



Nanomateriales a la vanguardia para combatir el virus SARS-CoV-2

Sánchez-López, Perla; Fuentes Moyado, Sergio; Petranovskii, Vitalii; Smolentseva, Elena

Nanomateriales a la vanguardia para combatir el virus SARS-CoV-2

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 29, núm. 4. Número especial “SARS-CoV-2”, 2022 | e180

Espacio del Divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Sánchez-López, P., Fuentes Moyado, S., Petranovskii, V. y Smolentseva, E. (2022). Nanomateriales a la vanguardia para combatir el virus SARS-CoV-2. CIENCIA *ergo-sum*, 29(4). Número especial “SARS-CoV-2”. <https://doi.org/10.30878/ces.v29n4a3>

Nanomateriales a la vanguardia para combatir el virus SARS-CoV-2

Nanomaterials at the forefront against the virus SARS-CoV-2

Perla Sánchez-López

Universidad Nacional Autónoma de México, México

perlasanchez@ens.cnyn.unam.mx

 <http://orcid.org/0000-0001-5295-4269>

Recepción: 23 de noviembre de 2022

Aprobación: 8 de abril de 2022

Sergio Fuentes Moyado

Universidad Nacional Autónoma de México, México

fuentes@ens.cnyn.unam.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-9843-408X>

Vitalii Petranovskii

Universidad Nacional Autónoma de México, México

vitalii@ens.cnyn.unam.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-8794-0593>

Elena Smolentseva*

Universidad Nacional Autónoma de México, México

elena@ens.cnyn.unam.mx

 <http://orcid.org/0000-0003-2562-9094>

RESUMEN

Se presentan los avances que tiene la nanotecnología en la lucha contra las enfermedades infecciosas con los mecanismos de transmisión viral, incluyendo el virus SARS-CoV-2. Se mencionan algunos ejemplos en el desarrollo de nuevos nanomateriales con propiedades biocidas que han demostrado sus efectos sobre un amplio espectro de microorganismos patógenos. En específico, se resaltan las propiedades antimicrobianas de nanopartículas de cobre (Cu) y plata (Ag) y su potencial uso en las mascarillas u otros equipos de protección personal para alcanzar el objetivo de aumentar la protección de la población contra el COVID-19.

PALABRAS CLAVE: equipo de protección primaria, nanomateriales, enfermedades infecciosas, SARS-CoV-2, prevención.

ABSTRACT

The advances that nanotechnology has against the infectious diseases with viral transmission mechanisms, including the SARS-CoV-2 virus are presented. Some examples are mentioned in the development of new nanomaterials with biocidal properties that have demonstrated their effects on a wide spectrum of pathogenic microorganisms. Specifically, the antimicrobial properties of copper and silver nanoparticles are highlighted, as well as their potential application in masks or other personal protection equipment to achieve the objective to increase the protection of the population against COVID-19.

KEYWORDS: primary protective equipment, nanomaterials, SARS-CoV-2, infectious diseases, prevention.

1. ESTADO DEL ARTE

Durante los últimos dos años la población de nuestro planeta ha vivido bajo condiciones de aislamiento debido a la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2 (del inglés *severe acute respiratory syndrome corona virus 2*). No es la primera pandemia que ataca al mundo, pues la humanidad en su historia se ha enfrentado a diez grandes pandemias, pero el último siglo concentra el mayor número de amenazas epidemiológicas, por ejemplo: la gripe

AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

*elena@ens.cnyn.unam.mx

española (1918-1920), la gripe asiática (1957-1958), la gripe de Hong Kong (1968), la infección VIH (desde los setenta), el ébola (desde 1976), el SARS (2002-2003) y el MERS (desde 2012) (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020). Surgen las preguntas: ¿Por qué? y ¿cuántas vidas han costado estas epidemias? El incremento de la población, el hacinamiento en las grandes ciudades y la facilidad de transportación de un país a otro han sido las posibles causas que han promovido la dispersión de estas epidemias.

Desde que el ser humano empezó a organizarse en comunidades, lo cual trajo consigo núcleos de personas que convivían juntos en el mismo territorio, las enfermedades contagiosas tomaron un especial protagonismo. Con el tiempo la población fue creciendo y las enfermedades se extendieron e invadieron otras regiones del planeta. En ocasiones, estas pandemias han transformado las sociedades en las que se originaron y han cambiado el curso de la historia al llevarse consigo a millones de víctimas. Algunas de estas pandemias han desaparecido cuando el virus perdió letalidad y mejoraron las condiciones de higiene, unas más se pudieron controlar con ayuda de una vacuna y otras la humanidad todavía no ha logrado vencerlas en su totalidad (VIH o MERS).

A pesar de que una posible pandemia de origen viral era temida y esperada en el mundo desde hace varios años, nadie estaba preparado para combatirla. El 31 de diciembre de 2019 el Ministerio de Salud de China notificó a la OMS sobre los primeros pacientes con “neumonía atípica grave”. Este hecho fue el inicio de lo que ahora se describe como una crisis global y una de las pandemias más devastadoras de los últimos tiempos. La OMS denominó esta enfermedad *COVID-19* (*coronavirus disease 2019*) el 11 de febrero de 2020 por el tipo de virus y el año de aparición. Desde el 11 de marzo de 2020 se declaró una situación pandémica mundial.

Ante la falta de medicamentos y vacunas para combatir la infección, una de las principales recomendaciones de protección personal que ha dado la OMS es el uso correcto de los equipos de protección personal (EPP): mascarillas, batas, guantes, pantallas protectoras etc., que se han convertido en los artículos imprescindibles para evitar el contagio no sólo entre el personal médico, sino también para el resto de la población. Sin embargo, en los primeros meses de la pandemia la gente se enfrentó con el problema de la falta de estos materiales. No había insumos suficientes para abastecer una demanda simultánea en el mundo, por lo que los costos de cubrebocas subieron significativamente. De este modo, es creciente la necesidad de encontrar nuevas medidas para la prevención y el tratamiento de amenazas como el SARS-CoV-2.

Se considera que la nanotecnología tiene un papel determinante en la lucha contra el COVID-19, y jugará uno más fundamental tanto en la prevención de las enfermedades como en el diagnóstico y en la mejora de los sistemas de administración de agentes antivirales. En este contexto, la nanotecnología ha funcionado y lo seguirá haciendo en el futuro como puente para el desarrollo de nanomateriales con aplicaciones médicas (Sahoo *et al.*, 2007).

Es bien sabido, que los metales como la plata tienen propiedades antibacterianas *per se* (Kim *et al.*, 2007; Yin *et al.*, 2020). Desde la antigüedad, la plata se ha utilizado como agente antimicrobiano. Los egipcios recurrían a ella para eliminar las bacterias y hongos en cisternas de agua y con ello lograban que se conservara por un largo tiempo. Durante muchos siglos, la plata ha sido empleada para evitar el contagio de enfermedades, aun sin conocer su mecanismo de acción.

Las nanopartículas de plata liberan continuamente iones de plata que penetran en la membrana de las células bacterianas y se unen con las proteínas. Debido a la atracción electrostática y la afinidad por las proteínas de azufre, los iones de plata pueden adherirse a la pared celular y a la membrana citoplasmática. Los iones adheridos mejoran la permeabilidad de la membrana citoplasmática y provocan su ruptura. Una vez que las células han absorbido los iones de plata, las enzimas respiratorias se desactivan y generan especies reactivas de oxígeno, lo cual interrumpe la producción de trifosfato de adenosina, un nucleótido fundamental en la obtención de energía celular. Como el azufre y el fósforo son componentes clave del ADN, la interacción de los iones de plata con ellos puede causar problemas en la replicación del ADN, la reproducción celular o incluso provocar la muerte de los microorganismos. Además, los iones de plata inhiben la síntesis de proteínas al desnaturalizar los ribosomas en el citoplasma (Khorrami *et al.*, 2018; Yin *et al.*, 2020). De esta manera, se evita el desarrollo de microorganismos patógenos.

El cobre ha demostrado un efecto similar a la plata. En los ensayos *in vitro*, el cobre mostró una eficiencia de 99.9% en desactivación de microorganismos durante las dos primeras horas de contacto con el metal (Prado *et al.*, 2012).

En la era de la nanotecnología, el comportamiento de los materiales a la nanoescala (10^{-9} m) es diferente y muchos de ellos presentan propiedades nuevas e interesantes; el cobre y la plata no están ajenos a esta tendencia. Sus propiedades a estas diminutas escalas son objeto de estudio en campos como electrónica, óptica, biología, microbiología, catálisis y medicina.

2. NANOPARTÍCULAS DE PLATA Y COBRE Y SU EFECTO ANTIMICROBIANO

La necesidad de buscar nuevas alternativas de tratamiento y control de agentes infecciosos deriva de la creciente resistencia bacteriana ante los antibióticos existentes, de la rapidez en las mutaciones de los virus y de la baja respuesta inmunológica de algunas personas, entre otros problemas.

Algunos microorganismos como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Candida albicans*, empleados comúnmente para pruebas antimicrobianas con nanomateriales, han permitido demostrar el potente efecto biocida de nanopartículas (NPs) de Ag y Cu. Sin embargo, las propiedades microbicidas de nanomateriales basados en plata o en cobre se siguen investigando sobre un amplio espectro de microorganismos patógenos para mitigar su propagación. Por ejemplo, en las últimas dos décadas, varias investigaciones han mostrado el potencial que tienen las NPs de Ag para inhibir al VIH-1 y al VIH-2 (Fayaz *et al.*, 2012; Ratan *et al.*, 2021).

Aunque el mecanismo de inactivación de los virus por efecto de NPs no ha sido totalmente esclarecido, a diferencia de otros microorganismos como las bacterias, la evidencia experimental muestra que algunos componentes de los virus (cubierta, RNA, etc.) son afectados por la presencia de las NPs. Dentro de los virus más letales se encuentran los subtipos de la influenza A (H1N1, H1N2 y H5N1). Estudios *in vitro* de NPs de Ag en contacto con subtipos de influenza A (Wieczorek *et al.*, 2020) muestran que además de la buena actividad antiviral de las NPs sobre estos virus, las NPs de Ag ayudan a reducir la muerte celular provocada por el virus. Por otra parte, las NPs de Cu basadas en Cu_2O , CuI, CuCl, Cu_2S , iones y otros óxidos, han sido probadas con los mismos propósitos (Carvalho y Conte-Junior, 2021; Jagaran y Singh, 2021; Pérez-Álvarez *et al.*, 2021; Román *et al.*, 2020; Tortella *et al.*, 2021a). Un estudio realizado con NPs de Cu_2O contra el virus causante de hepatitis C mostró que las NPs actuaban sobre todo interrumpiendo la etapa de adhesión del virus con la célula al bloquear los sitios de unión, es decir, las NPs interactuaban con las glicoproteínas y competían con los virus por los sitios de unión con la célula (Hang *et al.*, 2015). Recientemente, se ha demostrado que el coronavirus (SARS-CoV-2) y virus de la influenza (H1N1) al estar en contacto con superficies de cobre son inactivados minutos después de la exposición con este metal, lo que podría contribuir a reducir la propagación de estos patógenos (Cortes y Zuñiga, 2020).

Se estima que las NPs basadas en metales como Ag y Cu podrían llegar a jugar un rol crucial en la mitigación y tratamiento de enfermedades graves nuevas y ya existentes (Elkodous *et al.*, 2019; Pilaquinga *et al.*, 2021; Tortella *et al.*, 2021b). Adicionalmente, el efecto sinérgico que se genera al combinar ambos metales ayuda a lograr un efecto antimicrobiano más fuerte para combatir el virus.

Lo anterior son algunos ejemplos del potencial que tienen las NPs de Ag y Cu para inhibir virus incluyendo el del SARS-CoV-2 (Ahmed *et al.*, 2021; Rius-Rocabert *et al.*, 2022; Bello-Lopez *et al.*, 2021). Es importante mencionar que la concentración de estos metales es uno de los parámetros más significativos para que sean efectivos y puedan ser aplicados en biomedicina, microbiología, desinfección o bien en el diseño de dispositivos como filtros, mascarillas e equipo de protección personal. Asimismo, se siguen explorando nuevos métodos de síntesis de las NPs (físicos, químicos, fotoquímicos y biológicos o “verdes”) (Zahoor *et al.*, 2021) para optimizar sus propiedades.

3. INCORPORACIÓN DE NANOMATERIALES EN TEXTILES

Con el desarrollo de la nanotecnología y el diseño de diferentes tipos de nanomateriales la industria textil ofrece en la actualidad materiales con alguna característica específica para elaborar las prendas con propiedades mejoradas como la durabilidad, la resistencia al agua y sustancias químicas, el desgaste, el control de la temperatura, las propiedades antiestáticas y la autolimpieza, etc. Surgen las preguntas: ¿Cómo los nanomateriales pueden proporcionar esas características a la prenda? y ¿cómo es posible elaborar los textiles cuyos hilos combinan fibras con el nanomaterial? Existen cuatro grandes campos dentro del sector textil en los que se aplican avances nanotecnológicos: *a)* obtención de nanofibras a partir de electrohilado, *b)* ensamblaje de distintos componentes, *c)* funcionalización de fibras sintéticas con nanopartículas, *d)* funcionalización de tejidos mediante procesos de acabado en que se emplean complejos nanoestructurados.

Efectivamente, la ruta más simple es imitar diseños que ofrece la naturaleza. Es bien sabido que las hojas de algunas plantas tienen propiedades repelentes al agua o polvo. Es posible transferir las propiedades repelentes a las prendas modificando con los componentes involucrados en estos mecanismos (Singh *et al.*, 2017).

Otra ruta es usar algún método de síntesis que permite la producción de nanofibras de polímeros o fibras con NPs o nanotubos. La técnica de electrohilado ha demostrado su eficiencia para producir nanofibras con diámetros menores a un micrómetro. Con ellos se forma una densa red similar a una telaraña capaz de capturar las partículas virales muy pequeñas. Por otro lado, se pueden modificar las nanofibras con diversos tipos de nanopartículas, incluyendo plata o cobre, que son capaces de desactivar los patógenos capturados (Weiss *et al.*, 2020).

La técnica más innovadora para producir el hilo reforzado con nanomateriales fue aplicada por investigadores de la Universidad de Tsinghua, en Beijing, quienes descubrieron que al agregar grafeno y nanotubos de carbono de una sola pared al alimento de los gusanos de seda se obtuvo como resultado que éstos produzcan seda mecánicamente reforzada. Se encontró que una parte de los nanomateriales de carbono añadidos al alimento se incorporan y permanecen en la estructura de las fibras de seda, dándole mayor resistencia al hilo, mientras que el resto de los nanomateriales son excretados (Wang *et al.*, 2016).

Hasta la fecha los nanomateriales más utilizados en la fabricación de los textiles son nanoalambres, nanotubos y NPs. Entre las NPs se encuentran partículas de varios metales, como dióxido de titanio (Nosrati *et al.*, 2015), óxido de zinc (Hatamie *et al.*, 2015), óxido de silicio (Biswas y Jana, 2020) y plata (Xu *et al.*, 2016), etc. Cabe señalar que el área de investigación de nanotextiles presenta muchas oportunidades de desarrollo, lo que permite modificar las propiedades de los textiles y abre un campo de aplicación muy grande.

4. APLICACIÓN DE NPs DE AG Y CU EN LA FUNCIONALIZACIÓN DE TEXTILES PARA FABRICACIÓN DE EPP

Debido a las propiedades antimicrobianas que presentan NPs de Ag y Cu se cuenta con una estrategia para utilizarlas en la modificación y fabricación de mascarillas y otros EPP (Yocupicio-Gaxiola *et al.*, 2021). En la actualidad, existen mascarillas de diferentes tipos y distintos grados de protección. La mascarilla más recomendada por la OMS para el uso hospitalario es de tipo N95 que permite eliminar hasta 95% de partículas de bioaerosol con diámetros mayores de 0.3 micras. Diversas mascarillas de doble capa de polipropileno y algodón, así como las mascarillas plisadas de algodón de doble capa, también han demostrado su eficiencia en disminuir una cantidad considerable de partículas de virus SARS-CoV-2 (Fischer *et al.*, 2020).

Sin embargo, las mascarillas quirúrgicas actuales fabricadas con textiles no presentan propiedades antimicrobianas ni antivirales, pues sólo funcionan como barrera filtrante ante el virus, que es una de las limitantes en las condiciones actuales. La modificación de textiles con nanopartículas con propiedades biocidas puede funcionar bien en la desinfección contra el virus. Aunque todavía se está estudiando la estabilidad de NPs de Ag y Cu, hoy en día éstas son las más eficaces y prometedores con propiedades antimicrobianas. La modificación de mascarillas

con NPs de Ag y Cu representa grandes oportunidades para reducir significativamente la propagación de enfermedades. La figura 1 muestra un esquema de acción de NPs para desactivar el virus SARS-CoV-2 por nanopartículas incrustadas en las fibras de textiles.

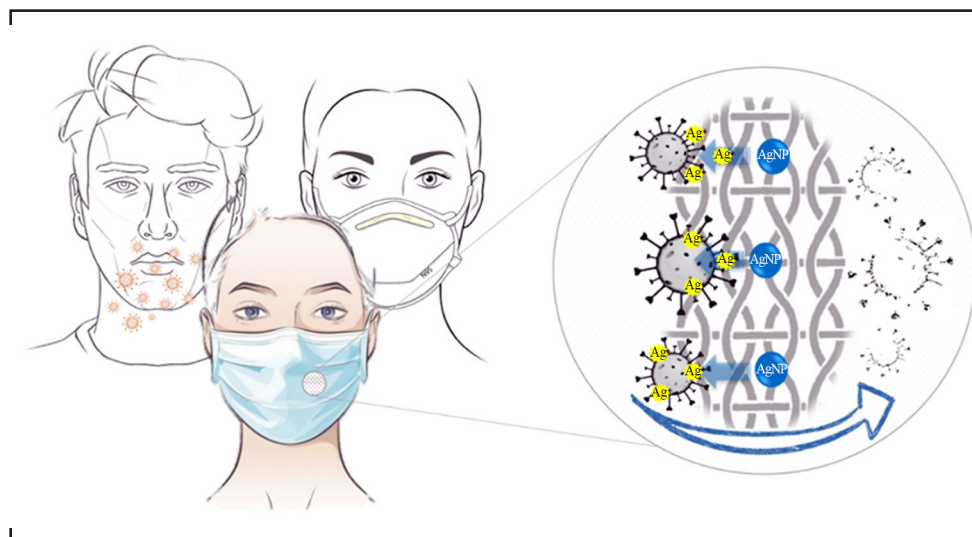


FIGURA 1

Mecanismo de desactivación del virus SARS-CoV-2 por nanopartículas incrustadas en las fibras de textiles para las mascarillas.

Fuente: elaboración propia.

Gracias a la nanotecnología, hoy en día, los tejidos con propiedades antimicrobianas se han convertido en una realidad. La incorporación de NPs de Ag y Cu en las fibras que son utilizadas para confeccionar ropa médica posibilita que el virus después de entrar en contacto con los materiales textiles pierda su actividad patógena. La figura 2 muestra las opciones de uso de los textiles modificados con NPs de Ag o Cu en la fabricación de productos de diferentes tipos.

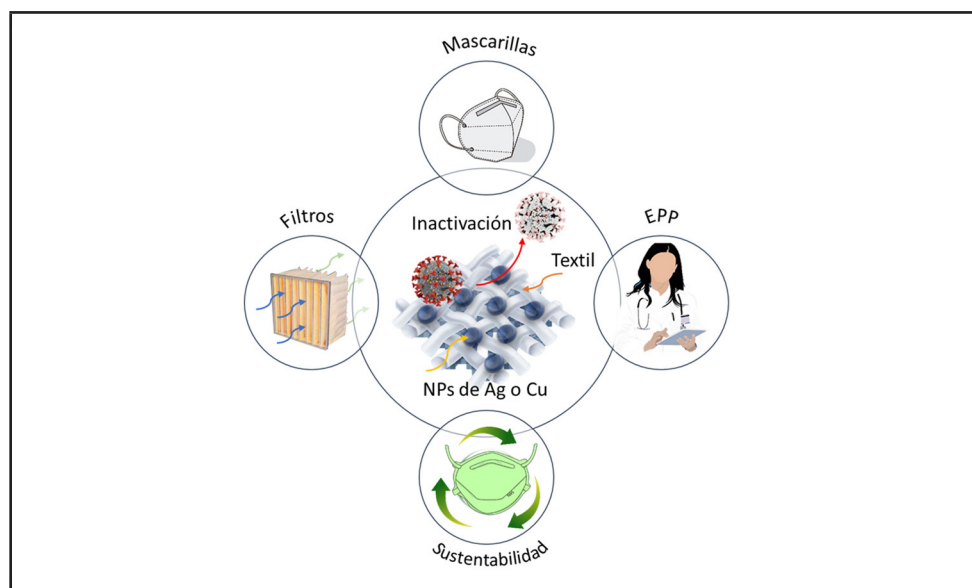


FIGURA 2

Diferentes opciones de uso de los textiles modificados con NPs de Ag o Cu.

Fuente: elaboración propia.

Se han desarrollado muchas tecnologías para modificar textiles con nanopartículas. Los métodos utilizados con más frecuencia para incorporar las NPs de Ag y Cu en los textiles de tipo algodón son mediante el tratamiento de fibras al final del proceso de fabricación. Dichos métodos requieren la preparación preliminar de NPs y posteriormente su unión con las fibras de textiles a través de varios procesos como el enlace químico o la interacción electrostática. Estos métodos requieren el uso de polímeros ramificados y se obtiene un tejido extremadamente estable que guarda su eficiencia antibacteriana incluso después de 20 ciclos consecutivos de lavado (Liu *et al.*, 2013). Los textiles como algodón, lana y poliamida se pueden modificar de manera simultánea con el proceso de teñido, así como antes o después del mismo. En el caso de las NPs de plata, se aplica una solución coloidal que contenga hasta un 70% de plata (Kobrakov *et al.*, 2017).

Asimismo, se ha propuesto un método basado en la irradiación con ultrasonido para generar NPs y a la vez anclarlas en los textiles. El sistema se basa en el arrastre continuo de una tira de textil entre dos láminas vibradas sumergidas en una solución con el precursor metálico. Las láminas tienen dos funciones: reducir el precursor metálico con formación de NPs mediante un proceso sonoquímico y, al mismo tiempo, presionar las partículas recién formadas sobre el textil, donde ellas se quedan bien ancladas. El grosor de recubrimiento y la concentración de NPs pueden controlarse variando la concentración de la solución y la velocidad de arrastre de la tira de textil a través del reactor. Este sistema se puede utilizar para recubrir una variedad de materiales textiles con varios tipos de nanopartículas preparadas por el método de sonoquímica (Abramov *et al.*, 2009).

COMENTARIOS FINALES Y PROSPECTIVA

Sin duda, la nanotecnología y los nanomateriales tienen un papel importante para prevenir el impacto y propagación de las enfermedades infecciosas incluyendo el virus SARS-CoV-2. La nanotecnología es un campo en el que científicos con una increíble diversidad de antecedentes han convergido en fructíferas cooperaciones para problemas multifacéticos. Hoy más que nunca la nanotecnología es necesaria para fundamentar nuevas bases para contrarrestar la actual amenaza para la salud pública mundial y prepararse para posibles nuevos desafíos, por ejemplo, de enfermedades infecciosas, y repensar un futuro más sostenible basado en la ciencia. Para ello, los nanomateriales han demostrado ser una alternativa viable debido a sus propiedades biocidas sobre un amplio espectro de microorganismos patógenos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los árbitros por su exhaustiva revisión del manuscrito, así como por sus observaciones y sugerencias, ya que aportaron una mejora a la estructura y contenido del artículo para lograr su publicación. El artículo está financiado por DGAPA-PAPIIT (UNAM, México) a través del proyecto IV 100121. P. Sánchez y E. Smolentseva agradecen el proyecto SENER-CONACYT 117373. Como acotación, los autores de este artículo están investigando la funcionalización de textiles con diferentes tipos de nanomateriales para confeccionar el equipo de protección personal a través de un proyecto financiado por la DGAPA en el programa PAPIIT con la finalidad de extender la protección personal y contener la propagación del virus SARS-CoV-2.

REFERENCIAS

Abramov, O. V., Gedanken, A., Koltypin, Y., Perkash, N., Perelshtein, I., Joyce, E., & Mason, T. J. (2009). Pilot scale sonochemical coating of nanoparticles onto textiles to produce biocidal fabrics. *Surface and Coatings Technology*, 204(5), 718-722, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.030>

- Ahmed, T., Ogulata, R. T., & Sezgin Bozok, S. (2021). Silver nanoparticles against SARS-CoV-2 and its potential application in medical protective clothing – a review. *The Journal of The Textile Institute*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/00405000.2021.1996730>.
- Bello-Lopez, J. M., Silva-Bermudez, P., Prado, G., Martínez, A., Ibáñez-Cervantes, G., Cureño-Díaz, M. A., Rocha-Zavaleta, L., Manzo-Merino, J., Almaguer-Flores, A., Ramos-Vilchis, C., & Rodil, S. E. (2021). Biocide effect against SARS-CoV-2 and ESKAPE pathogens of a noncytotoxic silver-copper nanofilm. *Biomedical Materials*, 17(1), 015002. <https://doi.org/10.1088/1748-605x/ac3208>
- Biswas, A., & Jana, N. R. (2020). Cotton Modified with Silica Nanoparticles, N, F Codoped TiO₂ Nanoparticles, and Octadecyltrimethoxysilane for Textiles with Self-Cleaning and Visible Light-Based Cleaning Properties. *ACS Applied Nano Materials*, 4(1), 877-885. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c03282>
- Carvalho, A. P. A., & Conte-Junior, C. A. (2021). Recent advances on nanomaterials to COVID-19 management: A Systematic Review on Antiviral/Virucidal Agents and Mechanisms of SARS-CoV-2 Inhibition/Inactivation. *Global Challenges*, 5(5), 2000115. <https://doi.org/10.1002/gch2.202000115>
- Castañeda Guillot, C. y Ramos Serpa, G., (2020). Principales pandemias en la historia de la humanidad. *Revista Cubana de Pediatría*, 92(1). Disponible en <http://www.revpediatria.sld.cu/index.php/ped/article/view/1183/714>
- Cortes, A. A., & Zuñiga, J. M. (2020). The use of copper to help prevent transmission of SARS-coronavirus and influenza viruses. A general review. *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.diagmicrobio.2020.115176>
- Elkodous, M. A., El-Sayyad, G. S., Nasser, H. A., Elshamy, A. A., Morsi, M., Abdelrahman, I. Y., Kodous, A. S., Mosallam, F. M., Gobara, M., & El-Batal, A. I. (2019). Engineered nanomaterials as potential candidates for HIV Treatment: Between opportunities and challenges. *Journal of Cluster Science*, 30(3), 531-540. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01533-8>
- Fayaz, A. M., Ao, Z., Girilal, M., Chen, L., Xiao, X., Kalaichelvan, P. T., & Yao, X., (2012). Inactivation of microbial infectiousness by silver nanoparticles-coated condom: A new approach to inhibit HIV- and HSV-transmitted infection. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 5007-5018. <https://doi.org/10.2147/ijn.s34973>
- Fischer, E. P., Fischer, M. C., Grass, D., Henrion, I., Warren, W. S., & Westman, E. (2020). Low-cost measurement of face mask efficacy for filtering expelled droplets during speech. *Science Advances*, 6(36). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3083>
- Hang, X., Peng, H., Song, H., Qi, Z., Miao, X., & Xu, W. (2015). Antiviral activity of cuprous oxide nanoparticles against Hepatitis C Virus in vitro. *Journal of Virological Methods*, 222, 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2015.06.010>
- Hatamie, A., Khan, A., Golabi, M., Turner, A. P. F., Beni, V., Mak, W. C., Sadollahkhani, A., Alnoor, H., Zargar, B., Bano, S., Nur, O., & Willander, M. (2015). Zinc oxide nanostructure-modified textile and its application to biosensing, photocatalysis, and as antibacterial material. *Langmuir*, 31(39), 10913-10921. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b02341>
- Jagaran, K., & Singh, M. (2021). Nanomedicine for COVID-19: Potential of copper nanoparticles. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(3), 10716-10728. <https://doi.org/10.33263/briac113.1071610728>
- Khorrami, S., Zarrabi, A., Khaleghi, M., Danaei, M., & Mozafari, M.R. (2018). Selective cytotoxicity of green synthesized silver nanoparticles against the MCF-7 tumor cell line and their enhanced antioxidant and antimicrobial properties. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 8013-8024. <https://doi.org/10.2147/IJN.S189295>

- Kim, J. S., Kuk, E., Yu, K. N., Kim, J. H., Park S. J., Lee, H. J., Kim, S. H., Park, Y. K., Park Y. H., Hwang, C. Y., Kim, Y. K., Lee, Y. S., Jeong, D. H., & Cho, M. H. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine*, 3(1), 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2006.12.001>.
- Kobrakov, K. I., Zakuskin, S. G., Zolina, L. I., Stankevich, G. S., Kuznetsov, D. N., & Rodionov, V. I. (2017). Nanomodified textile materials with biocidal properties: Development and pilot testing of manufacturing technology. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 51(5), 815-819. <https://doi.org/10.1134/s004057951705013x>
- Liu, H., Lee, Y. -Y., Norsten, T. B., & Chong, K. (2013). In situ formation of anti-bacterial silver nanoparticles on cotton textiles. *Journal of Industrial Textiles*, 44(2), 198-210. <https://doi.org/10.1177/1528083713481833>
- Nosrati, R., Olad, A., & Nofouzi, K. (2015). A self-cleaning coating based on commercial grade polyacrylic latex modified by TiO₂/Ag-exchanged-zeolite-A nanocomposite. *Applied Surface Science*, 346, 543-553. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.056>
- Pérez-Álvarez, M., Cadenas-Pliego, G., Pérez-Camacho, O., Comparán-Padilla, V. E., Cabello-Alvarado, C. J., & Saucedo-Salazar, E. (2021). Green synthesis of Copper nanoparticles using cotton. *Polymers*, 13(12), 1906. <https://doi.org/10.3390/polym13121906>
- Pilaquinga, F., Morey, J., Torres, M., Seqqat, R., & Piña, M. de las N. (2021). Silver nanoparticles as a potential treatment against SARS-CoV-2: A review. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 13(5). <https://doi.org/10.1002/wnan.1707>
- Prado, V. J., Vidal, A. R., & Durán, T. C., (2012). Application of copper bactericidal properties in medical practice. *Revista Médica de Chile*, 140(10), 1325-1332. <http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872012001000014>
- Ratan, Z. A., Mashrur, F. R., Chhoan, A. P., Shahriar, S. Md., Haidere, M. F., Runa, N. J., Kim, S., Kweon, D. -H., Hosseinzadeh, H., & Cho, J. Y. (2021). Silver nanoparticles as potential antiviral agents. *Pharmaceutics*, 13(12), 2034. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13122034>
- Rius-Rocabert, S., Arranz-Herrero, J., Fernández-Valdés, A., Marciello, M., Moreno, S., Llinares-Pinel, F., Presa, J., Hernandez-Alcoceba, R., López-Píriz, R., & Nistal-Villan, E. (2022). Broad virus inactivation using inorganic micro/nano-particulate materials. *Materials Today Bio*, 13, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100191>
- Román, L. E., Gomez, E. D., Solís, J. L., & Gómez, M. M. (2020). Antibacterial cotton fabric functionalized with copper oxide nanoparticles. *Molecules*, 25(24), 5802. <https://doi.org/10.3390/molecules25245802>
- Sahoo, S. K., Parveen, S., & Panda, J. J. (2007). The present and future of nanotechnology in human health care. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 3(1), 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2006.11.008>
- Singh, N. A. (2017). Nanotechnology innovations, industrial applications and patents. *Environmental Chemistry Letters*, 15(2), 185-191. <http://doi.org/10.1007/s10311-017-0612-8>
- Tortella, G., Rubilar, O., Fincheira, P., Pieretti, J. C., Duran, P., Lourenço, I. M., & Seabra, A. B. (2021a). Bactericidal and virucidal activities of biogenic metal-based nanoparticles: Advances and Perspectives. *Antibiotics*, 10(7), 783. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10070783>
- Tortella, G. R., Pieretti, J. C., Rubilar, O., Fernández-Baldo, M., Benavides-Mendoza, A., Diez, M. C., & Seabra, A. B. (2021b). Silver, copper and copper oxide nanoparticles in the fight against human viruses: progress and perspectives. *Critical Reviews in Biotechnology*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1939260>
- Wang, Q., Wang, C., Zhang, M., Jian, M., & Zhang, Y. (2016). Feeding single-walled carbon nanotubes or graphene to silkworms for reinforced silk fibers. *Nano Letters*, 16(10), 6695-6700. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03597>

- Weiss, C., Carriere, M., Fusco, L., Capua, I., Regla-Nava, J. A., Pasquali, M., Scott, J. A., Vitale, F., Unal, M. A., & Delogu, L. G. (2020). Toward nanotechnology-enabled approaches against the covid-19 Pandemic. *ACS Nano*, 14(6), 6383-6406. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03697>
- Wieczorek, K., Szutkowska, B., & Kierzek, E. (2020). Anti-Influenza strategies based on nanoparticle applications. *Pathogens*, 9(12), 1020. <https://doi.org/10.3390/pathogens9121020>
- Xu, Q., Wu, Y., Zhang, Y., Fu, F., & Liu, X. (2016). Durable antibacterial cotton modified by silver nanoparticles and chitosan derivative binder. *Fibers and Polymers*, 17(11), 1782-1789. <https://doi.org/10.1007/s12221-016-6609-2>
- Yin, I. X., Zhang, J., Zhao, S. I., Mei, M. L., Li, Q., & Chu, C. H. (2020). The antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in dentistry. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 2555-2562. <https://doi.org/10.2147/IJN.S246764>
- Yocupicio-Gaxiola, R. I., Petranovskii, V., Sanchez, P., Antunez-Garcia, J., Alonso-Nunez, G., Galvan, D. H., & Murrieta-Rico, F. N. (2021). Prospects for further development of face masks to minimize pandemics functionalization of textile materials with biocide inorganic nanoparticles: A review. *IEEE Latin America Transactions*, 19(6), 1010-1023. <https://doi.org/10.1109/tla.2021.9451247>
- Zahoor, M., Nazir, N., Iftikhar, M., Naz, S., Zekker, I., Burlakovs, J., Uddin, F., Kamran, A. W., Kallistova, A., Pimenov, N., & Ali Khan, F. (2021). A Review on silver nanoparticles: Classification, various methods of synthesis, and their potential roles in biomedical applications and water treatment. *Water*, 13(16), 2216. <https://doi.org/10.3390/w13162216>

CC BY-NC-ND