



Degradación oxidativa por reacciones fotocatalíticas: una alternativa para la mitigación de SARS-CoV-2

Miguel Lara Castro^a

Yessica Bautista Bautista^b

Rosa María Woo García^c

Ana Carem Bonilla Hernández^d

Resumen – La fotocatalisis es una reacción química inducida por la absorción de un material sólido, o fotocatalizador. La excitación del sólido desencadena dos reacciones que conducen a la formación casi instantánea de radicales hidroxilos y aniones superóxido (llamadas especies reactivas de oxígeno; ROS). Los ROS producen daño oxidativo en diversos microorganismos incluyendo al virus SARS-CoV2, favoreciendo la desintegración de la conformación proteica de la cápside, cambios en la permeabilidad y daños de la membrana del virión que finalmente conduce a rotura del ADN, sin la oportunidad de reparación. Incluso, la reacción fotocatalítica causa la degradación oxidativa contra materiales peligrosos orgánicos y/o inorgánicos en el aire para convertirlos en sustancias no dañinas como agua o dióxido de carbono.

Palabras clave – Fotocatalizador, Luz UV, SARS-CoV2, Dióxido de Titanio, ROS.

Abstract – Photocatalysis is a chemical reaction induced by the absorption of a solid material, or photocatalyst. The excitation of the solid triggers two reactions that lead to the almost instantaneous formation of hydroxyl radicals and superoxide anions (called reactive oxygen species; ROS). ROS produce oxidative damage in various microorganisms including the SARS-CoV2 virus, favoring the disintegration of the protein conformation of the capsid, changes in permeability and damage to the virion membrane that ultimately leads to DNA breakage, without the opportunity for repair. Even the photocatalytic reaction causes oxidative degradation against organic and/or inorganic hazardous materials in the air to convert them into non-harmful substances such as water or carbon dioxide.

Keywords – Photocatalyst, UV Light, SARS-CoV2, Titanium Dioxide, ROS.

CÓMO CITAR HOW TO CITE:

Lara Castro, M., Bautista Bautista, Y., Woo García, R. M., & Bonilla Hernández, A. C. (2022). Degradación oxidativa por reacciones fotocatalíticas: una alternativa para la mitigación de SARS-CoV-2. *Interconectando Saberes*, (13), 11-18. <https://doi.org/10.25009/is.v0i13.2732>

Recibido: 25 de noviembre de 2021

Aceptado: 20 de diciembre de 2021

Publicado: 31 de enero de 2022

^a Veratronics, México. E-mail: septmig@gmail.com

^b Veratronics, México. E-mail: yessicabautista193@gmail.com

^c Veratronics, México. E-mail: woo_rm@yahoo.com.mx

^d Veratronics, México. E-mail: bonillahz.24@gmail.com



INTRODUCCIÓN

El síndrome respiratorio agudo severo Coronavirus 2 (SARS CoV2) ha causado más de 4.5 millones de muertes a nivel mundial hasta finales de octubre del 2021. La elevada capacidad de transmisión se debe a que las cargas virales cuando una persona con esta afección habla o tose, pueden viajar una distancia superior a 2 metros y caer al piso, lo cual permanece viable e infeccioso hasta por 16 h (Tang et al., 2020). Tal como lo señalan, los estudios de Ong et al (2020) los pequeños aerosoles que puede generar un paciente sintomático al hablar o estornudar, fueron desplazados por los flujos de aire y depositados en las rejillas de ventilación en una sala de un hospital con una vida media de 2.3 a 17.9 h en acero inoxidable, plástico y nitrilo (Bedrosian et al., 2020). Para controlar su transmisión se han empleado tratamientos químicos y físicos; los productos de la oxidación fotocatalítica, peróxido de hidrogeno (H_2O_2), compuesto oxidante catalogado por el gobierno mexicano como un producto adecuado para desinfectar el ambiente de SARS-CoV-2.

La producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), como radicales hidroxilos y superóxido, se llevan a cabo mediante la reacción fotocatalítica del TiO_2 que consiste en la excitación con luz ultravioleta, provocando la adsorción de un fotón por parte del TiO_2 que genera que se promueva un electrón, de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de conducción. Los electrones de la banda de conducción interactúan con oxígeno del ambiente para dar iones superóxido. Finalmente, los radicales hidroxilos se forman de la interacción de agua del ambiente y un hueco. Este principio ha inactivado al virus de la influenza, el virus de la hepatitis C, SARS-CoV-2 y bacteriófagos (Nakano et al., 2012; Syngouna et al.,

2017; Khaiboullina et al., 2020; Tong et al., 2021). Incluso se ha estudiado ampliamente el fotocatalizador TiO_2 para la purificación del aire por contaminantes gaseosos, incluidos compuestos orgánicos volátiles, Por ejemplo, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, óxidos de cobre y óxidos de hierro (Talaiekhosani et al., 2021; Muangmora et al., 2021). Dicha preferencia por el TiO_2 puede explicarse por una serie de factores que incluyen el bajo costo, la facilidad de fabricación, biocompatibilidad, estabilidad química y el hecho de que es amigable con el medio ambiente (Bono et al., 2021). Debido a las propiedades fotocatalíticas, existen tres grupos de investigación que han presentado propuestas de diseño de prototipos para mitigar la transmisión indirecta del SARS-CoV-2, entre ellos: la empresa Veratronics, se encuentra en la fase de validación en pruebas in vitro. Wei-Hong Wang presentó una propuesta de patente US20060103316A1 que fue concedida en el 2008 de una lámpara fluorescente fotocatalítica provista de una película de recubrimiento de TiO_2 fase anatasa y la empresa Diasa Internacional S.A. de C.V. que presenta pruebas in vitro de tres dispositivos fotocatalíticos: Office 3001 (iON PROTECT), Home 50 (iON POWER) y HVAC-200 al 5000 (iON DUCT).

FUENTES ARTIFICIALES (LÁMPARAS UV) PARA ACTIVAR EL DIÓXIDO DE TITANIO

La fotocatalisis y fotosíntesis, aunque son diferentes mecanismos y procesos. Ambos necesitan luz ultravioleta para ser excitados, la clorofila al ser excitada por luz solar (680 nm) transforma el dióxido de carbono en oxígeno, mientras que al activar con luz solar o luz ultravioleta artificial superficies que son tratadas con TiO_2 , la reacción generada neutraliza los compuestos

tóxicos, e incluso causa estrés oxidativo en microorganismos con daños en la molécula de ADN (Figura 1). La inducción de la fotocatalisis es controlada por varios factores que influyen directamente para que el proceso sea eficiente: la intensidad de luz, la humedad relativa, la temperatura de la reacción y la concentración del catalizador.

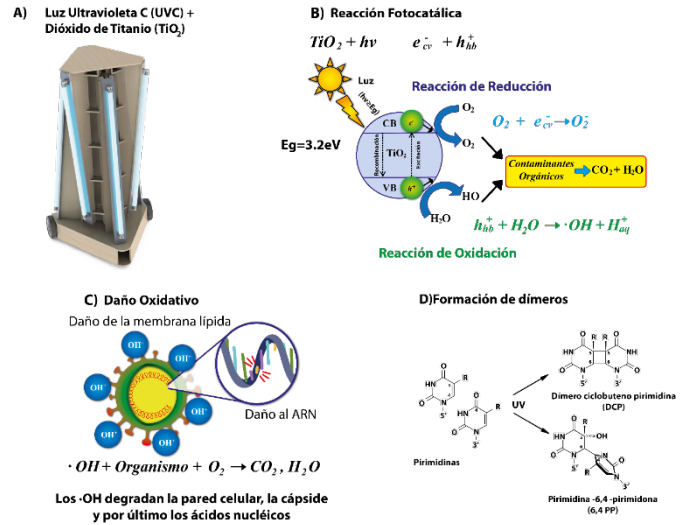
Para lograr el éxito de la fotocatalisis, el semiconductor que se define como cualquier clase de sólidos cristalinos, bajo ciertas circunstancias, permite el paso de corriente eléctrica de lo contrario se define como aislante.

La fotocatalisis es un proceso donde se convierte la energía de la luz en este caso UVC en energía química que va a generar a su vez reacciones de oxidación y reducción, esto a través de lámparas colocadas sobre una estructura mecatronica inteligente, tal como se muestra en el inciso A). Posteriormente, en la letra B) se indica que la luz irradiada sobre el dióxido de titanio provoca la adsorción de un fotón por parte del TiO_2 que genera que se promueva un electrón (e^-) de la banda de valencia (VB) a la banda de conducción (BC) dejando un hueco (h^+) en la banda de conducción (BC). Los electrones (e^-) de la banda de conducción (BC) interactúan con oxígeno del ambiente (O_2) para dar iones superóxido (O_2^-). Los radicales hidroxilos ($\cdot OH$) se forman de la interacción de agua del ambiente y un hueco (h^+). C) Los radicales hidroxilos ($\cdot OH$) inactivan al virus dañando el ARN, la conformación proteica y la membrana lipídica de este formando dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O). D) El virus DNA, las bases nitrogenadas son: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T) cuando están expuestas a luz UV dan lugar a fotodímeros llamados

dímeros de ciclobuteno pirimidina (DCP) y foto productos pirimidina-6,4-pirimidona (6,4 PP).

Figura 1

Mecanismo de acción de “tecnología luz ultravioleta y dióxido de titanio en microorganismos”



Cada uno de los semiconductores tienen diferentes intervalos de banda de energía para llegar a su cometido, por ejemplo, el intervalo de banda de energía del TiO_2 es de 3.0, 3.1 y 3.2 electronvoltios (eV) para cada fase cristalina de TiO_2 (rutilo, brookita y anatasa). Sin embargo, en algunas ocasiones para lograr los intervalos de energía de manera eficiente se dopan agregando otros metales (silicio, germanio, selenio, cadmio, galio, boro y carbono, el dopaje no metálico), y el acoplamiento con otros semiconductores. Dicho lo anterior, la oxidación fotocatalítica ocurre cuando la luz UV activa el dióxido de titanio y desencadena reacciones químicas que conducen a la formación casi instantánea de radicales hidróxilo y aniones superóxido. 1) El TiO_2 energizado con luz extrae un átomo de hidrógeno del vapor de agua en el aire (humedad). 2) Los radicales hidroxilos formados en la superficie tratada actúan como pac-men y atacan agresivamente los enlaces de hidrógeno de carbono que están presentes en todas las

moléculas orgánicas una y otra vez hasta que no queda nada de este proceso de oxidación excepto agua y una pequeña cantidad de CO₂. 3) Los aniones superóxido, uno de los agentes reductores más fuertes de la naturaleza, se forman cuando las moléculas de oxígeno en el aire interactúan con el TiO₂ con energía luminosa y reciben un electrón extra que crea oxígeno. Cuando el aire contaminado entra en contacto con una superficie tratada con TiO₂, estos aniones superóxido interactúan con el NO_x (el mayor gas de invernadero) y lo eliminan de la atmósfera reduciéndolo a nitratos benignos. Este proceso ocurre en milmillonésimas de segundo y continúa limpiando el aire siempre que haya luz, humedad, TiO₂ y flujo de aire.

APLICACIONES DE LUZ ULTRAVIOLETA Y DIÓXIDO DE TITANIO

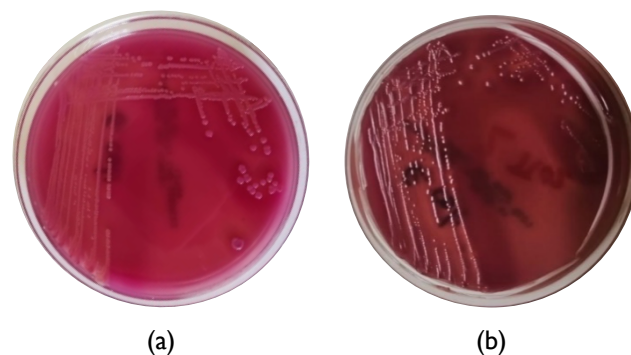
Hoy en día, las reacciones resultantes (oxido-reducción) de la fotocatalisis, son capaces de convertir la materia orgánica (dióxido de carbono y agua) en radicales libres. Existen estudios de caso en que se han degradado compuestos orgánicos, compuestos fenólicos, pesticidas, colorantes, entre otros, en el medio acuático, en el aire, en el suelo y en microorganismos mediante las reacciones redox. Una de las aplicaciones interesantes es: la biorremediación de suelos contaminados tal es el estudio de Effendi (2019), en que la adición de 2% de TiO₂ fue suficientemente significativa para mejorar las tasas de eliminación de petróleo crudo en el suelo. Así mismo, la remediación fotocatalítica se ha considerado una poderosa herramienta para degradar los hidrocarburos aromáticos policíclicos presente en algunos agroquímicos causando contaminación en los suelos (Xuekai et al., 2021). Esto se convierte una alternativa

interesante ya que al compararla con la biorremediación mediante el uso de microorganismos en ocasiones se vuelve poco redituable y rápida.

Otro de los potenciales del TiO₂ es el recubrimiento de exteriores: recubrimientos para techos, revestimientos de suelos y de empaques. Además, ha sido el pigmento más utilizado en la industria alimentaria para blanquear e incrementar la vida durabilidad del producto. Las reacciones fotocatalíticas son también útiles para la desinfección, de esta forma existen numerosos reportes indicando que la inactivación exitosa tanto de virus como de bacterias. El caso modelo más analizado ha sido *Escherichia coli* por su tolerancia a luz ultravioleta (Figura 2), de virus de la influenza aviar H1N1 y de SARS. Por lo tanto, la aplicación de nuevas tecnologías utilizando TiO₂ acoplado como fotocatalizador podría ser una buena alternativa para evitar los principales inconvenientes de los métodos de tratamiento y desinfección convencionales.

Figura 2

Crecimiento de colonias Escherichia coli en placa de cultivo, medio MacConkey



Nota. A) Tratamiento control. B) Tratamiento con luz ultravioleta durante 4 horas. El crecimiento microbiano se inhibe con respecto a la muestra de control, indicando la acción de la luz UVC y TiO₂.

EFFECTO DE LA FOTOCATÁLISIS EN LA INACTIVACIÓN DE MICROORGANISMOS

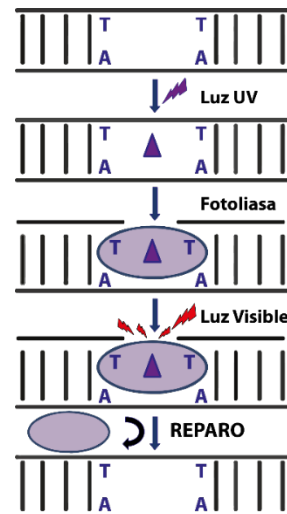
La reacción inducida por la luz UV-C (100-279 nm) desencadena la generación de fotoproductos que conducen a cambios estructurales y funcionales en ácidos nucleicos causando defectos en la replicación del ADN, transcripción y traducción (el resultado, daría a una proteína no funcional). Provocando incapacidad de metabolizarse y replicarse, por lo que ya no pueden causar enfermedades o deterioro. El efecto de la luz UV-C en el ADN, dan lugar a dímeros de ciclobuteno pirimidina y pirimidina-6,4-pirimidona (6,4 PP), una vez generados ambos dímeros, son responsables de la distorsión de la doble hélice al perder un grupo amino o en la eliminación de bases, una base puede convertirse en otra; por ejemplo, la desaminación de la citosina produce uracilo y adenina a hipoxantina. Estos cambios de bases pueden provocar la pérdida de material genético e inhibe la funcionalidad de la célula. Si la ruptura de la doble hebra ocurre en una región codificante, es decir, libre de intrones y codones de paro. Las inserciones y deleciones originadas pueden ocasionar un corrimiento del marco abierto de lectura, con la posible aparición de un codón de paro y la consecuente producción de una proteína usualmente no funcional (Sun et al., 2016).

El mecanismo de inactivación fotocatalítica se basa en tres principios (i) ataque de la pared celular por especies reactivas de oxígeno, (ii) desorden de la membrana citoplasmática interna, y (iii) degradación de los componentes intracelulares. En la primera etapa, el daño a la pared celular permite la fuga de moléculas pequeñas como los iones que causan cambios en la permeabilidad celular y rotura de la membrana. Las ROS pueden penetrar más en la célula, de modo que puede

producirse la degradación de los componentes internos, seguida de una mineralización completa. El proceso de degradación puede ocurrir progresivamente con la capacidad de degradar las proteínas de la cápside, causar daño en la membrana y degradación de los ácidos nucleicos, que en última instancia conducen a la inactivación de las partículas virales. Sin embargo, la luz UV por sí sola no ha sido del todo exitosa debido a mecanismos de reparación de ADN, una de las enzimas encargadas de la reparación son las fotoliasas, estas poseen dos cromóforos que ayudan a captar un fotón, cuya energía es utilizada para revertir el dímero que se produjo para reparar el ADN (Figura 3). Por lo tanto, la tecnología fotocatalítica se basa además en la degradación de dichas enzimas evitando la reparación de ADN. Asimismo, la radiación UV (longitud de onda entre 250 y 320 nm), puede ocasionar alteraciones químicas en las bases del ADN que causan efectos deletéreos como la inhibición de la replicación y de la transcripción, el aumento en la aparición de mutaciones, la detención del ciclo y la muerte celular.

Figura 3

Los efectos mutagénicos generados por la radiación UV son revertidos por un proceso llamado fotorreactivación



USO DE LUZ ULTRAVIOLETA CONTRA VIRUS DE SARS-COV-2

Se ha reportado que la radiación UV-C es eficaz para inactivar partículas virales. Con una lámpara de luz UV-C convencional (254 nm) se encontró que con una dosis de luz de UV de 1.1 mJ/cm² puede inactivar el 95% del virus de la influenza H1N1 transmitido por el aire. También la radiación UVC ha tenido éxito en la inactivación de coronavirus humanos. Se descubrió que el virus del SARS-CoV se inactivaba eficazmente cuando se exponía a una dosis luz UV-C de 3,6 J/cm² durante 15 min o una dosis de irradiación tan baja como 7 mJ/cm², mientras que se ha reportado la inactivación completa de MERS-CoV después de una exposición de 5 minutos a la luz UV-C (Bono, 2021). Los ejemplos mencionados y otros apuntan a que el SARS-CoV-19 puede ser inactivado por la luz UV-C.

Un estudio realizado por Heilingloh, et al. (2020) indicó que se podía lograr la inactivación del 50% de la muestra de SARS-CoV-2 luego de exponer el virus a una combinación de 1,904 mJ/cm² de luz UVC y 0,54 mJ/cm² de luz UVA. Para la inactivación completa del virus se necesitó una exposición de 9 minutos a luz UV-C y una dosis emitida de 1048 mJ/cm².

USO TiO₂ Y LUZ UVC CONTRA SARS-COV-2

El dióxido de titanio soportado en una placa de vidrio en contacto con una alícuota de HCoV-NL63 colocado a diferentes tiempos bajo una lámpara UV-C (254 nm) fue inactivado en un menor tiempo que la muestra del virus solo en contacto con luz la luz UV-C. Dado que el HCoV-NL63 es un pariente cercano al SARS-CoV-2 se puede esperar que este se inactive de igual forma (Khaiboullina, et al., (2020).

Otro estudio mostro resultados favorables logrando la inactivación del 99% del SARS-CoV-2 utilizando una placa de vidrio recubierta con TiO₂ y una alícuota de virus irradiado durante 120 minutos mediante un LED de luz UVA (Matsuura, et al., 2021).

CONCLUSIONES

El TiO₂ se considera como uno de los fotocatalizadores más atractivos y adecuados para una alta actividad fotocatalítica en la desinfección de zonas contaminadas, agua y aire, bajo irradiación UV. Existe numerosa evidencia científica que presenta resultados favorables sobre la efectividad de desinfección de virus y bacterias sobre la dualidad de tecnologías basadas en luz UV y oxidación fotocatalítica como es el uso del dióxido de titanio. Asimismo, es importante resaltar el hecho de que durante la fotocatalisis no se libera dióxido de carbono, ni gases de efecto invernadero, por lo que se considera una tecnología verde al tener una huella medioambiental reducida.

Para lograr el éxito de desinfección se han desarrollado varias técnicas para la síntesis de fotocatalizadores de TiO₂, como el recubrimiento y el dopaje metálico para lograr llegar a banda de energía. Dicho lo anterior, la aplicación industrial de la fotocatalisis UV-TiO₂ se anticipa para el futuro debido a su alta actividad fotocatalítica, no toxicidad y fotoestabilidad. Esta técnica es capaz de eliminar completamente compuestos fenólicos en las aguas residuales y, en la desintegración de microorganismos, por lo tanto, supera los problemas de contaminación del agua y de enfermedades.

Finalmente, es preciso mencionar que existe evidencia que respalda el uso de TiO₂ en conjunto con la luz ultravioleta tipo C, sin embargo, aún se necesitan realizar más investigaciones para determinar las condiciones óptimas para la inactivación de ciertos contaminantes especialmente el SARS-CoV-2.

REFERENCIAS

- Bedrosian, N., Mitchell, E., Rohm, E., Rothe, M., Kelly, C., String, G., Lantagne, D. (2020). A Systematic Review of Surface Contamination, Stability, and Disinfection Data on SARS-CoV-2. *Environmental Science and Technology*, 55 (7), 4162–4173. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05651>
- Bono, N., Ponti, F., Carlo, P., Gabriele, C. (2021). Effect of UV Irradiation and TiO₂ Photocatalysis on Airborne Bacteria and Viruses: An Overview. *Materials*, 14 (5), <https://doi.org/10.3390/ma14051075>
- Effendi, A. (2019). Enhancing Bioremediation of Crude Oil Contaminated Soil by Combining With Photocatalytic Process Using TiO₂ as Catalyst. *International Journal of Geomate*, 17 (64), 100-107. <https://doi.org/10.21660/2019.64.46068>
- Heilingloh, C., Wilhelm, U., Schipper, L., Dittmer, U., Witzke, O., Yang, D., Zheng, X., Sutter, L., Trilling, M., Alt, M., Steinmann, E., Krawczyk, A. (2020). Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation, *American Journal of Infection Control*, 48 (10), 1273-1275. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.07.031>
- Khaiboullina, S., Uppal, T., Dhabarde, N., Subramanian, V. R., Verma, S. C. (2020). Inactivation of Human Coronavirus by Titania Nanoparticle Coatings and UVC Radiation: Throwing Light on SARS-CoV-2. *Viruses*, 13(1), 19. <https://doi.org/10.3390/v13010019>
- Matsuura, R., Lo, C., Wada, S., Somei, J., Ochiai, H., Murakami, T., Sairo, N., Ogawa, T., Shinjo, A., Benno, Y., Nakagawa, M., Takei, M., Aida, Y. (2021). SARS-CoV-2 Disinfection of Air and Surface Contamination by TiO₂ Photocatalyst-Mediated Damage to Viral Morphology, RNA, and Protein. *Viruses*, 13 (5), 942. doi: <https://doi.org/10.3390/v13050942>
- Muangmora, R., Kemacheevakul, P., Chuangchote, S. (2021). Titanium Dioxide and its Modified Forms as Photocatalysts for Air Treatment. *Current Analytical Chemistry*, 17 (2), 185-201. <https://doi.org/10.2174/1573411016666200131130152>
- Nakano, R., Ishiguro, H., Yao, Y., Kajioka, J., Fujishima, A., Sunada, K., Minoshima, M., Hashimoto, K., Kubota, Y. (2012). Photocatalytic inactivation of influenza virus by titanium dioxide thin film. *Photochemistry and Photobiology*, 11, 1293–1298. <https://doi.org/10.1039/c2pp05414k>
- Ong, S.W., Tan, Y.K., Chia, P.Y., Lee, T.H., Ng, O.T., Wong, M.S., Marimuthu, K. A. (2020). Surface Environmental, and Personal Protective Equipment Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) From a Symptomatic Patient. *JAMA*, 28;323(16):1610-1612. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.3227>
- Sun, Y., Li, J., Xia, L. (2016). Precise Genome Modification via Sequence Specific Nucleases-Mediated Gene Targeting for Crop Improvement. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1928. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01928>
- Syngouna, V.I., Chrysikopoulos, C.V. (2017). Inactivation of MS2 bacteriophage by titanium dioxide nanoparticles in the presence of quartz sand with and without ambient light. *Journal of Colloid and Interface Science*, 497, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.02.059>
- Talaiekhosani, A., Rezaia, S., Hyun K., Sanaye, R., Mohammad, A. (2021). Recent advances in photocatalytic removal of organic and inorganic pollutants in air. *Journal of Cleaner Production*, 278, 23895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123895>
- Tang, S., Mao, Y., Jones, RM, Tan, Q., Ji, JS, Li, N., Shen, J., Lv, Y., Pan, L., Ding, P., Wang, X., Wang, Y., MacIntyre, CR., Shi, X. (2020). ¿Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention, and control. *Environment International*, 144, 106039. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106039>
- Tong, Y., Shi, G., Hu, G., Hu, X., Han, L., Xie, X., Xu, Y., Zhang, R., Sun, J., Zhong, J. (2021). Photocatalyzed TiO₂ inactivates pathogenic viruses by attacking viral genome. *Chemical Engineering Journal*, 414, 128788. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128788>

Xuekai, S., Jie, B., Dianbo, D, Zhiping, F. (2021). UV Assisted Photocatalytic Remediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (Pahs) in Sewage Sludge Addition Soils Using Synthesized Nanometer Mixed-crystal TiO₂: Experiment and Simulation. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*,
<https://doi.org/10.1080/15320383.2021.1981822>