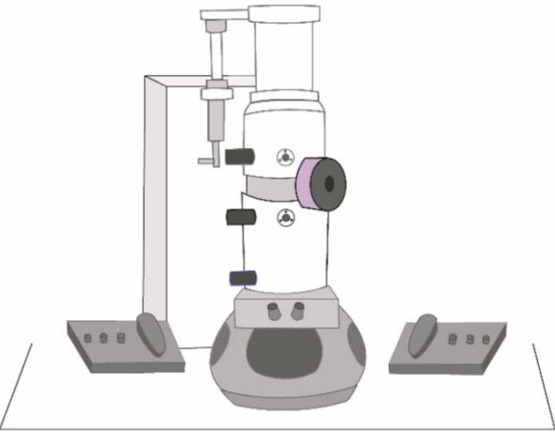
Tamaño (nm)	Su observación es:
<p>Pelota de Tenis ~ 100,000,000 nm</p>  <p>Cabello humano ~ 100,000 nm</p> 	 <p>A simple vista.</p>
<p>Glóbulo rojo ~ 10,000 nm</p>  <p>Escherichia coli ~ 1,000 nm</p> 	 <p>Por medio de microscopios ópticos.</p>
<p>Virus de la rabia ~ 100 nm</p>  <p>Ácido desoxirribonucleico ~ 2 nm (ADN)</p> 	 <p>Por medio de microscopios electrónicos (escalas atómicas y moleculares).</p>

Figura 1. Comparación del tamaño (en nm) de diferentes objetos. A escalas más pequeñas es necesario el uso de instrumentos más sofisticados como microscopios electrónicos de transmisión, microscopios de fuerza atómica o microscopios de efecto túnel (Murty et al., 2013).

128

no permanecen constantes (Schaefer, 2010). De hecho, en algunos casos en los que los sistemas están conformados por una cantidad pequeña de átomos, la teoría física necesaria para describir sus propiedades es distinta a aquella que es utilizada para el estudio de sistemas macroscópicos.

De particular importancia son los grandes avances que se han hecho, por ejemplo, en el campo de la computación, donde se ha logrado construir microprocesadores con una cantidad aproximada de  $2 \times 10^9$  transistores en un área de tan solo  $50 \times 20$  mm, lo cual ha significado un aumento en la capacidad de procesamiento de las computadoras, al mismo tiempo que se ha logrado reducir el tamaño de las mismas. Este es un ejemplo de la manipulación de la materia a escalas diminutas que ha impactado enormemente al ser humano (Ramsden, 2011).

Sin embargo, es la naturaleza la que ha inspirado al ser humano en su camino al desarrollo de tecnologías a pequeña escala. El trabajo realizado en áreas como la biología molecular ha puesto en evidencia una gran cantidad de situaciones en las cuales, estructuras cuyo tamaño se encuentra en

escalas micro y nanoscópicas, desarrollan funciones tan complejas y dinámicas como el transporte de moléculas, la catálisis de reacciones químicas (enzimas) o los procesos de autoensamblaje. En este sentido, la biología representa el paradigma para la creación de tecnologías a pequeña escala (Ramsden, 2011).

## Nanotecnología

El desarrollo de materiales a escalas atómicas o moleculares corresponde a la nanotecnología, la cual se define como el conjunto de disciplinas (Física, Química, Biología e Ingenierías) enfocadas en el estudio, manipulación y control de la materia a nivel atómico y molecular, para crear sistemas con propiedades físicas y químicas que superen a los materiales en bulto (Covarrubias, Meza & Rojas, 2019).

La palabra nano, de origen griego y que significa "enano", se utiliza como prefijo para indicar que cierta medida corresponde a una milmillonésima parte de la unidad. De esta forma, un nanómetro, cuyo símbolo estándar de acuerdo al SI es nm, corresponde exactamente a  $1 \times 10^{-9}$  m. La nanoescala, estrictamente hablando, abarca de 1

a 1000 nm, sin embargo, hace referencia a estructuras en las que al menos una de sus dimensiones se encuentra entre 1 y 100 nm (nanomateriales), ya que es en estas dimensiones donde la materia presenta propiedades distintas a las de los materiales en bulto (Murty et al., 2013; Schaefer, 2010). Sin embargo, existen estructuras poliméricas entre los 200 y 500 nm que pueden presentar características distintivas y, por lo tanto, se podrían también considerar como nanomateriales. De acuerdo a su dimensionalidad, los nanomateriales pueden ser clasificados en una de las siguientes cuatro categorías: 0-D, en la cual todas las dimensiones del nanomaterial se encuentran en la nanoescala; 1-D, que corresponde a sistemas con una dimensión que no se encuentra en la nanoescala; 2-D, que corresponde a sistemas con dos dimensiones fuera de la nanoescala; y 3-D, en la cual todas las dimensiones del material se encuentran en una dimensión mayor a la nanoescala por lo que se considera como un material en bulto (Covarrubias et al., 2019; Murty et al., 2013).

Ya que los nanomateriales presentan todas o alguna de sus dimensiones en la esca-

la nanométrica, es necesario el uso de herramientas adecuadas para conocer su estructura, tamaño y en algunos casos su composición.

Una de estas herramientas es la microscopía (Kulkarni, 2015). Como se observa en la Figura 1, el análisis de los nanomateriales requiere de microscopios con una gran capacidad de resolución. El poder de resolución  $R$ , que representa la capacidad del microscopio de distinguir dos puntos de una imagen está dado por la ecuación 1:

donde  $\lambda$  es la longitud de

$$R = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1)$$

la radiación observada (luz, electrones) y  $NA$  es la apertura numérica que es una medida característica de cada microscopio (Jenkins, 1976).

En 1924, el doctor en física Louis de Broglie propuso que, asociada a cada partícula, existe una longitud de onda dada por la ecuación:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2)$$

donde  $h$  es la constante de Planck y  $p$  es el momento lineal de la partícula el cual es directamente proporcional a su velocidad.

Para electrones con la suficiente energía cinética, el momento lineal es tan grande que la longitud de onda asociada al electrón, dada por la ecuación 2, varía entre los 0.122 nm y 0.0122 nm. Usando un haz de electrones y campos magnéticos para la manipulación de dicho haz, se desarrolló el microscopio electrónico, el cual permite obtener imágenes de estructuras en la escala nanométrica, esto debido al incremento en la capacidad de resolución (Beiser, 2006; Jenkins, 1976). En la Figura 2 se resume el desarrollo de la microscopía electrónica.

Así, el desarrollo de la microscopía electrónica ha caminado de forma paralela con los avances en nanotecnología y esto ha

permitido obtener un mejor entendimiento de las propiedades de los sistemas a escalas nanométricas.

## La relación área superficial-volumen

Como ya se ha mencionado, las propiedades de los materiales no permanecen invariantes conforme se disminuye su tamaño. En particular, una característica que resulta fundamental en dichas propiedades es la razón  $s$ , que expresa la relación entre el área superficial  $A$  del material y su volumen  $V$  (Kattan, 2011):

$$s = \frac{A}{V} \quad (3)$$

Dicho en otras palabras,  $s$  es la cantidad de área super-

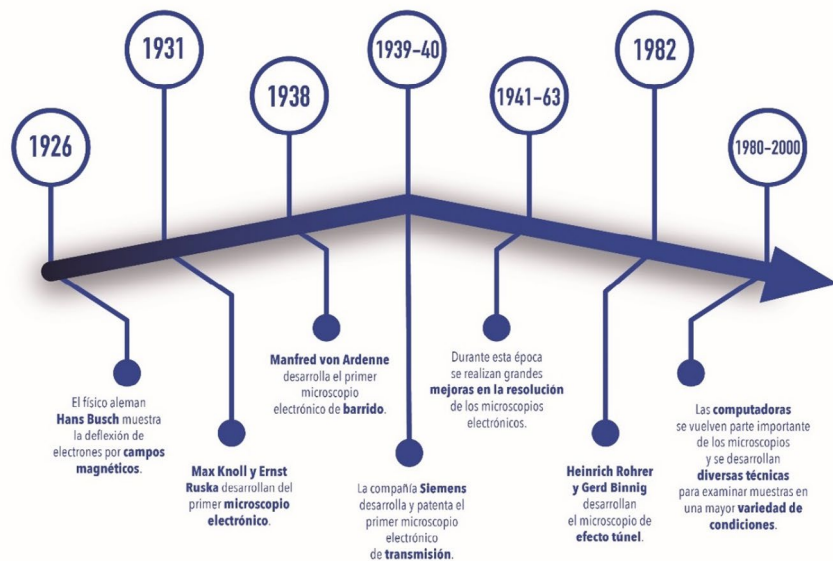


Figura 2. Desarrollo histórico de la microscopía electrónica (adaptado de Bozzola & Russell, 1999; Palucka, 2002)

ficial por unidad de volumen.

El por qué de la importancia del valor de  $s$ , radica en que las interacciones o reacciones químicas que se dan entre diferentes materiales ocurren entre las moléculas o átomos que se encuentran sobre su superficie.

Los constituyentes (átomos y moléculas) de tales materiales que se encuentran en la región exterior contribuyen mayoritariamente, mientras que los que se encuentran en el interior, contribuyen a estas interacciones de forma despreciable.

La ecuación 3 significa que, si el volumen disminuye en mayor proporción que el área superficial entonces la razón  $s$  se incrementa.

Para poner en perspectiva lo que se ha descrito, considérese una esfera de radio  $R$ . El área de dicha esfera está dada por la ecuación 4:

$$A = 4\pi R^2 \quad (4)$$

Mientras que su volumen puede calcularse a partir de la ecuación 5:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (5)$$

De las ecuaciones 3, 4 y 5 podemos calcular la razón entre el área superficial y el volumen en una esfera (Kattan, 2011):

$$s = \frac{3}{R} \quad (6)$$

La interpretación de la ecuación 6 es la siguiente: conforme se disminuye el radio de la esfera, existe un decremento en el área superficial, así como en el volumen, esto puede observarse de las ecuaciones 4 y 5. Sin embargo, este decremento ocurre más rápido en el caso del volumen y por lo tanto la razón  $s$  incrementa cuando el radio  $R$  disminuye. Es decir, que la cantidad de área superficial por unidad de volumen ha aumentado.

Aunque los nanomateriales no pueden considerarse como figuras geométricas perfectas debido a su es-

tructura atómica y molecular, el comportamiento de la razón área superficial-volumen de estructuras con alguna de sus dimensiones es similar al de una esfera. Véase por ejemplo la Figura 3. Cada esfera representa una nanopartícula constituida por átomos de un mismo elemento de radio  $r$ , los átomos en la superficie se muestran en color azul. En la primera esfera, la proporción de átomos sobre la superficie respecto al número total de los mismos es mucho menor que en la segunda esfera, en la cual se observa que el número de átomos sobre la superficie es comparable con el total

131

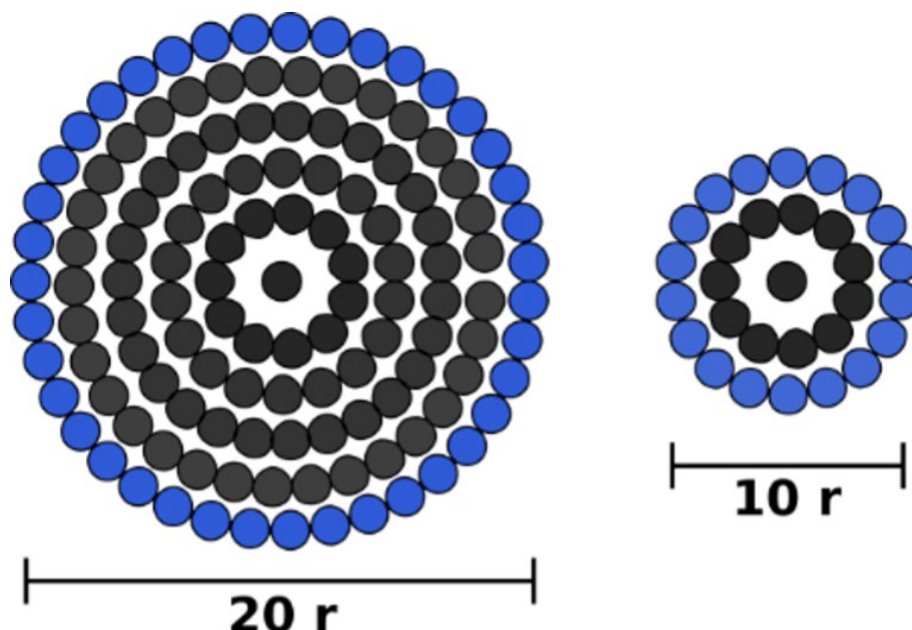


Figura 3. Razón área superficial-volumen. Conforme se disminuye el tamaño de la partícula, la proporción de átomos en la superficie respecto al número total de los mismos se incrementa.

de átomos que constituyen la partícula.

Esta es una visión simplificada de lo que ocurre en la realidad, ya que los materiales son estructuras tridimensionales con arreglos atómicos mucho más complejos, pero la imagen ilustra de manera simple la idea sobre el cambio en la razón entre el área superficial y el volumen de un material conforme se disminuye su tamaño.

Otra forma de observar el incremento en la razón área superficial-volumen,  $s$ , es considerando una cierta cantidad de material con volumen fijo. Este material presenta un área superfi-

cial que depende de la forma geométrica que asuma, pero si se divide dicho material en cantidades cada vez más pequeñas, la proporción de átomos en contacto con los alrededores aumenta y, por lo tanto, el área superficial. Ya que el volumen es constante, la razón  $s$  se incrementa. Esto se traduce en una mayor interacción con los alrededores. Esta idea se ilustra en la Figura 4.

## Los nanomateriales

De acuerdo con lo anterior, resulta evidente que, en el caso de los nanomateria-

les, la proporción de átomos sobre su superficie es mayor que la contenida dentro de su volumen. Por lo tanto, un mayor número de átomos, estarán disponibles para interactuar con sus alrededores. Como consecuencia, el comportamiento de un nanomaterial puede variar de manera significativa respecto a materiales con dimensiones mayores, lo cual se traduce en la modificación de sus propiedades (Theodore, 2005).

Un típico ejemplo en el cual se observa un cambio evidente en las propiedades, en este caso, ópticas, de las partículas conforme

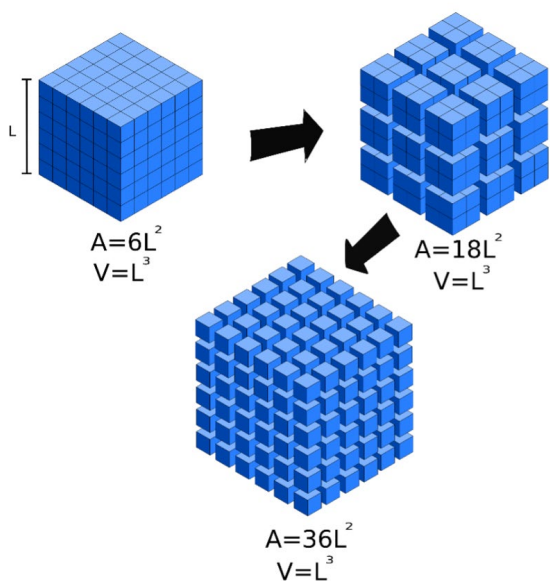


Figura 4. Incremento de la razón área superficial-volumen cuando se reduce el tamaño de las partículas. Este comportamiento se traduce en un aumento en la proporción de átomos en contacto con los alrededores.

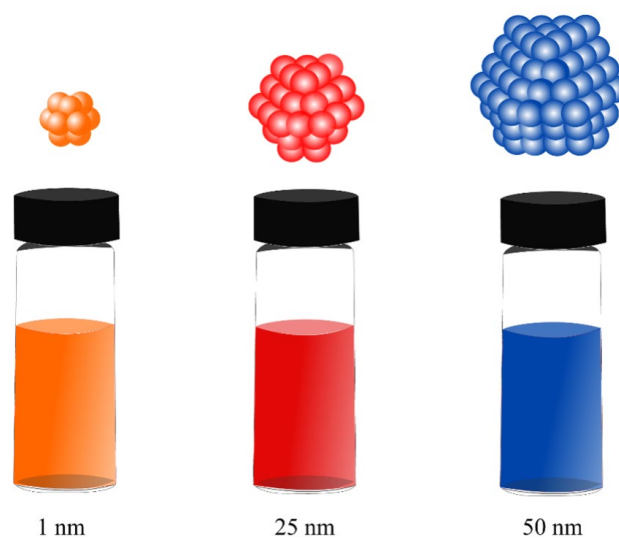


Figura 5. Nanopartículas de oro suspendidas en un medio líquido

se disminuye su tamaño, es el de nanopartículas de oro suspendidas en un medio fluido (Figura 5). Dependiendo del tamaño de dichas nanopartículas, el color de la luz reflejada por las mismas varía en un amplio intervalo del espectro electromagnético visible. Por ejemplo, las nanopartículas de oro cuyo diámetro es de 50 nm parecen azules al ojo humano, mientras que aquellas con un diámetro de 25 nm se observan de color rojo (Murty et al., 2013).

La explicación a tal fenómeno es relativamente simple; cada nanopartícula puede ser considerada como una red de iones positivos y fijos en el espacio, rodeados por una nube de carga negativa (electrones) la cual puede moverse libremente por la red. Si un campo electromagnético, en este caso luz, incide sobre la nanopartícula, el conjunto de electrones libres oscilará con la misma frecuencia de dicho campo, pero la amplitud de la oscilación dependerá de las características intrínsecas de la nanopartícula. Esta oscilación colectiva de los electrones se conoce como plasmón (Figura 6). Cuando la frecuencia de la luz incidente es igual a la frecuencia natural del material, se produce un

fenómeno de resonancia en el cual la amplitud de oscilación de los electrones es máxima. Esto se debe a que la luz de dicha frecuencia es absorbida por los electrones que oscilan, por lo tanto, el color de las nanopartículas, que se observa, corresponde a la radiación electromagnética que se refleja, la cual es de una frecuencia distinta. Si el tamaño de la nanopartícula aumenta o disminuye, la frecuencia a la cual ocurre la resonancia cambia y por lo tanto estas se observan de diferentes colores (Kulkarni, 2015).

Otro efecto interesante que se presenta en la nanoescala es el confinamiento

cuántico. En dicho efecto, los electrones presentes en los nanomateriales están restringidos a moverse en una región muy pequeña del espacio. A este respecto, destacan los quantum dots, que son nanomateriales 0-D en los que los electrones están confinados a una región puntual del espacio, es decir, que no tienen permitido moverse en ninguna de las tres direcciones espaciales existentes. Como consecuencia de este confinamiento, la distancia entre la banda de valencia y la banda de conducción presentes en materiales conductores o semiconductores incrementa conforme

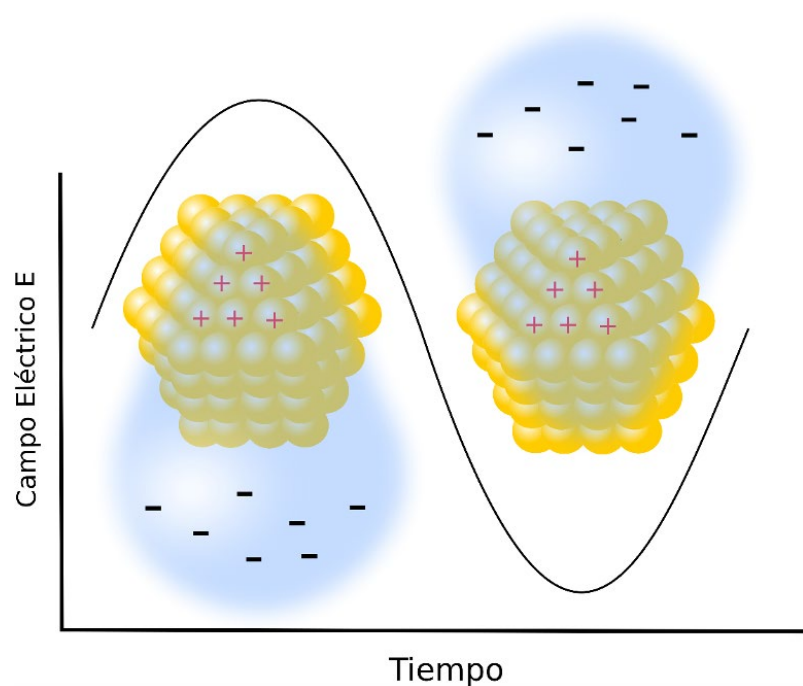


Figura 6. Interacción entre una nanopartícula y un campo electromagnético. La oscilación de la densidad electrónica debido a las ondas electromagnéticas se denomina plasmón.



se disminuye el tamaño de la nanopartícula. Esta relación entre el tamaño de la nanopartícula y el ancho de la banda prohibida permite manipular sus propiedades ópticas y electrónicas (Kulkarni, 2015; Yadav & Chaudhary, 2014).

## Conclusiones

La nanotecnología busca controlar la materia para explotar las propiedades que esta presenta en la nanoescala, las cuales, al manipularse y controlarse, pueden dar lugar a materiales en la macroescala, con atributos físicos y químicos que superen a aquellos que caracterizan a los materiales que conocemos hoy en día. Es así como la investigación, fabricación y utilización de nanomateriales son campos que han estado creciendo en las últimas décadas y son de gran interés para el sector industrial ya que se les ha considerado como los materiales de nueva generación.

A pesar del potencial e inimaginables aplicaciones que los nanomateriales pudieran tener, es importante tener en cuenta que las propiedades en la nanoescala son producto de la composición y el arreglo espacial de los átomos y moléculas que componen un material

determinado. El entendimiento de lo anterior, permitirá construir materiales de manera que se reflejen y exploten dichas propiedades. Por otra parte, entender la relación entre las propiedades de los nanomateriales y la nanoescala, resulta indispensable no solamente para evitar ideas fantasiosas y sensacionalistas al respecto, sino para lograr avances tecnológicos tangibles de manera multidisciplinaria.

## Bibliografía

- 1 Griffiths, D. (2008). 'Elementary Particle Dynamics'. *Introduction to elementary particles* (pp.55-56). Wiley-VCH, Weinheim Germany.
- 2 Feynman, R. (1960). *There's plenty of room at the bottom*. *Caltech Engineering and Sciences* 1, 22-36.
- 3 Drexler, K. E., (1986). 'Engines of Construction'. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. Anchor Books.
- 4 Schaefer, H. E. (2010). 'Introduction and Some Physical Principles'. *Nanoscience: The Science of the Small in Physics, Engineering, Chemistry, Biology and Medicine* ( pp. 1-7). Springer Berlin Heidelberg, Berlin.
- 5 Ramsden, J. (2011). 'What is nanotechnology?'. *Nanotechnology: an introduction* (pp. 7-13). Elsevier/William Andrew.
- 6 Covarrubias, S. M, Meza, P. L., & Rojas, A. Y. (2019). *La nanotecnología al alcance de tus manos*. *Revista Materiales Avanzados* 30, 66-71.
- 7 Murty, B. S., Shankar, P., Raj B., Rath, B. B. & Murday, J., (2013). 'The Big World of Nanomaterials'. *Textbook of Nanoscience and Nanotechnology* (pp. 3-7). Berlin, Springer Berlin Heidelberg.
- 8 Kulkarni, S. K. (2015). 'Analysis Techniques'. *Nanotechnology: Principles and Practices* (p. 135). Springer International Publishing.

9 Theodore, L. (2006). *Nanotechnology: basic calculations for engineers and scientists* (pp. 55-56). NJ, John Wiley & Sons, Inc.

10 Kattan, P. I. (2011). *Ratio of Surface Area to Volume in Nanotechnology and Nanoscience*. *Basic Nanomechanic Series*, (pp. 1-32). Petra Books

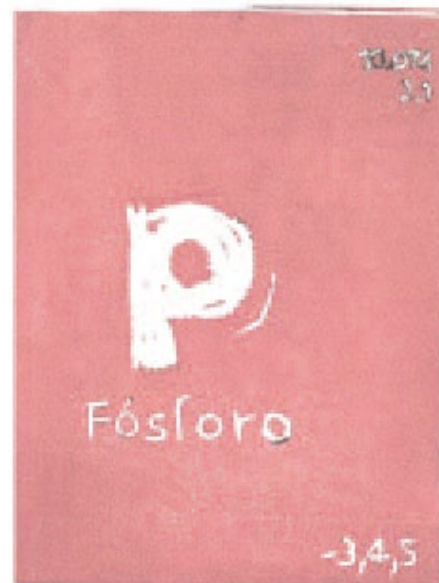
11 Jenkins, F. A., White H. E. (1976). 'Fraunhofer Diffraction by a Single Opening'. *Fundamentals of optics* (pp. 332-334). New York, McGraw-Hill Book Company,

12 Beiser, A. (2002). 'Wave Properties of Particles'. "Atomic structure", *Concepts of modern physics* (pp. 92-95). New York, McGraw-Hill.

13 J. J. Bozzola, L. D. Russell, (1999). 'The Past, Present, and Future of Electron Microscopy'. *Electron Microscopy: Principles and Techniques for Biologists* (pp. 2-14). Sudbury, Mass: Jones & Bartlett Learning.

14 Palucka, T. (2002). *Electron microscopy*. Recuperado de <https://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/ElecMicr.htm>

15 Yadav, M., & Chaudhary, A. (2014). *Quantum Dots: An Introduction*. *International Journal of Research in Advent Technology*, IAEISDISE 2014, 61-66.



Miguel Reina, Fósforo, grabado 2012. N° 19 MA