

# APÉNDICE

## LA FOTOCATÁLISIS FRENTE A HONGOS, BACTERIAS Y VIRUS

A la luz de la actual pandemia COVID-19, la pregunta de cómo limitar los brotes del virus en el futuro parece ser más relevante que nunca. La fotocatalisis con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ , en adelante) tiene el potencial de descomponer las moléculas orgánicas, que normalmente se ha venido utilizando para propósitos de autolimpieza y purificación del aire y del agua. De hecho, el  $\text{TiO}_2$  también exhibe propiedades desinfectantes y muestra buenos resultados en la degradación de bacterias, hongos y también virus (1). Watts et al. muestran que una desactivación efectiva del poliovirus con una suspensión de dióxido de titanio se logra después de 30 minutos de radiación de luz solar (2). Otros estudios han demostrado la degradación del Norovirus (3) y los virus de la gripe (4), entre otros.

La mayoría de los estudios sobre la degradación de virus se han efectuado en el contexto de tratamiento de depuración de aguas (5). Las investigaciones acerca de la posibilidad de auto desinfección de superficies con  $\text{TiO}_2$  para desactivar bacterias y virus son por regla general escasas, pero la investigación publicada muestra resultados prometedores. Zan et al. estudiaron la degradación del virus de la hepatitis B con placas de cerámica con revestimientos de  $\text{TiO}_2$ . Encontraron que después de un periodo de 4 horas, alrededor del 90% de ellas se destruyeron con una intensidad baja de luz UV e incluso con la luz diurna de una habitación (6). Nakano et al, mostraron que una película de  $\text{TiO}_2$  sobre cristal era eficaz en la eliminación del virus de la gripe (7). Placas de hormigón cargadas con  $\text{TiO}_2$  modificado presentan propiedades antibacterianas bajo irradiación con luz visible, según se ha publicado también en la literatura científica (8).

Mientras que la fotocatalisis es una técnica de desinfección de baja energía que no produce subproductos problemáticos, el principal problema de la desinfección mediante fotocatalisis es la degradación relativamente lenta. Estudios recientes se han centrado en superar este inconveniente mediante el uso de  $\text{TiO}_2$  dopado con iones metálicos. El  $\text{TiO}_2$  dopado con plata (Ag) demuestra tener una degradación más efectiva sobre bacterias y virus en agua (9). Existen diferentes explicaciones sobre el aumento de la eficacia del  $\text{TiO}_2$  dopado con plata, incluyendo la mayor producción del radical OH, lo que generaría el aumento de adsorción del virus, y la degradación microbiana con iones de plata  $\text{Ag}^+$  lixiviados del catalizador.

Además, el dopaje metálico es un método eficaz para extender la respuesta espectral del  $\text{TiO}_2$  hacia la luz visible, y poder utilizar una mayor parte del espectro solar (10). Zheng et al. mostraron que las nano fibras Cu- $\text{TiO}_2$  exhibían una alta eficacia de eliminación tanto del virus bacteriófago f2 como de la bacteria E.coli 285 bajo luz visible en agua (11). Además, el  $\text{TiO}_2$  dopado con determinados materiales con actividad desinfectante tiene la ventaja de permitir la actividad en la oscuridad, lo que le hace ser muy útil para interiores, donde las condiciones de luz son desfavorables. Los equipos de hospital autoesterilizantes son una perspectiva interesante de esta tecnología. Los estudios han mostrado resultados prometedores en términos de inhibición para

el crecimiento de bacterias al revestir los equipos con  $\text{TiO}_2$  dopado con plata, como catéteres, (12), lancetas (13) y mascarillas quirúrgicas (14) por mencionar algunos.

Las enfermedades virales transmitidas por el aire comportan la necesidad de desinfección del aire interior. Kim et al. presentaron un purificador fotocatalítico de flujo para aire interior utilizando un catalizador de paladio depositado en  $\text{TiO}_2$ , que mostró una inactivación eficiente de los virus MS2 en el aire (15), mientras que Daikadu demostró una degradación eficiente de los aerosoles de la gripe en el aire con placas de cerámica porosas recubiertas con  $\text{TiO}_2$  (16). En un futuro cercano, probablemente se verán muchas más soluciones de investigación y comerciales en materiales autodesinfectantes fotocatalíticos con fines clínicos, tratamiento de aguas residuales y materiales de construcción para inhibir el crecimiento de virus y bacterias en espacios públicos como hospitales, colegios, residencias de ancianos, estaciones de tren, etc. La desinfección fotocatalítica podría implementarse en nuestro día a día, en soluciones como teléfonos autoesterilizantes, los picaportes de las puertas, superficies de baños, etc.

El COVID-19 y otros virus respiratorios son una amenaza para aquellos que ya tienen un sistema inmune débil. Esto incluye ancianos, pero las estadísticas del brote del COVID-19 en China muestran que la tasa de letalidad se incrementa significativamente en personas que sufren enfermedades cardiovasculares, diabetes, enfermedades respiratorias crónicas, hipertensión y cáncer (17). Es digno de mención que exista una fuerte evidencia en la concordancia entre los altos niveles de contaminación atmosférica y el desarrollo de todas las enfermedades mencionadas (18, 19). Por lo tanto, vivir en una zona con niveles elevados de contaminación atmosférica debe indirectamente considerarse un factor de aumento de riesgo de infección viral. Después del brote del SARS<sup>1</sup> en 2002 se analizaron 5 regiones chinas diferentes con diferentes niveles de contaminación y se observaron tasas de mortalidad diferentes, oscilando entre el 3,84% en la región menos contaminada y el 8% en la región más contaminada. Los expertos subrayan que la tendencia está asociada a un alto nivel de incertidumbre; ya que variables como el estatus socioeconómico, el tabaquismo, la edad y el sexo no se consideran en el estudio (20). Sin embargo, las observaciones están de acuerdo con otros estudios que muestran una fuerte correlación entre los niveles de contaminación del aire y las admisiones hospitalarias debidas a virus (21). Hoy la OMS estima que 9 de cada 10 personas respiran aire contaminado, mientras que la contaminación del aire causa anualmente 4,2 millones de muertes, pero de eso no se habla mucho. ¿Quizás ahora sea el momento de crear más conciencia sobre este asesino silencioso?

### Aclaración sobre la desinfección versus esterilización.

Hay varias maneras de “limpiar” una superficie o soporte, dependiendo del nivel requerido de “limpieza”. La tabla 1 explica la diferencia entre higienización, desinfección y esterilización. Para propósitos cotidianos, la higienización elimina la suciedad y los microorganismos, sin embargo, en muchos casos la limpieza es imposible o insuficiente, como es el caso para fines clínicos y tratamientos de agua. La desinfección y la esterilización son técnicas diferentes para matar los microorganismos diferenciándose solo por el número de microorganismos que sobreviven, por lo que a menudo el límite entre desinfección y esterilización no está totalmente claro. El límite de la esterilización farmacopea es un posible microorganismo, según se establece en varios artículos sobre esterilizados (22). La esterilización completa es difícil de lograr y, por lo general, requiere

<sup>1</sup>La degradación del SARS-coronavirus fue revelada en un estudio chino por Han et al.[25], y hace referencia al estudio de Foster et al. [1].

**Tabla 1**  
**Los diferentes niveles de limpieza**

Método	Acción	Agentes utilizados	Ejemplos de aplicación
Higienización	Elimina microorganismos y suciedad	Agua, jabón y detergente	Limpieza "habitual"
Desinfección	Destruye microorganismos	Alcohol, peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, fenólicos, lodóforos	Para propósitos no clínicos (contacto con piel intacta etc) (23) tratamientos de agua potable (24)
Esterilización	Destruye todos los microorganismos y esporas	Vapor, peróxido de hidrogeno, ozono, óxido de etileno (ETO)	Para propósitos clínicos (penetra tejido estéril) (23) tratamiento para inyección de agua (24)

procedimientos altamente tecnológicos. La fotocatálisis se considera una técnica de autodesinfección en lugar de una técnica de autoesterilización. Foster et al. indican *"La habilidad de matar a todos los grupos de microorganismos sugiere que las superficies tienen el potencial de ser autoesterilizantes, particularmente cuando se combina el  $TiO_2$  con cobre o plata. Sin embargo, por ahora, sería correcto referirse a las superficies o dispersiones fotocatalíticas como autodesinfectantes más que autoesterilizantes"*, de ahí que adaptemos esta recomendación aquí (1).

[1] H. A. Foster, I. B. Ditta, S. Varghese, and A. Steele, "Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: Spectrum and mechanism of antimicrobial activity," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 90, no. 6, pp. 1847–1868, 2011, doi: [10.1007/s00253-011-3213-7](https://doi.org/10.1007/s00253-011-3213-7).

[2] R. J. Watts, S. Kong, M. P. Orr, G. C. Miller, and B. E. Henry, "Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater effluent," *Water Res.*, vol. 29, no. 1, pp. 95–100, 1995, doi: [10.1016/0043-1354\(94\)E0122-M](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)E0122-M).

[3] T. Kato, H. Tohma, O. Miki, T. Shibata, and M. Tamura, "Degradation of norovirus in sewage treatment water by photocatalytic ultraviolet disinfection," *Nippon Steel Tech. Rep.*, no. 92, pp. 41–44, 2005.

[4] H. Cui et al., "Photocatalytic inactivation efficiency of anatase nano- $TiO_2$  sol on the H9N2 avian influenza virus," *Photochem. Photobiol.*, vol. 86, no. 5, pp. 1135–1139, 2010, doi: [10.1111/j.1751-1097.2010.00763.x](https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00763.x).

[5] T. An, H. J. Zhao, and P. K. Wong, *Advances in Photocatalytic Disinfection*. 2017.

[6] L. Zan, W. Fa, T. Peng, and Z. kui Gong, "Photocatalysis effect of nanometer  $TiO_2$  and  $TiO_2$ -coated ceramic plate on Hepatitis B virus," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 86, no. 2, pp. 165–169, 2007, doi: [10.1016/j.jphotobiol.2006.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2006.09.002).

[7] R. Nakano et al., "Photocatalytic inactivation of influenza virus by titanium dioxide thin film," *Photochem. Photobiol. Sci.*, vol. 11, no. 8, pp. 1293–1298, 2012, doi: [10.1039/c2pp05414k](https://doi.org/10.1039/c2pp05414k).

- [8] M. Janus, E. Kusiak-Nejman, P. Rokicka-Konieczna, A. Markowska-Szczupak, K. Zając, and A. W. Morawski, "Bacterial inactivation on concrete plates loaded with modified TiO<sub>2</sub> photocatalysts under visible light irradiation," *Molecules*, vol. 24, no. 17, 2019, doi: [10.3390/molecules24173026](https://doi.org/10.3390/molecules24173026).
- [9] M. V. Liga, E. L. Bryant, V. L. Colvin, and Q. Li, "Virus inactivation by silver doped titanium dioxide nanoparticles for drinking water treatment," *Water Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 535–544, 2011, doi: [10.1016/j.watres.2010.09.012](https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.012).
- [10] J. Li, B. Xie, K. Xia, Y. Li, J. Han, and C. Zhao, "Enhanced antibacterial activity of silver doped titanium dioxide-chitosan composites under visible light," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2018, doi: [10.3390/ma11081403](https://doi.org/10.3390/ma11081403).
- [11] X. Zheng, Z. peng Shen, C. Cheng, L. Shi, R. Cheng, and D. hai Yuan, "Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO<sub>2</sub> nanofibers under visible light," *Environ. Pollut.*, vol. 237, pp. 452–459, 2018, doi: [10.1016/j.envpol.2018.02.074](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.074).
- [12] Y. Yao, Y. Ohko, Y. Sekiguchi, A. Fujishima, and Y. Kubota, "Self-sterilization using silicone catheters coated with Ag and TiO<sub>2</sub> nanocomposite thin film," *J. Biomed. Mater. Res. - Part B Appl. Biomater.*, vol. 85, no. 2, pp. 453–460, 2008, doi: [10.1002/jbm.b.30965](https://doi.org/10.1002/jbm.b.30965).
- [13] H. Nakamura, M. Tanaka, S. Shinohara, M. Gotoh, and I. Karube, "Development of a self-sterilizing lancet coated with a titanium dioxide photocatalytic nano-layer for self-monitoring of blood glucose," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 22, no. 9–10, pp. 1920–1925, 2007, doi: [10.1016/j.bios.2006.08.018](https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.08.018).
- [14] Y. Li, P. Leung, L. Yao, Q. W. Song, and E. Newton, "Antimicrobial effect of surgical masks coated with nanoparticles," *J. Hosp. Infect.*, vol. 62, no. 1, pp. 58–63, 2006, doi: [10.1016/j.jhin.2005.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.04.015).
- [15] J. Kim and J. Jang, "Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flowthrough indoor air purifier with short irradiation time," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 52, no. 5, pp. 557–566, 2018, doi: [10.1080/02786826.2018.1431386](https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1431386).
- [16] T. Daikoku et al., "Decomposition of organic chemicals in the air and inactivation of aerosol-associated influenza infectivity by photocatalysis," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 1469–1484, 2015, doi: [10.4209/aaqr.2014.10.0256](https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.10.0256).
- [17] M. Roser, H. Ritchie, and E. Ortiz-Ospina, "Coronavirus Disease (COVID-19) – Statistics and Research," 2020. .
- [18] B. Bowe, Y. Xie, T. Li, Y. Yan, H. Xian, and Z. Al-Aly, "The 2016 global and national burden of diabetes mellitus attributable to PM<sub>2.5</sub> air pollution," *Lancet Planet. Heal.*, vol. 2, no. 7, pp. e301–e312, 2018, doi: [10.1016/S2542-5196\(18\)30140-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30140-2).
- [19] WHO, "Ambient (outdoor) air pollution." [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed: 02-Dec-2020].
- [20] Y. Cui et al., "Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study," *Environ. Heal.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2003, doi: [10.1186/1476-069x-2-15](https://doi.org/10.1186/1476-069x-2-15).
- [21] J. Cienciewicki and I. Jaspers, "Air pollution and respiratory viral infection," *Inhal. Toxicol.*, vol. 19, no. 14, pp. 1135–1146, 2007, doi: [10.1080/08958370701665434](https://doi.org/10.1080/08958370701665434).

- [22] T. von Woedtke and A. Kramer, "The Limits of Sterility Assurance," *GMS Krankenhhyg. Interdiszip.*, vol. 3, no. 3, 2008.
- [23] W. A. Rutala and D. J. Weber, "Disinfection, sterilization, and antiseptics: An overview," *Am. J. Infect. Control*, vol. 44, no. 5, pp. e1–e6, 2016, doi: 10.1016/j.ajic.2015.10.038.
- [24] S. Moran, "Engineering science of water treatment unit operations," in *An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design*, 2018, pp. 39–51.
- [25] H. Wei et al., "The inactivation effect of photocatalytic titanium apatite filter on SARS virus," Sheng