

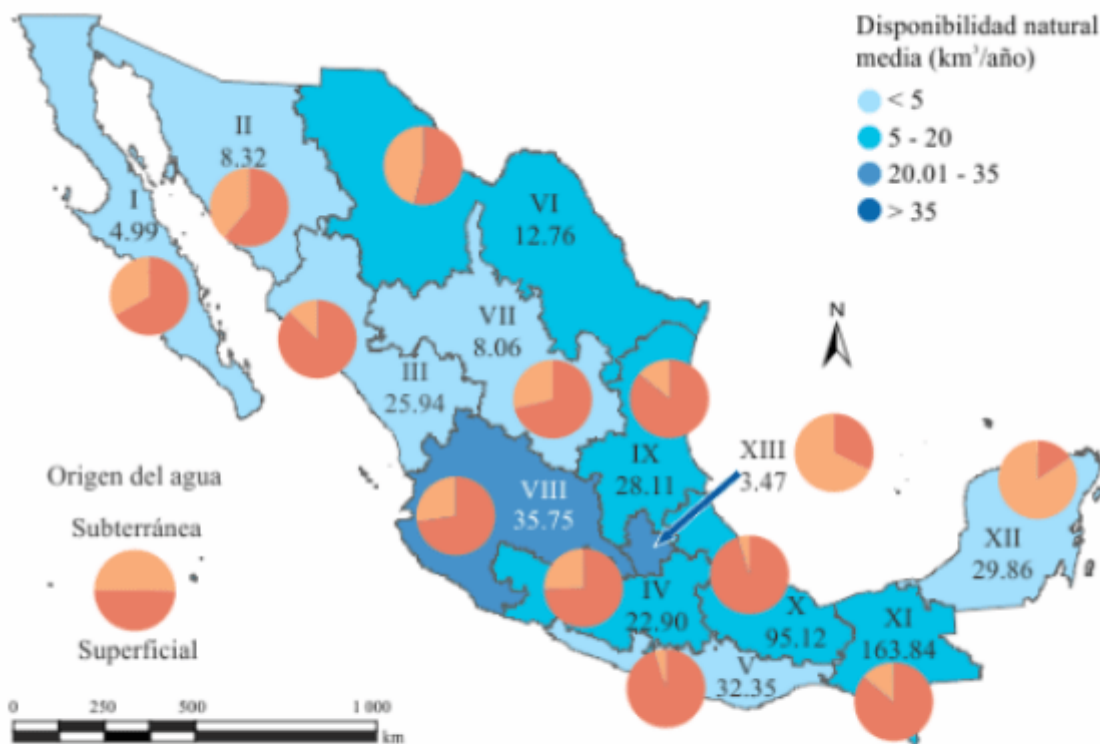
# FOTOCATÁLISIS Y GRAFENO: ¿ADIÓS A LA CONTAMINACIÓN?

*Posted on 5 agosto, 2020*

---

**Tag:** [Volumen 6 - Número 1](#)

Es bien conocido que las fuentes de agua, para nuestro consumo, son reducidas en comparación con el volumen de agua salada que hay en la Tierra. Sólo 3% del agua del planeta es agua dulce, encontrándose principalmente en glaciares, lagos, ríos, arroyos, entre otros. Gracias a la gran diversidad de ecosistemas con los que México cuenta, se considera como un país con una disponibilidad media-baja de agua por persona; sin embargo, existen zonas en el norte y centro del país en las que el acceso al agua es tan limitado que incluso puede hacerse una relación de 1 a 10, en comparación con los estados del sur, lo que significa que una persona en alguna ciudad del sureste podría disponer de la cantidad de agua que en el norte tendrían 10 personas juntas, como lo muestra la Figura 1.



**Región hidrológico-administrativa:**

I Península de Baja California; II Noroeste; III Pacífico Norte; IV Balsas; V Pacífico Sur; VI Río Bravo; VII Cuencas Centrales del Norte; VIII Lerma-Santiago-Pacífico; IX Golfo Norte; X Golfo Centro; XI Frontera Sur; XII Península de Yucatán; XIII Aguas del Valle de México.

Figura 1. Mapa de la disponibilidad del agua en México. [1]

A pesar de lo anterior, el consumo humano del agua no es la actividad con mayor demanda. Como podemos observar en la Figura 2, el agua se distribuye en los sectores agropecuarios, industrial, generación de energía y abastecimiento para la población, siendo el sector agropecuario el que más hace uso de ella. De toda el agua que se destina a estas actividades, aproximadamente el 40% no se aprovecha debido a fugas, malos hábitos de consumo, prácticas inapropiadas para el riego, etcétera. Otro factor importante a considerar es la contaminación, que cada día es mayor debido al vertido de residuos municipales, agrícolas e industriales, ya que en México tan solo del 20 al 30% del agua residual es tratada.<sup>[2]</sup>

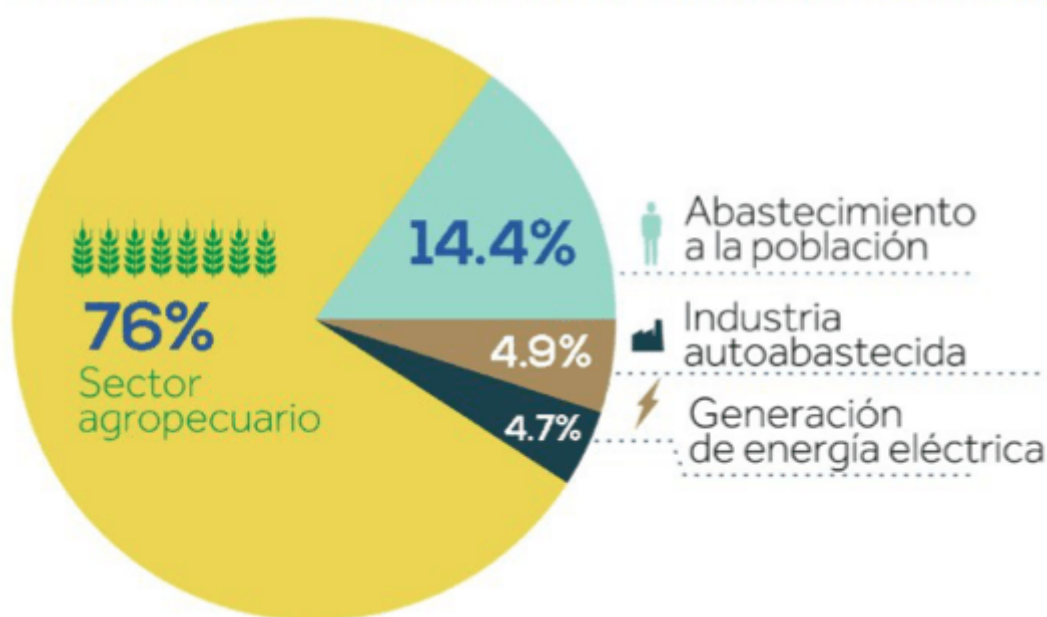


Figura 2. Distribución de los usos consuntivos del agua en México. [2]

Teniendo en cuenta estos factores, principalmente el de la contaminación, han surgido procesos para descontaminar el agua, los cuales son conocidos como “tratamientos de aguas” y constan, comúnmente, de tres etapas: los tratamientos primario, secundario y terciario. En el primario se busca retirar los componentes de mayor tamaño que se sedimentan como sólidos. El secundario sirve para convertir los componentes restantes en otros más fáciles de remover, y finalmente, con el tratamiento terciario se logra desinfectar el agua inactivando bacterias, virus y otros patógenos nocivos para la salud. <sup>[3]</sup>

Recientemente se han desarrollado nuevas técnicas para remover contaminantes de difícil tratamiento, como residuos farmacéuticos y cosméticos, metales pesados, colorantes, compuestos organoclorados y pesticidas, entre otros, lo cual ha dado como resultado tratamientos de aguas alternos como los que se esquematizan en la Figura 3 y que incluyen la filtración por membranas, el tratamiento por fangos activos, la fito y biorremediación, los tratamientos de oxidación avanzados y la fotocatalisis <sup>[4]</sup>, que es el tema que se abordará en este artículo.

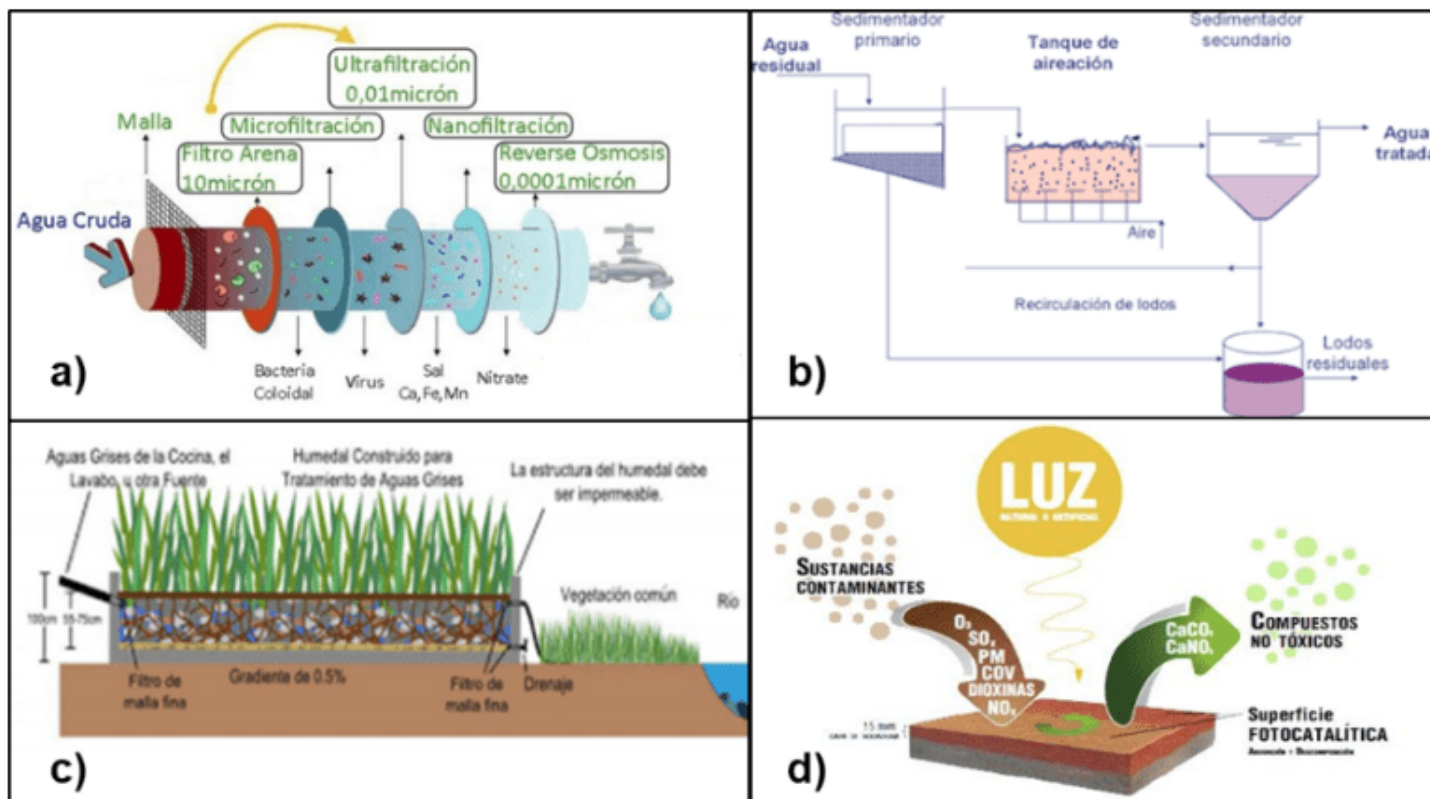


Figura 3. Tratamientos de aguas alternos. a) Filtración por membranas. b) Técnica de fangos activos. c) Fitorremediación. d) Fotocatálisis. Imágenes modificadas [5].

¿Qué es la fotocatalisis? Es un proceso en el que la luz facilita reacciones químicas en la superficie de un material llamado fotocatalizador (Figura 4) que pueden servir para destruir contaminantes presentes en el medio, generar hidrógeno e incluso electricidad. La mayoría de los materiales utilizados como fotocatalizadores son semiconductores, es decir, materiales que incrementan su conductividad eléctrica cuando son iluminados o calentados con una energía específica de cada material.

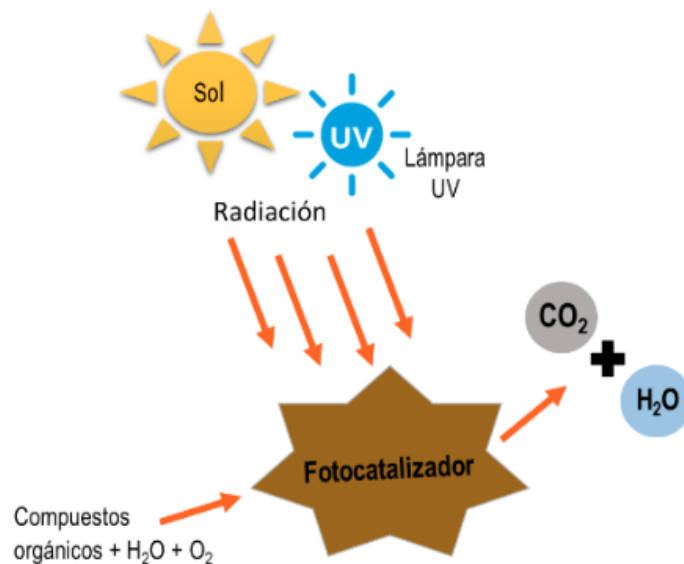


Figura 4

Los semiconductores generan partículas cargadas eléctricamente (electrones y huecos), cuando el material

se estimula con la energía adecuada como se presenta en la Figura 5. Una vez que se generan, los electrones y los huecos migran a la superficie del fotocatalizador y reaccionan energéticamente, logrando degradar los contaminantes presentes en el medio, llegando incluso a la mineralización de los mismos, es decir, a transformarlos en elementos fácilmente asimilables para las plantas. También puede ocurrir que los electrones y los huecos se recombinen antes de llegar a la superficie, lo que reduce la eficiencia de los fotocatalizadores.<sup>[6]</sup>

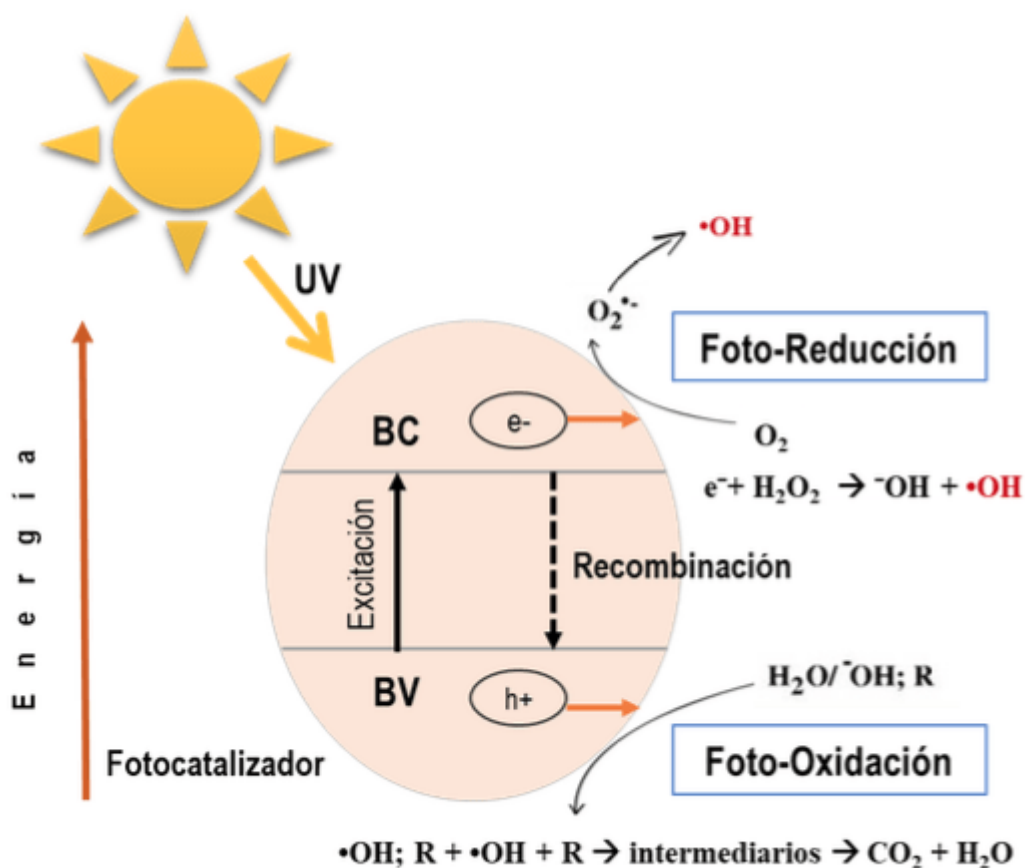


Figura 5. Representación del proceso fotocatalítico.

Para que un semiconductor sea útil para este proceso, debe cumplir un sinnúmero de requisitos. Por ejemplo, que la energía necesaria para activarse se encuentre dentro del rango de la que proporciona la luz del Sol, esto es, entre el visible y el infrarrojo; que no se degrade durante el proceso, lo que depende en parte de la energía a la cual se activa y a su propia naturaleza química; que no sea tóxico por obvias razones y que tenga una gran área activa para aumentar el contacto con los contaminantes que se desea degradar.

A pesar de que existen muchos semiconductores que cumplen todos estos requisitos, como el  $TiO_2$ , el  $ZnO$ , el  $WO_3$ , la mayoría de ellos solo reaccionan con luz ultravioleta, que es una pequeña parte de la radiación recibida por parte del Sol, como se observa en la Figura 6.<sup>[7]</sup> Esto se puede mejorar modificando los materiales con otra sustancia que absorba en el rango visible, como el grafeno.

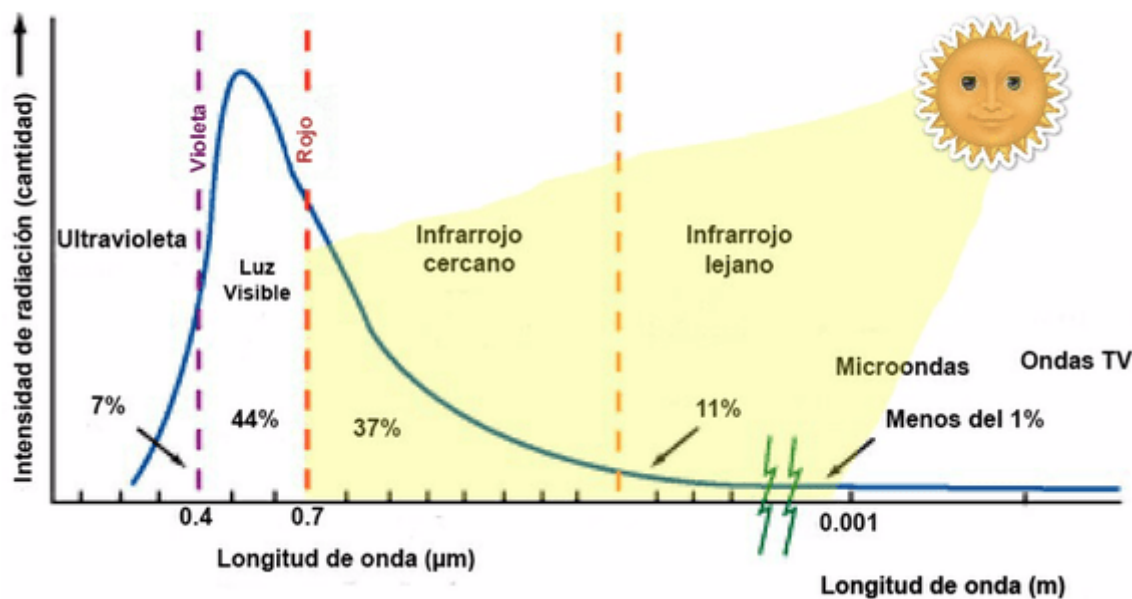
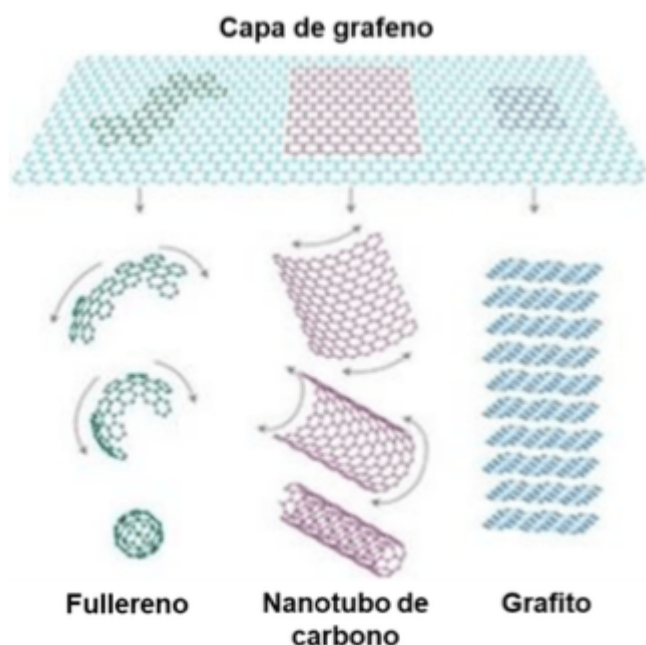


Figura 6. Espectro de radiación solar. Imagen modificada [8].

Por otra parte, los fotocatalizadores se suelen utilizar suspendiendo los polvos en las aguas contaminadas, por lo que para recuperarlos, después de tratar el agua, se requiere un paso de filtración, lo que consume tiempo y energía. Para evitar este paso, se ha propuesto incorporar los polvos a un soporte, pudiendo ser cerámico o polimérico.

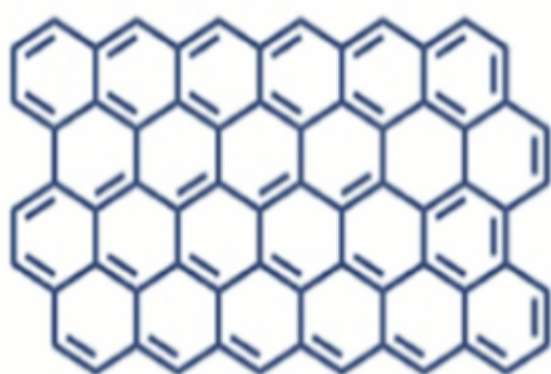


El grafeno es un nanomaterial bidimensional constituido por una capa de átomos de carbono posicionados hexagonalmente en forma similar a la de un panel de abejas; se puede decir que el grafeno es la estructura base para otros materiales grafiticos, ya que se puede "hacer bolita" formando fullerenos, "rollito" en forma de nanotubos o apilarse una lámina sobre otra, para formar grafito (Figura 7). El grafeno se considera un nanomaterial porque su espesor es menor a 1 nanómetro ( $10^{-9}$  m), aunque sus hojas puedan tener varios micrómetros cuadrados.

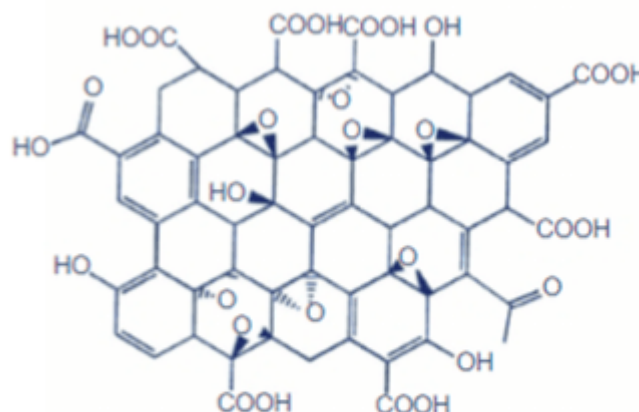
El grafeno tiene propiedades muy curiosas que le permiten utilizarse en diversos ámbitos; sin embargo, a los

"científicos fotocatalíticos" nos interesa su elevada movilidad de electrones y huecos que evita que los pares generados al iluminar el catalizador, se recombinen y se destruyan entre sí antes de salir a la superficie, y, además, su gran área superficial que permite que el fotocatalizador se distribuya en toda la hoja sin aglomerarse para que haya un mejor contacto con el medio. Estas características hacen del grafeno un buen aditivo para fotocatalisis.<sup>[10]</sup>

Sin embargo, el grafeno es un material que no reacciona fácilmente, por lo que si se quiere utilizar para nanocompuestos, es decir, mezclas heterogéneas de dos o más materiales de tamaño nanométrico, es necesario alterar sus propiedades, y trabajar con óxido de grafeno, el cual se puede obtener al oxidar y separar las hojas individuales del grafito (exfoliarlo), logrando adicionar grupos funcionales oxigenados en su estructura, en los que pueden reaccionar y depositarse nanopartículas fácilmente. En la Figura 8 se muestra la estructura de "panal de abejas" del grafeno. También se muestra la estructura del óxido de grafeno o GO, donde se observa que en los bordes y arriba y debajo de la hoja base, han aparecido grupos que contienen oxígeno.



**Grafeno**



**Óxido de grafeno**

Figura 8. Estructura del grafeno y óxido de grafeno. Imagen modificada [11].

En la Figura 9, a la izquierda, se muestra la imagen tomada de un microscopio electrónico de una hoja de grafeno; nótese que parece un papel arrugado. Esto se debe a que los grupos con oxígeno de cada hoja forman puentes entre sí. En la parte central se muestra otra imagen, pero de óxido de zinc o ZnO. El ZnO forma cristales hexagonales que pueden ser como "baldosas" planas, columnas alargadas e incluso "lápices" con punta o truncados; la cuestión es que, al estar aislados, los cristales se aglomeran y sólo están en contacto con el medio con las caras que dan hacia afuera. En la parte derecha de la Figura 9, se muestra una imagen de un compuesto de ZnO y GO. En él se ha formado el ZnO en los grupos con oxígeno del GO "decorándolo" y reduciendo al GO, quitándole parte de sus oxígenos, por lo que ahora se le llama rGO, u óxido de grafeno reducido. La decoración hace que las partículas sean más pequeñas y que estén distribuidas por toda la superficie de la hoja, lo que permite que haya una mayor área de contacto de las partículas con el medio y que cuando se formen pares electrón-hueco, éstos se separen en direcciones opuestas con menor recombinación y, por ende, mayor eficiencia para degradar contaminantes.

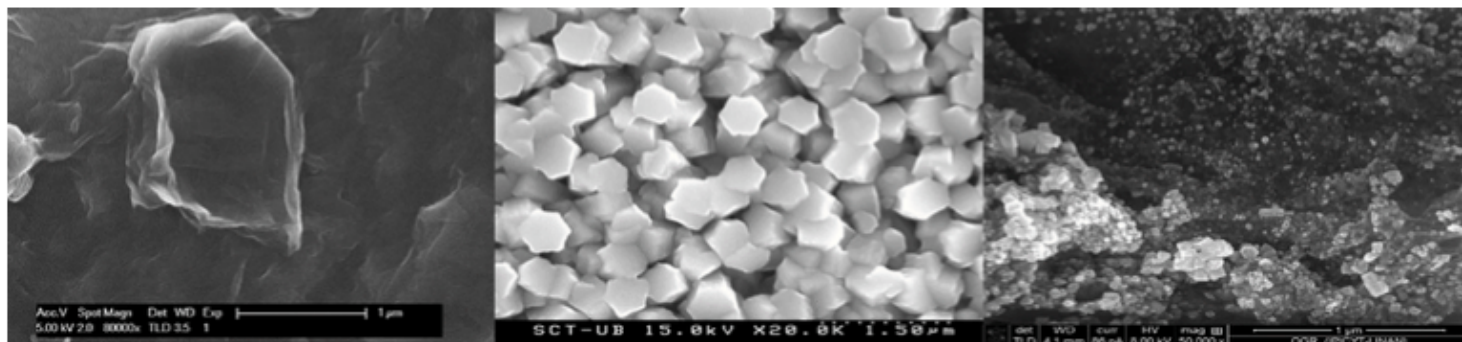


Figura 9. De izquierda a derecha se muestran micrografías de GO, ZnO y ZnO-rGO.

Los materiales fotocatalíticos usualmente se obtienen en polvos. El problema es que la degradación de los contaminantes mejora cuando los polvos son nanométricos, pero éstos son muy difíciles de filtrar. Una alternativa es compactar los polvos, aunque solamente el material de la superficie está en contacto con los contaminantes, lo que es muy ineficiente. Otra, es mezclar los polvos con diferentes materiales inertes para crear soportes en los que el fotocatalizador esté distribuido por toda la matriz, o también depositar el fotocatalizador sobre un soporte poroso como una esponja, y una más es crear tintas de los fotocatalizadores y "pintar" con ellas superficies sólidas. Ejemplos de catalizadores embebidos en un cerámico, depositados en un material poroso, y pintados sobre una superficie, se muestran en la Figura 10.

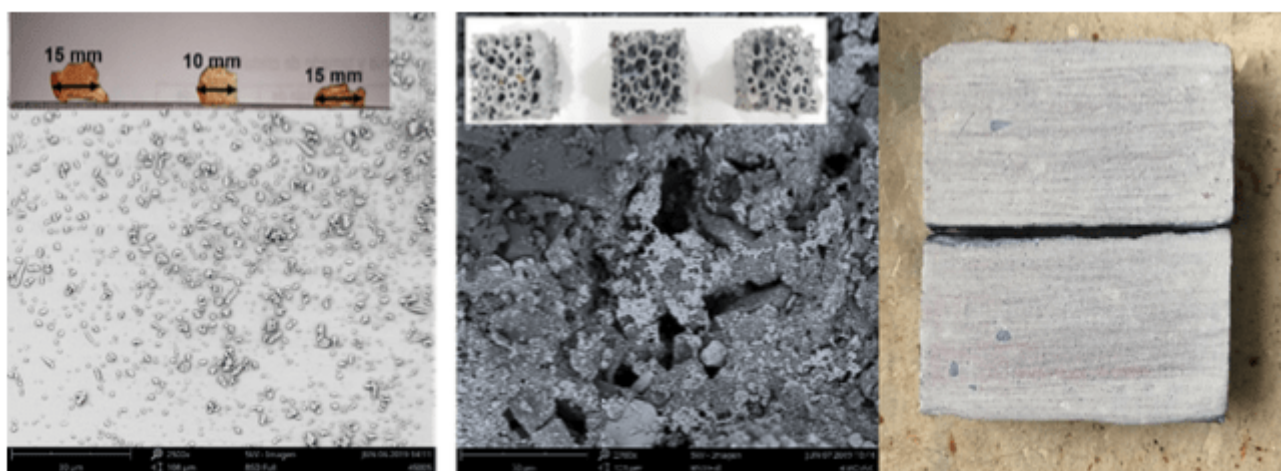


Figura 10. De izquierda a derecha, en la primera imagen se pueden apreciar monolitos de  $\text{SiO}_2\text{-WO}_3$ , recubrimientos de  $\text{WO}_3$  sobre espuma de SiC y  $\text{TiO}_2$  "pintado" sobre barro cocido. [6]

Un proyecto que se lleva a cabo en colaboración entre el CICATA-Altamira y el CICATA-Querétaro (ambos centros de investigación del Instituto Politécnico Nacional), propone la síntesis y uso de fotocatalizadores soportados. Uno de los materiales de interés es el compuesto de ZnO-rGO que se describió en la Figura 9, para la degradación de contaminantes en agua utilizando luz solar. Para obtenerlo, se emplea un método novedoso que utiliza acero galvanizado como fuente de zinc y bajas temperaturas ( $80^\circ\text{C}$ ); en sí, ésta es la parte atractiva del proyecto, ya que usualmente para conseguir este material los precursores se someten a



altas temperaturas (600° C). Otros materiales a estudiar en esta colaboración, son compósitos de  $WO_3$  y  $TiO_2$  con grafeno u otros semiconductores.

Los materiales, una vez sintetizados, se pondrán en forma de polvos en diferentes soportes, como barro cocido, vidrio (sustratos planos, o en forma de esferas), cuarzo y cerámicos. Otra propuesta es obtener piezas del compósito embebido en un polímero y fabricar piezas con gran área superficial por métodos de la llamada "manufactura aditiva". Los fotocatalizadores soportados se expondrán a la luz del Sol y se evaluará su capacidad para degradar diferentes contaminantes, como colorantes, fenoles, fármacos, entre otros. Otras aplicaciones interesantes podrían ser el tratamiento de aguas de estanques acuícolas y de aguas residuales domésticas, e incluso, la degradación de contaminantes presentes en el aire.

Existen un sinfín de materiales con cualidades idóneas para su uso como fotocatalizadores a los que el grafeno está prestándole sus maravillosas propiedades, y cada día surgen nuevos materiales con características mejoradas, por lo que se espera que estos desarrollos permitan, al paso de los años, ser una solución con la cual poder decir: ¡adiós a la contaminación!

---

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos SIP-IPN-20201575 y SIP-IPN-20201442.

---

## Referencias

- [1] Conagua, Semarnat. Estadísticas del agua en México. Edición 2013. Ciudad de México, México. 2014.
- [2] CONAGUA. (2017) Estadísticas del agua en México. Edición 2017. Ciudad de México, México.
- [3] Ceja, Z. (2019) Tratamiento de aguas residuales. INCyTU. Ciudad de México, México. Páginas 1-6.
- [4] Almar Water Solutions (2017) Nuevas tecnologías en aguas residuales. Recuperado de: <https://www.iagua.es/noticias/almar-water-solutions/nuevas-tecnologias-aguas-residuales>
- [5] López, A. (2012) ¿Cómo tratar el agua? México. Recuperado de: <http://elaguaesnuestra.blogspot.com/2012/05/como-tratar-el-agua.html>
- [6] Trejo, M. (2019) Síntesis de fotocatalizadores soportados de óxido de tungsteno por el método de sol-gel y su aplicación en la degradación de colorantes. Tesis de maestría. CICATA-Querétaro. Querétaro, México.
- [7] Candal, R. et al. (2005) Semiconductores con actividad fotocatalítica. Capítulo 4. Páginas 79 – 101.
- [8] Department of Agronomy, Iowa State University. (2020) Thermal Energy: Radiation Spectrum. Recuperado de <http://agron-www.agron.iastate.edu/courses/Agron541/classes/541/lesson09a/9a.3.html>

- [9] Berlanga, I. (2013) Síntesis y caracterización de nanomateriales 0D, 1D y 2D. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España. Páginas 87-89.
- [10] Gómez, W. (2013) Fonones flexurales: Ecuación de Dirac generalizada en grafeno curvo. Tesis profesional. Facultad de Ciencias de la UNAM, México. Páginas 11-19.
- [11] Geetha, R., et. al. (2019) Graphene-based 3D scaffolds in tissue engineering: Fabrication, applications, and future scope in liver tissue engineering. International Journal of Nanomedicine, vol. 14. Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos.