

# Prospects for Further Development of Face Masks to Minimize Pandemics – Functionalization of Textile Materials with Biocide Inorganic Nanoparticles: A Review

Rosario I. Yocupicio-Gaxiola, Vitalii Petranovskii, Perla Sánchez, Joel Antúnez-García, Gabriel Alonso-Nuñez, Donald H. Galván, Fabian N. Murrieta-Rico\*

**Abstract**—The population is constantly exposed to pathogenic infectious agents. Personal Protective Equipment (PPE) helps reduce the spread of disease among the population and prevent pandemic scenarios. There are nanoparticles (NPs) with biocidal properties that can improve the functionality of PPE. This article discusses the achievements in developing nanostructured biocides and methods for functionalizing textile materials using NPs from such kind of compounds. This will allow the production of PPE of a new generation with the capabilities of active health protection. The studies presented here suggest that incorporating nanoparticles in PPE could be of great help for the fight and containment of pathogens like the coronavirus SARS-CoV-2.

**Index Terms**—Protection equipment, nanoparticles, oligodynamic, biocide.

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de la población mundial, el hacinamiento en las grandes ciudades y la facilidad con que las personas se desplazan entre sitios remotos, hacen que los problemas de control de transmisión de infecciones constituyan un problema de seguridad nacional para cualquier país del mundo. Un ejemplo de ello es la reciente pandemia ocasionada por el nuevo *coronavirus* SARS-CoV-2, la cual se ha extendido a lo largo de nuestro planeta. La súbita aparición de este nuevo virus patógeno, que aunque ya era mencionado, vino a impactar los sistemas de protección a la salud por todo el mundo, causando millones de enfermos y miles de víctimas, por lo que es necesario entender, prevenir y establecer mecanismos de control más eficientes de estas enfermedades.

Otro problema que presentan muchos agentes de infección es que eventualmente pueden presentar mutaciones que los

hacen más resistentes a los medicamentos ya existentes. Esto ha contribuido al contagio y proliferación de infecciones adquiridas dentro de los hospitales, las casas de asistencia geriátrica y los centros de rehabilitación.

La aparición de nuevos patógenos, que son cada vez más resistentes a las nuevas generaciones de antibióticos, antivirales y drogas sintéticas, va en aumento, lo que se ve reflejado en el reciente reporte de la Organización Mundial para la Salud, donde se menciona que la resistencia a los antibióticos desarrollada por una gran variedad de microorganismos, representa una de las mayores amenazas tanto a la salud como a la seguridad alimentaria a escala global [1]. La producción de un antibiótico con mejores características que los ya existentes, implica costos que van desde los 800 millones hasta mil millones de dólares y con un estimado de 10 años para su disponibilidad en el mercado [2]. El diseño y aplicación de nuevas vacunas puede demorar entre 6 a 18 meses como tiempo mínimo, implicando desde el desarrollo de la cepa vacunal hasta que cierta población desarrolle inmunidad [3]. Lo cual, desde luego no implica que el microorganismo no vuelva a desarrollar resistencia al nuevo antibiótico o que gran parte de la población sea vacunada y, consecuentemente, nos enfrentemos a un nuevo problema de salud, pero aún más agudo. Por lo tanto, es urgente la necesidad de encontrar nuevas medidas tanto para la prevención como para el tratamiento de este tipo de amenazas microbiológicas.

Gracias al desarrollo que la nanociencia y la nanotecnología han logrado en las últimas dos décadas, se sabe que la materia a escala nanométrica, en comparación con el bulto, presenta nuevas propiedades físicoquímicas; lo cual ha dado origen a lo que hoy en día se conoce como ingeniería de nanopartículas (NPs). Específicamente, la ingeniería de NPs ha proporcionado una nueva alternativa microbicida a los antibióticos convencionales por medio de los materiales “nano-antimicrobianos” [4]. Cuando una bacteria o un virus se enfrentan a cierta NP, la interacción del microorganismo con su superficie puede ocasionar que se adhiera y se inactive, lo que impide que el virión pueda alcanzar a la célula objetivo y, así, evitar su introducción. La adhesión, a su vez, puede ocasionar que la NP libere un ion y se lo transfiera al microorganismo, produciendo un desbalance de los radicales libres (conocido en inglés como “oxidative stress”). Ante estas posibles interacciones y dado que los tiempos en los que ocurren son muy cortos,

Rosario I. Yocupicio-Gaxiola is with the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California 22860, México (e-mail: ryocu@cnyun.unam.mx).

Vitalii Petranovskii, Perla Sánchez, Joel Antúnez-García, Gabriel Alonso-Nuñez, and Donald H. Galván are with the Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ensenada, Baja California 22800, México (e-mail: vitalii@cnyun.unam.mx, perlasanchezlopez23@gmail.com, joel.antunez@gmail.com, galonso@cnyun.unam.mx, donald@cnyun.unam.mx).

Fabian N. Murrieta-Rico is with the Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ensenada 22800, México, and also with the Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada 22860, México (e-mail: fmmurrieta@cnyun.unam.mx).

\*Corresponding author

los microorganismos patógenos son incapaces de desarrollar mutaciones que le permitan adaptarse [5]–[10].

Ante la falta de tratamientos específicos contra un nuevo, o más resistente agente patógeno, es necesario aumentar la protección para evitar el contagio. Actualmente, el equipo de protección personal disponible se reduce a las mascarillas o cubrebocas. Dicho dispositivo es un filtro para el aire inhalado y exhalado, que nos permite reducir la exposición a aerosoles que transportan microorganismos patógenos. Los microbios que transmiten infecciones a través del tracto respiratorio, generalmente se propagan por medio de las gotas producidas por una persona infectada que tose, estornuda e incluso que habla y respira. Las mascarillas filtrantes evitan la entrada de los bioaerosoles potencialmente peligrosos (que contienen virus, gérmenes, hongos, bacterias, etc.) en el cuerpo.

La inclusión de NPs con acción oligodinámica en equipos de protección personal o PPE (del inglés *personal protective equipment*), provee un nivel de protección en ambientes de alto riesgo. Actualmente, existe un auge en el estudio de características e implementación de este tipo de partículas para aplicaciones que requieren su demanda. Por ejemplo, el programa “Nano-Misiones” del Instituto Indio de Tecnología (en Delhi), ha aprobado el escalamiento de nano-recubrimientos antivirales para tratamiento de infecciones provocadas por el virus SARS-CoV-2 [11]. Una práctica muy común que potencializa el efecto biocida de los nanomateriales, es el de formar nanomateriales compuestos, nanocompuestos y nanoestructuras mixtas con diferentes especies atómicas para promover efectos sinérgicos. Evidencia de ello son los complejos a base Cr(III), Fe(II), Co(II) y Ni(II) de dimensiones nanométricas, los cuales son efectivos contra el virus del *mosaico del tabaco* y el virus del *herpes simple* [12]. Otros ejemplos son, el material compuesto de hidroxiapatita y dióxido de titanio tipo anatasa (HA/TiO<sub>2</sub>), que ha presentado actividad antiviral contra el virus de la *gripe AH1N1* [13]; el óxido de grafeno (GO) con NPs de plata (GO-Ag), que se ha estudiado para combatir el *coronavirus felino* (FCoV) y la *enfermedad de Gumboro* o IBDV [14].

Por otro lado, este tipo de materiales también se emplea para otros propósitos en el campo de la medicina. Por ejemplo, los materiales compuestos de nanotubos de carbono de pared simple (SWNTs) y óxido de grafeno (GO) muestran la habilidad para transportar y entregar el antibiótico tetraciclina, a la cepa de la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*) [15]. Asimismo, la terapia combinada con NPs metálicas puede ser una de las posibles estrategias para superar la resistencia bacteriana moderna a los agentes antibacterianos [16]–[18].

Es bien conocido que tanto el SARS-CoV-2 como cualquier otro virus no se reproducen en superficies, pero el depósito en estas sí ayuda a la dispersión de los microorganismos [19]. Dada la escasa información referente al SARS-CoV-2 y considerando sus obvias similitudes con SARS-CoV-1, se ha hipotetizado que su supervivencia en diferentes medios sería bastante similar a las presentadas por este último [20]. En este sentido, se ha mostrado que el tiempo de vida de diferentes virus (incluidos los *coronavirus*) puede ser incluso mayor a 7 días [21], pero que ambos muestran ser desactivados en las superficies de cobre en tiempos de 4 horas para el

SARS-CoV-2 y de 8 horas para SARS-CoV-1 [22]. Así, se han sugerido ciertos mecanismos de interacción entre los virus con las superficies de nanosistemas con propiedades oligodinámicas a ser del tipo: interacciones electrostáticas, combinadas electrostáticas e hidrofóbicas, interacción boronolactina-azúcar, interacción combinada de enlace dativo e interacción hidrofóbica y finalmente interacción de enlace dativo [23], siendo aquí donde los nanosistemas cobran relevancia, al presentar una mayor cantidad de sitios activos disponibles para que dichas interacciones con el virus se puedan llevar a cabo. Aunque la investigación en el uso de NPs contra microorganismos se ha visto incrementada en los últimos meses, y aunque la mayoría han sido dirigidas hacia los materiales cuyas propiedades oligodinámicas son conocidas, aún los resultados son escasos.

Lo que se acaba de discutir es solo una introducción de las amplias posibilidades que las NPs ofrecen en el combate de virus, hongos y bacterias resistentes a múltiples antibióticos. Sin embargo, aún queda todo un universo de posibilidades por descubrir al respecto. Para lograr acceder a él, no solo es necesario la producción controlada de tamaños y formas de NPs, sino también mejorar los métodos de producción a escala industrial que nos permitan hacerlos disponibles a bajos costos y de manera masiva. Actualmente, la gran mayoría de rutas de producción de NPs proceden a través de la síntesis química. Dentro de las más conocidas se encuentran la síntesis por el método coloidal-térmico [24], el proceso solución-fase [25], la impregnación a humedad incipiente [26] y la reducción química [27]. Para la producción de NPs por métodos físicos, se encuentran, la síntesis por plasma [28], [29] y el revestimiento de la superficie por aspersión fría [30]. En la última década, uno de los temas más importantes relacionados con la producción de NPs, ha sido el de reducir la cantidad de subproductos peligrosos [31]. Dado lo tóxico, costoso y ecológicamente inviable de los métodos convencionales de producción de NPs [32], se ha optado por un enfoque conocido como “síntesis verde”. Este tipo de síntesis, permite obtener NPs empleando bacterias [33], algas [34], plantas [35]–[37] y otras fuentes orgánicas. Este tipo de síntesis de NPs mejora la biocompatibilidad y genera una buena respuesta microbicida [38]–[43].

Es importante considerar que en el contexto actual, el COVID-19 (enfermedad causada por el *coronavirus* SARS-CoV-2) ha generado desafíos únicos, como la posibilidad de reinfección de personas recuperadas [44]–[46]. Ante este escenario, ha sido de especial controversia la eficacia del uso de mascarillas faciales para disminuir el contagio del COVID-19 [47]. El uso de las mascarillas se limita a ser una barrera física, debido a esto son ineficaces antes del mecanismo de transporte del SARS-CoV-2, si el tamaño de las cavidades en el tejido de la mascarilla es mayor que el tamaño de las partículas portadoras del SARS-CoV-2. Debido a esto, si se tiene una superficie activa en la mascarilla, que sea capaz de eliminar a el virus, sin lugar a duda, la eficacia de la mascarilla se incrementaría.

En el presente artículo, los autores se dan a la tarea de mostrar los últimos resultados en el estudio de materiales con propiedades oligodinámicas, con el objetivo de enfocar

la atención hacia nuevos nanomateriales elaborados a base de compuestos conocidos, que ayuden a mejorar las mascarillas de protección existentes. En esta revisión se siguen las tendencias principales en el estudio de nanocompuestos con propiedades biocidas; de igual manera, los autores también se enfocan en los métodos para modificar materiales textiles usando una amplia variedad de NPs con el objetivo de entender los métodos que lleven a mejorar los equipos de protección personal.

## II. NANOPARTÍCULAS CON EFECTOS OLIGODINÁMICOS

### A. Nanopartículas de Plata

Desde tiempos remotos, antes de que los microbios y otros microorganismos fueran reconocidos como agentes de infección, los diferentes problemas de salud que ocasionan ya eran tratados (empíricamente) con una variedad de preparaciones que involucraban a la plata [48]. Los registros históricos antes de Cristo muestran que gracias a la plata se podía disponer de agua almacenada para el consumo humano (libre de bacterias, hongos y microbios) en el campo de batalla [48], [49], lo cual, para los griegos y romanos, era una clara ventaja estratégica. Hipócrates, quien es conocido como el padre de la medicina, también empleaba compuestos de plata para el tratamiento de úlceras y la cicatrización de heridas.

A principios del siglo XX, las suspensiones con plata coloidal eran muy populares para el tratamiento terapéutico de infecciones tanto bacteriológicas como para la curación de quemaduras y heridas [50]–[52]. Dado que la plata en pequeñas concentraciones no afecta a las células humanas, pero puede ser letal para los agentes infecciosos, es muy común encontrar investigaciones que involucran a las NPs de plata en campos como la microbiología, la medicina y la biomedicina [53].

En la actualidad, la plata coloidal, las NPs y los iones de plata se destacan por ser una clara alternativa para la desinfección de superficies en hospitales [54], [55], para la desinfección de alimentos [56], [57] y para el tratamiento terapéutico de varios tipos de bacterias [58]–[64]. Dentro del universo de patógenos que se caracterizan por una resistencia a múltiples tipos de antibióticos y, para los cuales las diferentes preparaciones con NPs de plata han mostrado ser efectivos como microbicidas, se destaca la *E. coli* [64]–[70], el *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) [65]–[70], la *Pseudomonas aeruginosa* [66], [67], [71], [72] y el *Bacillus cereus* [66], [73], [74].

Si bien es claro que las NPs de plata son atractivas para combatir agentes infecciosos, los estudios muestran que el grado de efectividad con la cual se combate uno de estos microorganismos en particular, depende de factores como el tamaño [75]–[77], la forma [78]–[80], la temperatura y el pH [81], así como la condición aeróbica/anaeróbica del entorno en que se encuentran [72]. Adicionalmente, los estudios reportan que las NPs de plata producto de la síntesis verde, presentan una buena respuesta microbicida [38]–[43]. Por ejemplo, se sabe que aún no existe un medicamento eficaz para el tratamiento del virus *chikungunya*. Sin embargo, NPs de Ag obtenidas a través de síntesis verde han mostrado ser muy

eficaces para combatirlo [82]. Dado el potencial que tienen las NPs de plata para combatir agentes infecciosos, recientes estudios apuntan a que también podrían ayudar a desarrollar tratamientos para superar la actual pandemia asociada al virus SARS-CoV-2 [83], [84].

### B. Nanopartículas de Compuestos de Cobre

Actualmente, el cobre es muy conocido por sus propiedades para el tratamiento de diversas enfermedades [85]–[87]. Consecuentemente, se ha usado ampliamente para atacar diversos microorganismos, hongos, bacterias y virus [88], [89]. También, se sabe que cuando forma parte de diversos compuestos (óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), sulfuro ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), yoduro ( $\text{CuI}$ ), y cloruro ( $\text{CuCl}$ )), se observa que presenta propiedades biocidas muy prometedoras [90], [91]. En particular, el estado de oxidación que presenta una mayor actividad antibacteriana y antiviral es el estado cuproso [90].

Si bien, se sabe que las NPs de Cu poseen propiedades biocidas, para lograr un efecto bactericida efectivo, se requieren concentraciones superiores a las de las NPs de Ag [28]. Hang *et al.* han observado que las NPs de óxido cuproso, promueven la respuesta inmunológica contra el virus *hepatitis C* al activar la respuesta citotóxica de las células hepáticas [25]. Shimabuku *et al.* [26] reportaron una mejora significativa de la eliminación o desactivación del bacteriófago T4, cuando usaron NPs mixtas de plata y óxido de cobre, en comparación con las monometálicas. Fujimori *et al.* estudiaron las propiedades antivirales de NPs de yoduro de cobre contra el virus de *influenza A* [92] y encontraron que el virus era desactivado debido a la degradación de proteínas virales, tales como hemaglutinina y neuraminidasa. Ellos concluyeron que podrían ser útiles para el desarrollo de filtros, mascarillas faciales (cubrebocas), ropas y otra gran cantidad de artículos que pudieran ser usados para seguridad biológica o para el cuidado de la inocuidad alimentaria. En un artículo publicado recientemente con un título muy expresivo, “Can Nanotechnology and Materials Science Help the Fight against SARS-CoV-2?” [93], informan que las superficies que contienen cobre fueron muy efectivas en la inactivación de *coronavirus*, siendo la tasa de inactivación directamente proporcional al contenido de cobre. Se ha demostrado que la liberación de iones de cobre y la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) son responsables de la inactivación de coronavirus en tales superficies.

### C. Nanopartículas de Óxido de Zinc

Las NPs de óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) se conocen por ser baratas de producir y no ser tóxicas para las células humanas a bajas concentraciones [94]. También se ha observado que al incluir altas concentraciones de  $\text{ZnO}$  en la dieta de lechones, se promueve una mejor respuesta de sus anticuerpos al virus de *gastroenteritis transmisible* [95], y que las NPs de  $\text{ZnO}$  inhiben eficazmente las cepas bacterianas gram-positivas y gram-negativas [96], [97]. Además, el  $\text{ZnO}$  es un material semiconductor con características fotocatalíticas, lo cual permite activar sus propiedades biocidas por medio de una fuente de radiación lumínica [98], [99]. Al igual que algunos metales

(Ag, Cu, Au, Pt, etc.), es posible obtener NPs por técnicas de síntesis verde. Por ejemplo, las sustancias poliméricas extracelulares (SPEs) de la cepa probiótica *Bacillus licheniformis* se han empleado para sintetizar NPs de ZnO [100]. Esto gracias a que los SPEs reducen y estabilizan la formación de NPs de SPEs-ZnO a través de un método de coprecipitación. A través del método de transporte por flama empleado por Antoine *et al.* se sintetizaron NPs de ZnO con formas tetrapodales [101]. En este mismo estudio se observó (a través de pruebas *in vitro*) que cuando se introdujo el virus del herpes tipo-2 (HSV-2), en un medio donde, previamente, tanto las estructuras de ZnO como las células objetivo HeLa2 y VK2/E6 se encontraban presentes, los tetrápodos impidieron la infección del virus. Esto se debió a que los tetrápodos de ZnO, capturaron los viriones de HSV-2 e impidieron que se introdujeran en las células objetivo. Años más tarde, Antoine *et al.* realizarían estudios *in vivo*, al inocular ratones de laboratorio con este mismo virus y volverían a emplear el mismo tipo de estructuras de ZnO [102]. Los estudios confirmaron que los tetrápodos de ZnO son efectivos para inhibir la replicación viral del HSV-2. Por otro lado, Duggal *et al.* en presencia de tetrápodos de ZnO, expusieron córneas cultivadas en el laboratorio al virus del herpes simple 1 (HSV-1) [103]. Los resultados mostraron que estas estructuras de ZnO también tienen un poder inhibitorio para esta variante del herpes. En consecuencia, el ZnO tiene potencial profiláctico como terapéutico para el combate de este tipo de viriones. Una posibilidad interesante que ofrece en particular el Zn es el desarrollo de inmunosensores. Por ejemplo, por medio de la síntesis hidrotérmica sobre electrodos de Au/Ti, se sintetizaron redes formadas de nano-rodillos de Zn con longitudes en el intervalo de 800 a 900 nm y con diámetros de 100 a 200 nm [104]. Este tipo de nano-entramado fue puesto a prueba para evaluar su habilidad para detectar la gripe porcina H1N1 SIV (H1N1 swine influenza virus). El empleo de la técnica de voltamperometría arrojó que era posible tanto la detección como su cuantificación, ya que la corriente del sensor se reducía proporcionalmente al incremento en la concentración de H1N1 SIV. Por otro lado, se han construido inmunosensores por fotoluminiscencia a partir de nanorodillos de ZnO. Se ha encontrado que son capaces de detectar anticuerpos específicos contra la proteína gp51, la cual se encuentra presente en el virus de leucemia bovina o BLV (del inglés *bovine leukaemia virus*) [105]. Por todo este tipo de cualidades, su uso es muy común en apósitos para heridas, empaques de alimentos, telas antimicrobianas, etc.

#### D. Nanopartículas de Dióxido de Titanio

El TiO<sub>2</sub> es un compuesto biocompatible, es decir: es inerte, no-tóxico y relativamente económico [106]. El interés científico en este material ha tenido un auge en recientes décadas, debido a que posee propiedades desinfectantes, promovidas por su efecto fotocatalítico [107]. El TiO<sub>2</sub> conocido como dióxido de titanio u óxido de titanio (IV), es un sistema polimorfo que puede presentarse en tres distintas fases cristalinas: anatasa, rutilo y brookita. La obtención de una fase en particular, depende de condiciones específicas

de síntesis. De las tres fases cristalinas, la anatasa es la que presenta una mayor fotoactividad [108]. Aunque en la literatura las rutas de síntesis de TiO<sub>2</sub> nanoparticulado exhiben abundantes morfologías [109]–[111], la gran cantidad de las investigaciones de TiO<sub>2</sub> que se enfocan en la evaluación de su efecto biocida, hacen uso del producto comercial Degussa P25 [112], [113].

La gran mayoría de las investigaciones que buscan mejorar las propiedades del TiO<sub>2</sub> a partir de su síntesis considera precursores metalorgánicos tipo alquil-substituidos o alcóxidos como tetraetilortotitanato o tetrabutilortotitanato, butóxido de titanio, isopropóxido de titanio, etc., porque dichos compuestos pueden hidrolizarse fácilmente para obtener el TiO<sub>2</sub>. Debido a esto, las técnicas sol-gel [114], [115] e hidrólisis de TiCl<sub>4</sub> [116] han sido las más utilizadas. Las investigaciones que se han enfocado en el desempeño del TiO<sub>2</sub> para evaluar sus propiedades biocidas, consideran como principal parámetro el tamaño de partícula. De esta manera, Takahashi *et al.* han reportado que la actividad antibacterial de TiO<sub>2</sub> recubierta con SiO<sub>2</sub> y depositado en fibras de rayón aumentó con la disminución del tamaño (90 nm a 30 nm) e incluso una baja proporción en peso fue necesaria para que la actividad antimicrobiana fuera evidente [117].

Se ha reportado que una alta dispersión de TiO<sub>2</sub> sobre un medio influye en el contacto y produce un mejor ataque a la bacteria *E. coli*, debido a que hay una mayor exposición de sitios activos para anclar o atacar a las bacterias [118]. Por otro lado, los antibióticos tradicionales como la penicilina, la ampicilina, la gentamicina, la oxacilina y la amoxicilina, entre otros, se han usado en conjunto con NPs de TiO<sub>2</sub>, logrando aumentar sinérgicamente el efecto biocida de los mismos para el ataque contra el *S. aureus* resistente a la meticilina [115]. Otra alternativa para mejorar las características biocidas del TiO<sub>2</sub> es mediante su dopaje, por ejemplo, el uso de TiO<sub>2</sub> fluorado en la inactivación de *norovirus humano* y varios sustitutos (bacteriófago MS2, *calicivirus felino* y *norovirus murino*) fueron investigados por Park *et al.* [113]. Los resultados mostraron que la mejora catalítica observada por la fluoración es de una magnitud lo suficientemente grande como para hacer que el TiO<sub>2</sub> fluorado sea considerado efectivo en la destrucción de virus, incluso bajo los rayos UV residuales emitidos por lámparas fluorescentes. Asimismo, Mazurkova *et al.* [116] estudiaron la actividad de NPs de TiO<sub>2</sub> en el virus de la *influenza H3N2*, bajo luz ultravioleta, luz de día y en la oscuridad. Los resultados mostraron que la actividad de éstas no dependía de la fuente de excitación o de un efecto fotocatalítico, lo que sugería que podía deberse a la destrucción de la cubierta del virus provocada por la interacción con las NPs.

#### E. Nanopartículas de Otros Materiales

Una revisión de la literatura existente muestra que las principales investigaciones de NPs para el combate de patógenos se centran en cuatro materiales clave (Ag, Cu, ZnO y TiO<sub>2</sub>). Sin embargo, esto no excluye a otros compuestos que también han sido explorados en menor proporción y que podrían abrir nuevas perspectivas en el futuro.

Las publicaciones sobre las propiedades biocidas de materiales como las NPs de Au, Si, SiO<sub>2</sub>, MgO y CaO se revisaron por Dizaj *et al.* [119]. Los autores se centraron en estudios relacionados con la actividad antimicrobiana de las NPs inorgánicas y sus mecanismos de acción. Se reportó que el tamaño de partícula es un parámetro importante que determina la eficacia antimicrobiana de las NPs. La mayor eficiencia de éstas en relación con las cepas resistentes de patógenos microbianos, las revela como agentes potentes contra ellos. El desarrollo de agentes antimicrobianos inorgánicos, simples y económicos como las NPs, representa una alternativa a los antibióticos tradicionales, pudiendo ser una opción viable para el futuro de productos farmacéuticos y medicinales, concluyeron los autores [119].

En la revisión bibliográfica que Tan *et al.* [120] presentan, las propiedades de NPs compuestas individualmente de Ag, ZnO, TiO<sub>2</sub>, Fe, Ni, Pt, Au, CeO<sub>2</sub> y SiO<sub>2</sub> son estudiadas. Este trabajo se enfoca en los principales mecanismos de acción biocida, y se explora la relación sinérgica que pueden tener tanto los métodos de síntesis como la incorporación de materiales adicionales.

En la preparación de nuevos nano-microbicidas, se probó la sal de cesio del heteropolíácido fosfotúngstico (o fosfowolfrámico) (Cs<sub>2.5</sub>H<sub>0.5</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>). Esta llamada sal de Keggin insoluble en agua mostró una amplia gama de actividad biocida contra bacterias gram-positivas y gram-negativas, levaduras y hongos filamentosos, incluso en condiciones de ausencia de luz [121]. Las NPs de Cs<sub>2.5</sub>H<sub>0.5</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub> actúan como un agente antimicrobiano regulado por protones, que libera iones de hidroxonio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), lo que produce un pH *in situ* mucho más ácido que lo tolerable por la mayoría de los patógenos fúngicos y bacterianos.

Una alternativa de materiales de bajo costo es el posible uso de los residuos de la industria electrónica, como se investigó en el trabajo realizado por Nguyen *et al.* [122]. En este estudio, los autores evaluaron la toxicidad para microorganismos de NPs como GaAs, InAs, óxido de galio (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de indio (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Como resultado, se demostró que las NPs de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y de In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no son tóxicas, mientras que las NPs de GaAs e InAs son extremadamente tóxicas para los microorganismos metanogénicos y la bacteria *A. fisheri*.

Por otro lado, se están estudiando varias medidas correctivas para prevenir o retrasar el desarrollo de resistencia a los antibióticos [123], entre las cuales el desarrollo de nuevos compuestos antimicrobianos se ha convertido en una de las soluciones más prometedoras [124].

Es interesante observar que, junto con los compuestos inorgánicos, los polímeros antimicrobianos también han atraído la atención de los investigadores [125]. Estos polímeros tienen un modo de acción no específico, dirigido principalmente a la membrana microbiana y generalmente son menos propensos para que las bacterias desarrollen resistencia. La mayoría de los biocidas poliméricos estudiados hasta ahora son capaces de interactuar con la membrana de una célula bacteriana, causando la destrucción de la membrana y la fuga de material intracelular [126]. Curiosamente, algunos polímeros antimicrobianos también mejoran la actividad de los antibióticos

convencionales [127]. Entre los sistemas poliméricos antimicrobianos, se pueden encontrar péptidos [128], polímeros catiónicos [129] y compuestos inorgánicos/polímeros [130]. Por otro lado, en una resina se depositaron NPs insolubles basadas en polietilenoimina de amonio cuaternario (QA-PEI) con una concentración de 1% en peso, y se evaluó su actividad antibacteriana contra *Streptococcus mutans* [131]. El análisis de los datos mostró que la longitud de la cadena alquílica de las NPs QA-PEI, juega un papel importante en la actividad antibacteriana del reactivo. El compuesto más potente fue QA-PEI octil-alquilado, que inhibió completamente el crecimiento de *S. mutans* en las muestras.

### III. FUNCIONALIZACIÓN TEXTIL UTILIZANDO NANOPARTÍCULAS CON PROPIEDADES BIOCIDAS

Se debe enfatizar que, actualmente, los tipos de mascarillas existentes, en primer lugar son filtros pasivos, proporcionando solo retención mecánica de las gotas de aerosol y, en segundo lugar, son filtros desechables que deben eliminarse después de un corto período de tiempo de uso (máximo 1 día), lo que en sí mismo crea un problema de manejo de desechos. En este sentido, las mascarillas utilizadas, potencialmente contienen agentes infecciosos y su transferencia a los basureros crea riesgos adicionales, pues estas pueden convertirse en una fuente de infección si no se eliminan adecuadamente.

Como ya se mencionó, una persona infectada secreta gotas de aerosol, principalmente saliva y moco, y las máscaras protectoras evitan que estas gotas entren en contacto con las personas a su alrededor. En principio, incluso la eliminación mecánica de bioaerosoles es un método importante de protección. El tamaño de las gotas les permite transportar patógenos como el sarampión, la rubéola, la varicela, la gripe, incluido, por supuesto, el culpable de la pandemia actual, el virus SARS-CoV-2 [132].

Las personas pueden infectarse en varios lugares: en el trabajo, en los lugares de residencia o de vacaciones. Cuando dos o más personas coinciden en un espacio común, los microorganismos patógenos pueden transmitirse accidentalmente a través de bioaerosoles o como resultado del contacto directo (darse la mano, interactuar con superficies infectadas, etc.). Ante una amenaza de infección, es imprescindible utilizar dispositivos que nos permitan llevar a cabo nuestras actividades diarias y, al mismo tiempo, proporcionar un cierto grado de protección biológica. Dichos dispositivos pueden ser máscaras faciales, guantes, etc.

La efectividad de una mascarilla facial para filtrar el flujo de bioaerosol depende de varios factores. Uno de ellos es el diseño ergonómico de esta, pues un tamaño inadecuado o un ajuste incorrecto pueden permitir que las gotas se deslicen a través de espacios abiertos. Otros factores son la porosidad y las propiedades de los materiales de los que está hecha. Hay mascarillas de diferentes tipos y diferentes grados de protección. El más confiable de ellas es el N95, que garantiza la eliminación de más del 95% de todas las partículas con un diámetro de al menos 0.3 micras. De hecho, las mascarillas N95 pueden filtrar, aunque con menos eficiencia, a las partículas con un diámetro de hasta ~0.1 micras. Esto

corresponde al tamaño del virus SARS-CoV-2, por lo que estas pueden filtrar parcialmente incluso los viriones libres. Sin embargo, los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades regulan el uso de respiradores N95 y no los recomiendan al público en general. La razón de esto es que son insumos críticos que deben reservarse para el personal médico y de atención primaria.

Por otro lado, existe la posibilidad de aumentar las características operativas de las mascarillas a base de textiles si se funcionaliza de alguna manera su superficie. Lógicamente hablando, las mascarillas serán mucho más efectivas si no solo filtran los bioaerosoles, sino que también se autodesinfectan por medio de propiedades biocidas añadidas a las telas con las cuales se confeccionen. Hasta la fecha, se han desarrollado muchas tecnologías para la modificación de textiles, pero la gran mayoría han sido enfocadas a problemas no relacionados con las mascarillas faciales.

Las vestimentas comúnmente están hechas de textiles y/o fibras, las cuales bajo ciertas condiciones de temperatura y humedad, pueden favorecer el cultivo y la proliferación de virus, bacterias u hongos, lo que conduce, entre otras cosas, a una decoloración indeseable, daños a la textura de la tela, la aparición de olores putrefactos, descomposición de fibras y, por lo tanto, a la baja funcionalidad de los productos a partir de ellas. Por lo tanto, la demanda de textiles con propiedades antimicrobianas ha aumentado debido a la necesidad de proteger a los usuarios de los procesos asociados con el desarrollo de microorganismos patógenos en textiles como en sustratos (vea, por ejemplo, un artículo de revisión de Ogunsona *et al.* y las referencias citadas en el mismo artículo [133]).

Por lo tanto, la funcionalización de textiles para uso biocida es un tema importante que se está volviendo particularmente relevante a la luz de la situación actual. Cabe señalar que aunque la durabilidad y la estabilidad de las NPs metálicas y de óxidos metálicos, como de plata, dióxido de titanio, óxidos de zinc y cobre(II), propuestas para tales aplicaciones siguen en desarrollo, esto debido a que son de los materiales más efectivos y prometedores para dotar a los textiles de propiedades microbicidas [14], [93], [134]–[140]. Una parte muy importante de la aplicación de la nanotecnología en la producción de textiles biocidas es la solución del problema de anclar NPs en las fibras, de manera que se pueda garantizar tanto su alta actividad como una fijación fiable [141]. Se han investigado diversos materiales y diversas metodologías para aplicar NPs en diversas fibras, como algodón, lana, seda, nylon, polipropileno, poliéster, etcétera [134], [142].

Se espera que a través del uso de la nanotecnología, los equipos de protección personal desechables, o de corta vida, se puedan reutilizar, o su ciclo de vida se pueda extender significativamente. Esto se puede lograr incorporando potentes NPs antimicrobianas en las mascarillas faciales para que puedan usarse por más tiempo e incluso reutilizarse después del lavado. Al mismo tiempo, proporcionan protección adicional para el usuario, ya que tales mascarillas pueden matar bacterias al contacto. De modo sorprendente, hasta la fecha, se ha publicado un número muy reducido de artículos en los que se ha estudiado el uso de NPs para el desarrollo de mascarillas faciales antimicrobianas [143], [144]. Se estudi-

aron las propiedades de NPs biocidas como Ag y TiO<sub>2</sub> en mascarillas faciales [142], [143], [145]–[147]. Sin embargo, combinados con datos sobre otros tipos de productos textiles tratados con nanomateriales, estos pocos resultados muestran claramente el potencial de este tipo de tecnología para mejorar significativamente los equipos de protección personal. Dado que nuestra tarea es revisar las propiedades biocidas de las NPs en materiales textiles, ahora discutiremos algunos estudios sobre la funcionalización de diferentes telas con NPs.

#### A. Modificación con Nanopartículas de Ag

En 2009 se publicó uno de los primeros estudios sobre el uso de NPs de plata en forma activa de una mezcla de Ag/AgCl depositada en mascarillas faciales compuestas de polipropileno [145]. Las mascarillas resultantes se probaron contra *E. coli*, *S. aureus* y los hongos: *C. albicans*, *A. niger* los. La mezcla Ag/AgCl se aplicó preliminarmente sobre varios soportes (TiO<sub>2</sub>, BaSO<sub>4</sub>, ZnO y mezclas de los mismos). Además, se tuvo en cuenta el método de preparación de fibras de polipropileno (con o sin el uso de un potencial eléctrico de 25 kV), y se descubrió que la actividad del material dependía de los medios utilizados. Las mezclas de TiO<sub>2</sub> con ZnO y de TiO<sub>2</sub> con BaSO<sub>4</sub> mostraron mejores resultados que cada uno de los portadores independientemente. Se demostró que la fase activa estaba uniformemente dispersa sobre la superficie de la fibra y que además de sus propiedades biocidas, su presencia no afectaba las propiedades de filtración. La actividad biocida de la mascarilla se mantuvo durante más de 24 horas.

La aplicación de NPs de Ag en mascarillas faciales disponibles comercialmente por reducción química se ha estudiado en [143], [146]. Los dispositivos resultantes se probaron en bacterias gram-positivas (*S. aureus*) y gram-negativas (*E. coli*). En este estudio, se observó que las NPs de plata inhiben efectivamente el crecimiento de ambos tipos de bacterias, aunque algo más eficaces para las bacterias gram-negativas, y que la aplicación de cantidades muy pequeñas de Ag hacen que los materiales sean adecuados para aplicaciones biomédicas. Del mismo modo, Khraghani *et al.* aplicaron NPs de Ag a fibras de poliacrilonitrilo [146], con el objetivo de que el producto final sea lavable. Se aplicaron las NPs de Ag por impregnación con una solución de nitrato de plata y en tratamiento posterior con una solución de NaOH. Los materiales fueron probados contra las bacterias *Staphylococcus* y *Pseudomonas*, mostrando que las NPs de Ag tienen una mayor actividad biocida contra *Pseudomonas* que contra *Staphylococcus*. La actividad de los materiales aumentó con el número de ciclos de impregnación, es decir, se incrementó la cantidad de NPs depositadas. Sin embargo, también se demostró que el incremento de los ciclos de impregnación aumentaba, simultáneamente, la pérdida de NPs de Ag en los lavados después de la exposición a microorganismos.

#### B. Modificación con Nanopartículas de Cu/Cu<sub>2</sub>O/CuO

Las NPs de Cu se han estudiado en menor grado que las NPs de Ag, utilizando metodologías como: depósito de Cu sin electrodos [148], impregnación [142], prensado en calor [136], entre otras.

El trabajo de Borkow *et al.* describe el uso de cobre como la única fase activa en mascarillas faciales del tipo N95 [142]. En este estudio se aplicaron NPs de óxido de cobre a la superficie de las mascarillas, y se probaron para inactivar los virus de la gripe H1N1 y H9N2, lográndose la contención completa en el caso del primero, mientras que en el segundo se lograron resultados menos significativos. Las mascarillas modificadas de esta manera demostraron que las propiedades de filtrado de las mascarillas no cambiaron con la impregnación de las NPs de CuO. El dispositivo mostró una ligera liberación de cobre en el aire, pero en todos los casos estuvo en los límites aceptables. De la misma manera, Touhid *et al.* [136], por medio de su proceso de depósito de las NPs en poliéster encontraron que el material final es muy estable, incluso después de 50 ciclos de lavado. Asimismo, una cubierta muy densa de Cu<sub>2</sub>O se logró por medio de impregnación asistida por ultrasonido sobre fibras de seda exhibiendo actividad contra organismos tales como *E. coli*, *Micrococcus sp.*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* y *B. subtilis* [149]. En otro trabajo, Xu *et al.* depositaron NPs de Cu sobre algodón usando ácido tioglicólico como aglutinante enlazado al algodón y ácido cítrico como medio de protección para las NPs [150]. Con este sistema obtuvieron efectividades mayores al 96% cuando se probaron en *S. aureus* y *E. coli*, mismas que mantuvieron su actividad aún después de 50 ciclos de lavado. El mecanismo antiviral consistió en la interacción de iones Cu con viriones que fueron capturados en las mascarillas al entrar en contacto con la superficie de óxido de cobre depositado en la superficie externa de las mascarillas. Davison *et al.* probaron, de manera similar, las mismas mascarillas N95 impregnadas con una mezcla de iones Cu y Zn, y demostraron que las mascarillas inactivan 19 subtipos diferentes de virus de influenza A y B, paramixovirus (sarampión) y coronavirus del SARS [147]. En todos los casos, la eficacia de inactivación de los microorganismos descritos anteriormente alcanzó el 99.99%. Además, estas mascarillas no mostraron signos de irritación o alergenicidad en las pruebas.

### C. Modificación con Nanopartículas de ZnO

La incorporación de NPs de ZnO a telas o fibras de polímeros, como polipropileno y algodón, han sido investigadas para obtener materiales que aporten protección a la radiación UV [151], [152]; adicionalmente, estos materiales han mostrado actividad de autolimpieza y antibacteriana [153], [154]. La modificación de tela de algodón con NPs de ZnO es reportada en [155], en donde se sintetizaron NPs fluorosurfactantes de ZnO sobre la tela con un método de síntesis hidrotermal. Se encontró que las NPs tenían forma hexagonal con diámetro promedio de 56 nm. Otro ejemplo de la aplicación de ZnO a textiles se reporta en [156], donde se impregnaron NPs de ZnO en una tela de carbón activado dopada con cationes de Ag<sup>+</sup> mediante autoensamblaje capa por capa. Las telas resultantes se evaluaron en términos de actividad antibacteriana contra *S. aureus*, *Klebsiella pneumoniae* y *Streptococcus pneumoniae* y se encontró que la eliminación de estos patógenos que causan neumonía dio resultados prometedores.

Actualmente existe un mayor interés en el desarrollo de textiles protectores contra peligros tales como contaminantes químicos y biológicos, efectos térmicos, radiación ultravioleta, etc. Las fibras modificadas con NPs de ZnO han demostrado un gran potencial para el desarrollo de estas telas protectoras [157]. Estas fibras fabricadas por electrospinning (o electrohilado, una técnica para la fabricación de fibras) tienen el potencial de proporcionar confort térmico y protegen al usuario de una amplia gama de riesgos ambientales. Sin embargo, la inclusión de NPs de ZnO en mascarillas faciales filtrantes se ha estudiado muy poco.

### D. Modificación con Nanopartículas de TiO<sub>2</sub>

Se sabe que, para la acción del TiO<sub>2</sub> sobre algunas sustancias orgánicas y su posterior mineralización, es necesario que el dióxido de titanio sea irradiado con energía suficiente para que un electrón salte de la banda de valencia a la banda de conducción (3.2 eV), la cual es una región de radiación ultravioleta cercana. Así, las sustancias orgánicas depositadas en la superficie del fotocatalizador pueden ser desactivadas e incluso completamente mineralizadas a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O [158]. Dicho comportamiento es importante para el ataque a diferentes microorganismos.

Recientemente, se han considerado varias tecnologías avanzadas para reducir la carga microbiana en hospitales. Entre las nuevas estrategias en constante evolución, llama la atención el desarrollo de superficies autolimpiables recubiertas con fotosensibilizadores activados por la luz, como las NPs de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>). En general, se considera que los sistemas fotocatalíticos basados en TiO<sub>2</sub> son materiales de higiene prometedoros. Sin embargo, Margarucci *et al.* señalan que “es deseable una investigación adicional en el futuro para evaluar y utilizar esta nueva e interesante tecnología de atención médica” [159].

Se han estudiado diversas metodologías de depósito de TiO<sub>2</sub> sobre fibras textiles [93], [133], [135]. En estudios para la incorporación de TiO<sub>2</sub> sobre fibras de nylon, asistida por ultrasonido y usando Pd como semilla o sitio de nucleación, se logró una muy buena dispersión. Además, se logró establecer que, por medio de variaciones en las condiciones de síntesis, la morfología de las partículas incorporadas cambiaba de una forma de grano de arroz a una de flor. Lo anterior puede ser interesante cuando se evalúa el impacto de la morfología del sistema en la actividad contra diferentes microorganismos patógenos. Mahltig *et al.* reportaron que una muy buena técnica para dispersar TiO<sub>2</sub> sobre textiles es por medio de impregnación hidrotermal asistida por microondas, la cual produce una muy buena dispersión de la fase activa [160]. En otro caso, Nazari investigó la síntesis de NPs de TiO<sub>2</sub> con tinte verde de cáscara de nuez por medio de impregnación asistida por ultrasonido, y obtuvieron un 100% de degradación de *S. aureus* y *E. coli*, lo cual fue atribuido a un efecto sinérgico entre el tinte y las NPs de TiO<sub>2</sub> [161].

Los efectos oligodinámicos de las NPs revisadas en este trabajo son resumidos en la Tabla I. Al mismo tiempo, se presentan los textiles funcionalizados, los microorganismos con los que fueron probadas las propiedades biocidas de las

TABLA I  
 FUNCIONALIZACIÓN TEXTIL UTILIZANDO NANOPARTÍCULAS CON PROPIEDADES BIOCIDAS, USADO EN MASCARILLAS.

Textil	NPs	Tipo de mascarillas	Microorganismos de prueba	Vida útil/ actividad biocida	Ref.
Algodón	Ag	-	<i>C. albicans</i> <i>S. aureus</i> <i>E. coli</i> <i>B. subtilis</i> <i>K. pneumoniae</i>	Baja concentración de Ag NPs es suficiente para generar efectos microbianos en más de veinte ciclos de lavado	[51] [60] [162]
Algodón	Ag, Zn, Fe	-	<i>E. coli</i>	Proveen una protección efectiva contra patógenos presentes en estornudos moderados. Inhibición del 99% bacterias	[5]
Tejido de rayón de bambú injertado con acrilamida	Cu	-	<i>S. aureus</i> <i>E. coli</i>	El producto muestra actividad antibacteriana y la persistencia de las NPs se observó después de 50 ciclos de lavado.	[163]
Celulosa	Ag	-	<i>E. coli</i> <i>S. aureus</i> <i>P. aeruginosa</i>	Las bacterias grampositivas (1500 ppm) requieren una mayor concentración que las gramnegativas (125 ppm) para una buena efectividad biocida.	[61]
Rayón	TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	-	<i>E. coli</i>	Incubación 18 h	[117]
Rayón	TiO <sub>2</sub>	-	<i>E. coli</i>	>90% entre 15-120 min bajo luz UV	[118]
Acetato					
Poliétileno	Cu <sub>2</sub> O	-	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>	Erradicación después de 15 min	[130]
Poliéster	Cu, TiO <sub>2</sub>	-	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>	Reducción >98% después de 50 ciclos de lavado	[136]
Seda	Ag	-	<i>B. cereus</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>E. coli</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>S. pyogenes</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>S. aureus</i> .	66.7-98.3% de inhibición después de 20 lavados	[137]
Algodón, poliéster	Ag	-	<i>B. ochroleuca</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>Candida albicans</i> , <i>C. glabrata</i> , <i>C. parapsilosi</i> .	Inhibición >90% después de 24 h de tratamiento	[138]
Algodón	ZnO	-	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>	Reducción >99.4% después de 24 h de contacto	[140]
Polipropileno	CuO	Mascarilla N95	H1N1 H9N2	-	[142]
Polímero (PP)	Ag	Mascarilla quirúrgica	<i>S. aureus</i> <i>E. coli</i>	Dstrucción de las bacterias durante 24 h	[143]
Polipropileno	Ag, TiO <sub>2</sub>	-	<i>S. aureus</i> <i>E. coli</i>	Reducción de bacterias después de 48 h (100%)	[144]
Polipropileno Malen S-901	Ag en ZnO, TiO <sub>2</sub> , BaSO <sub>4</sub>	Half-mask	<i>E. coli</i> <i>S. aureus</i> <i>C. albicans</i> <i>A. niger</i>	Se obtuvo un alto efecto antimicrobiano a las 24 h. Esto muestra el mecanismo antimicrobiano a largo plazo de la Ag.	[145]
Poliacrilonitrilo (PAN)	Ag	Mascarilla de nanofibras de PAN	Staphylococcus Pseudomonas	Liberación controlada de las NPs hasta por 120 h en un ciclo de lavado.	[146]
Polipropileno, Poliéster	Iones de Cu y Zn	Mascarillas quirúrgica N95	<i>Influenza A/B</i> , <i>Coronavirus</i> , <i>Measles</i> , <i>S. pneumoniae</i> <i>H. influenzae</i> , <i>E. aureus</i> <i>M. terrae</i> , <i>A. niger</i> , <i>C. albicans</i> .	Eficacia de inactivación 99.99%	[147]

NPs, así como una breve descripción de su vida útil y su actividad biocida.

#### IV. DESAFÍOS, TENDENCIAS FUTURAS Y OBSERVACIONES FINALES

Según los datos recopilados durante la redacción de esta revisión, resulta obvio que las NPs de sustancias como Ag, Cu, CuO, ZnO, TiO<sub>2</sub> (y otros compuestos, como los de Au, Si, SiO<sub>2</sub>, MgO, etc.), así como algunas de sus combinaciones que conducen a interacciones sinérgicas, tienen propiedades biocidas muy efectivas que les permiten combatir una variedad de virus, hongos, bacterias y microbios. El punto principal es que estos compuestos son capaces de matar patógenos que son resistentes a múltiples antibióticos. Por otro lado, las NPs

muestran una amplia variedad de propiedades fisicoquímicas que motivaron el estudio de su aplicación a productos textiles. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones desarrolladas hasta ahora con textiles modificados por NPs se han dirigido principalmente a la industria alimentaria y salubridad.

Las consecuencias globales de la pandemia actual causada por el virus SARS-CoV-2 han demostrado lo difícil que es contenerlo, incluso en países del primer mundo. Un ejemplo es el elevado número de muertes de personal hospitalario, destacando las graves deficiencias de las medidas actuales de seguridad de la atención médica. Obviamente, es imposible prevenir la aparición de nuevas epidemias o el crecimiento de la población. Ante cada nuevo brote epidémico, y la inexistencia de una vacuna para su combate inmediato, la mejor estrategia son las medidas de seguridad personal.



La transmisión de muchas enfermedades epidémicas se produce a través de la infección del tracto respiratorio, y las máscaras faciales son los dispositivos más asequibles para la población en general. Se usan tanto para su propia protección como para prevenir la propagación de enfermedades virales a través de bioaerosoles, los cuales son liberados durante los estornudos o la tos. Un inconveniente grave que presentan estos dispositivos, es a menudo, una pobre capacidad de filtrado y el hecho de que son filtros pasivos. En el caso de incorporarse NPs con efectos biocidas, su efectividad puede mejorarse significativamente. Además, las máscaras pasivas usadas son una fuente secundaria de infección cuando se arrojan a basureros regulares, convirtiéndose en un riesgo biológico adicional. En este sentido, la sociedad necesita nuevos medios para prevenir o limitar la propagación de microorganismos nocivos, los cuales se pueden obtener modificando los medios de protección ya existentes. La estrategia más apropiada desde nuestro punto de vista, es la mejora del equipo de protección personal (máscaras, batas quirúrgicas, batas de laboratorio, etc.) a través de la funcionalización de los textiles mediante la aplicación de NPs con propiedades oligodinámicas.

El conjunto existente de publicaciones sobre la funcionalización de materiales textiles por diferentes tipos de nanopartículas con propiedades oligodinámicas muestra que: a) las NPs pueden estar fijadas a los textiles, b) las NPs no interfieren con el flujo de aire a través de los textiles funcionalizados y c) los textiles adquieren propiedades biocidas debido a la presencia de las NPs; estas características ayudarán a que sean más efectivas contra brotes pandémicos en el futuro. Por otro lado, se observó que las NPs pueden actuar como atractores de microorganismos patógenos, lo que ayudaría a prevenir que estos se internen a través de la porosidad de la mascarilla. Además, la presencia de NPs biocidas prolonga la vida útil del dispositivo y, al mismo tiempo, reduce la cantidad de residuos bioinfectiosos. Aunque la idea de una mascarilla como un filtro activo funcionalizado con acción biocida surgió no hace mucho tiempo, algunos estudios realizados en esa área demuestran el potencial para un mayor desarrollo a corto plazo.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por los proyectos UNAM PAPIIT IN115920 y Ciencia Básica de CONACYT A1-S-33492. También agradecemos al Dr. Mario Fariás y al Dr. Sergio Fuentes por su revisión y discusión fructífera del texto en este artículo.

#### REFERENCIAS

- [1] "Antibiotic resistance," May 2020. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antibiotic-resistance>
- [2] M. Lobanovska and G. Pilla, "Penicillin's Discovery and Antibiotic Resistance: Lessons for the Future?" *The Yale Journal of Biology and Medicine*, vol. 90, pp. 135–145, 2017.
- [3] F. Amanat and F. Krammer, "SARS-CoV-2 Vaccines: Status Report," *Immunity*, vol. 52, no. 4, pp. 583–589, 2020.
- [4] N. Beyth, Y. Hourri-Haddad, A. Domb, W. Khan, and R. Hazan, "Alternative Antimicrobial Approach: Nano-Antimicrobial Materials," *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, vol. 2015, pp. 1–16, 2015.

- [5] A. Ali, M. Pan, T. B. Tilly, M. Zia, and C. Y. Wu, "Performance of silver, zinc, and iron nanoparticles-doped cotton filters against airborne *E. coli* to minimize bioaerosol exposure," *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 11, no. 10, pp. 1233–1242, 2018.
- [6] I. A. Ivanova, D. Stoyanova, E. Nenova, A. Kostadinova, and A. Staneva, "Antimicrobial and cytotoxic properties of metal nanoparticles and graphene materials," *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, vol. 55, no. 2, pp. 239–250, 2020.
- [7] S. Shaikh, N. Nazam, S. M. D. Rizvi, K. Ahmad, M. H. Baig, E. J. Lee, and I. Choi, "Mechanistic insights into the antimicrobial actions of metallic nanoparticles and their implications for multidrug resistance," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 10, pp. 1–15, 2019.
- [8] L. Deschênes and T. Ells, "Bacteria-nanoparticle interactions in the context of nanofouling," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 277, pp. 2–13, 2020.
- [9] X. Li, Q. Ma, T. Liu, Z. Dong, and W. Fan, "Effect of TiO<sub>2</sub>-nanoparticles on copper toxicity to bacteria: role of bacterial surface," *RSC Advances*, vol. 10, pp. 5058–5065, 2020.
- [10] V. P. Parvathi, M. Umadevi, R. Sasikala, R. Parimaladevi, V. Ragavendran, J. Mayandi, and G. V. Sathe, "Novel silver nanoparticles/activated carbon co-doped titania nanoparticles for enhanced antibacterial activity," *Materials Letters*, vol. 258, pp. 1–5, 2020.
- [11] "DST develops antiviral nano-coatings for making triple layer medical masks and N-95 respirator," May 2020. [Online]. Available: <https://www.sakshieducation.com/Story.aspx?cid=0&sid=0&hid=0&tid=0&nid=264071>
- [12] L. H. Abdel-Rahman, A. M. Abu-Dief, E. F. Newair, and S. K. Hamdan, "Some new nano-sized Cr(III), Fe(II), Co(II), and Ni(II) complexes incorporating 2-(e)-(pyridine-2-ylimino)methyl)naphthalen-1-ol ligand: Structural characterization, electrochemical, antioxidant, antimicrobial, antiviral assessment and DNA interaction," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 160, pp. 18–31, 2016.
- [13] N. Monmaturapoj, A. Sri-on, W. Klinasukhon, K. Boonnak, and C. Praharn, "Antiviral activity of multifunctional composite based on TiO<sub>2</sub>-modified hydroxyapatite," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 92, pp. 96–102, 2018.
- [14] Y.-N. Chen, Y.-H. Hsueh, C.-T. Hsieh, D.-Y. Tzou, and P.-L. Chang, "Antiviral Activity of Graphene-Silver Nanocomposites against Non-Enveloped and Enveloped Viruses," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 13, no. 4, pp. 1–12, 2016.
- [15] J. A. Carver, A. L. Simpson, R. P. Rathi, N. Normil, A. G. Lee, M. D. Force, K. A. Fiocca, C. E. Maley, K. M. DiJoseph, A. L. Goldstein, A. A. Attari, H. L. O'Malley, J. G. Zaccaro, N. M. McCampbell, C. A. Wentz, J. E. Long, L. M. McQueen, F. J. Sirch, B. K. Johnson, M. E. Divis, M. L. Chorney, S. L. DiStefano, H. M. Yost, B. L. Greyson, E. A. Cid, K. Lee, C. J. Yhap, M. Dong, D. L. Thomas, B. E. Banks, R. B. Newman, J. Rodriguez, A. T. Segil, J. A. Siberski, A. L. Lobo, and M. D. Ellison, "Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes and Nanographene Oxide to Overcome Antibiotic Resistance in Tetracycline-Resistant *Escherichia coli*," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 3910–3921, 2020.
- [16] A. Khezerlou, M. Alizadeh-Sani, M. Azizi-Lalabadi, and A. Ehsani, "Nanoparticles and their antimicrobial properties against pathogens including bacteria, fungi, parasites and viruses," *Microbial Pathogenesis*, vol. 123, pp. 505–526, 2018.
- [17] H. Hemeg, "Nanomaterials for alternative antibacterial therapy," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 12, pp. 8211–8225, 2017.
- [18] M. Alavi and M. Rai, "Recent advances in antibacterial applications of metal nanoparticles (MNPs) and metal nanocomposites (MNCs) against multidrug-resistant (MDR) bacteria," *Expert Review of Anti-infective Therapy*, vol. 17, no. 6, pp. 419–428, 2019.
- [19] G. Rocío and I. Betancourt, "Nanomateriales integrados para el desarrollo de equipo de prevención primaria ante el Covid-19," *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 13, no. 25, pp. 1e–18e, 2020.
- [20] C. Weiss, M. Carriere, L. Fusco, I. Capua, J. A. Regla-Nava, M. Pasquali, J. A. Scott, F. Vitale, M. A. Unal, C. Mattevi, D. Bedognetti, A. Merkoçi, E. Tasciotti, A. Yilmazer, Y. Gogotsi, F. Stellacci, and L. G. Delogo, "Toward Nanotechnology-Enabled Approaches against the COVID-19 Pandemic," *ACS Nano*, vol. 14, no. 6, pp. 6383–6406, 2020.
- [21] A. Chin, J. Chu, M. Perera, K. Hui, H.-L. Yen, M. Chan, M. Peiris, and L. Poon, "Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions," *medRxiv*, 2020.
- [22] N. Van Doremalen, T. Bushmaker, D. H. Morris, M. G. Holbrook, A. Gamble, B. N. Williamson, A. Tamin, J. L. Harcourt, N. J.

- Thornburg, S. I. Gerber, J. O. Lloyd-Smith, E. de Wit, and V. J. Munster, "Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1," *New England Journal of Medicine*, vol. 382, no. 16, pp. 1564–1567, 2020.
- [23] G. Palestino, I. García-Silva, O. González-Ortega, and S. Rosales-Mendoza, "Can nanotechnology help in the fight against COVID-19?" *Expert review of anti-infective therapy*, pp. 1–16, 2020.
- [24] M. Vincent, P. Hartemann, and M. Engels-Deutsch, "Antimicrobial applications of copper," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 219, no. 7, pp. 585–591, 2016.
- [25] X. Hang, H. Peng, H. Song, Z. Qi, X. Miao, and W. Xu, "Antiviral activity of cuprous oxide nanoparticles against Hepatitis C Virus in vitro," *Journal of Virological Methods*, vol. 222, pp. 150–157, 2015.
- [26] Q. L. Shimabuku, F. S. Arakawa, M. F. Silva, P. F. Coldebella, T. Ueda-Nakamura, M. R. Fagundes-Klen, and R. Bergamasco, "Water treatment with exceptional virus inactivation using activated carbon modified with silver (Ag) and copper oxide (CuO) nanoparticles," *Environmental Technology*, vol. 38, no. 16, pp. 2058–2069, 2016.
- [27] U. Bogdanović, V. Lazić, V. Vodnik, M. Budimir, Z. Marković, and S. Dimitrijević, "Copper nanoparticles with high antimicrobial activity," *Materials Letters*, vol. 128, pp. 75–78, 2014.
- [28] G. Ren, D. Hu, E. W. C. Cheng, M. A. Vargas-Reus, P. Reip, and R. P. Allaker, "Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications," *International Journal of Antimicrobial Agents*, vol. 33, no. 6, pp. 587–590, 2009.
- [29] A. Javid, M. Kumar, S. Yoon, J. H. Lee, and J. G. Han, "Size-controlled growth and antibacterial mechanism for Cu:C nanocomposite thin films," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 19, no. 1, pp. 237–244, 2017.
- [30] K. Sundberg and V. Champagne, "Effectiveness of Nanomaterial Copper Cold Spray Surfaces on Inactivation of Influenza A Virus," *Journal of Biotechnology & Biomaterials*, vol. 05, no. 04, pp. 1–5, 2015.
- [31] M. Rafique, I. Sadaf, M. S. Rafique, and M. B. Tahir, "A review on green synthesis of silver nanoparticles and their applications," *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, vol. 45, pp. 1272–1291, 2016.
- [32] S. M. Mousavi, S. A. Hashemi, Y. Ghasemi, A. Atapour, A. M. Amani, A. S. Dashtaki, A. Babapour, and O. Arjmand, "Green synthesis of silver nanoparticles toward bio and medical applications: review study," *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, vol. 46, pp. S855–S872, 2018.
- [33] J. Wu, Y. Zheng, W. Song, J. Luan, X. Wen, Z. Wu, X. Chen, Q. Wang, and S. Guo, "In situ synthesis of silver-nanoparticles/bacterial cellulose composites for slow-released antimicrobial wound dressing," *Carbohydrate Polymers*, vol. 102, pp. 762–771, 2014.
- [34] A. Massironi, A. Morelli, L. Grassi, D. Puppi, S. Braccini, G. Maisetta, S. Esin, G. Batoni, C. D. Pina, and F. Chiellini, "Ulvan as novel reducing and stabilizing agent from renewable algal biomass: Application to green synthesis of silver nanoparticles," *Carbohydrate Polymers*, vol. 203, pp. 310–321, 2019.
- [35] S. Ahmed, M. Ahmad, B. L. Swami, and S. Ikram, "A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise," *Journal of Advanced Research*, vol. 7, pp. 17–28, 2016.
- [36] O. Nava, F. N. Murrieta-Rico, M. E. Martínez-Rosas, M. J. Chinchillas-Chinchillas, H. E. Garrafa-Galvez, A. R. Vilchis-Nestor, and P. A. Luque, "Evaluation of electrochemical properties of zinc oxide based semiconductor nanoparticles biosynthesized with *Mentha spicata* for optoelectronic applications," *Materials Letters*, p. 128101, 2020.
- [37] P. A. Luque, O. Nava, G. Romo-Cárdenas, J. I. Nieto-Hipolito, A. R. Vilchis-Nestor, K. Valdez, J. de Dios Sánchez-López, and F. N. Murrieta-Rico, "Facile Zinc Oxide Nanoparticle Green Synthesis Using Citrus reticulata Extract for Use in Optoelectronic Sensors," *IEEE Sensors Journal*, pp. 1–1, 2020.
- [38] M. Behravan, A. H. Panahi, A. Naghizadeh, M. Ziaee, R. Mahdavi, and A. Mirzapour, "Facile green synthesis of silver nanoparticles using Berberis vulgaris leaf and root aqueous extract and its antibacterial activity," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 124, pp. 148–154, 2019.
- [39] T. A. J. de Souza, L. R. R. Souza, and L. P. Franchi, "Silver nanoparticles: An integrated view of green synthesis methods, transformation in the environment, and toxicity," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 171, pp. 691–700, 2019.
- [40] R. Shaikh, I. Zainuddin Syed, and P. Bhende, "Green synthesis of silver nanoparticles using root extracts of Cassia toral L. and its antimicrobial activities," *Asian Journal of Green Chemistry*, vol. 3, pp. 70–81, 2019.
- [41] R. Banasiuk, M. Krychowiak, D. Swigon, W. Tomaszewicz, A. Michalak, A. Chylewska, M. Ziabka, M. Lapinski, B. Koscielska, M. Narczyk, and A. Krolicka, "Carnivorous plants used for green synthesis of silver nanoparticles with broad-spectrum antimicrobial activity," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 13, pp. 1415–1428, 2020.
- [42] M. L. Guimarães, F. A. G. da Silva, M. M. da Costa, and H. P. de Oliveira, "Green synthesis of silver nanoparticles using Ziziphus joazeiro leaf extract for production of antibacterial agents," *Applied Nanoscience*, vol. 10, pp. 1073–1081, 2019.
- [43] B. Y. Öztürk, B. Y. Gürsu, and İ. Dağ, "Antibiofilm and antimicrobial activities of green synthesized silver nanoparticles using marine red algae gelidium corneum," *Process Biochemistry*, vol. 89, pp. 208–219, 2020.
- [44] M. Gousseff, P. Penot, L. Gallay, D. Batisse, N. Benech, K. Bouiller, R. Collarino, A. Conrad, D. Slama, C. Joseph, A. Lemaigren, F.-X. Lescuré, B. Levy, M. Mahevas, B. Pozzetto, N. Vignier, B. Wyplosz, D. Salmon, F. Goehringer, and E. Botelho-Nevers, "Clinical recurrences of COVID-19 symptoms after recovery: Viral relapse, reinfection or inflammatory rebound?" *Journal of Infection*, 2020.
- [45] J. Alizargar, "Risk of reactivation or reinfection of novel coronavirus (COVID-19)," *Journal of the Formosan Medical Association*, 2020.
- [46] M. Ota, "Will we see protection or reinfection in COVID-19?" *Nature Reviews Immunology*, vol. 20, no. 6, pp. 351–351, apr 2020.
- [47] S. E. Eikenberry, M. Mancuso, E. Iboi, T. Phan, K. Eikenberry, Y. Kuang, E. Kostelich, and A. B. Gumel, "To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic," *Infectious Disease Modelling*, 2020.
- [48] J. W. Alexander, "History of the Medical Use of Silver," *Surgical Infections*, vol. 10, pp. 289–292, 2009.
- [49] D. J. Barillo and D. E. Marx, "Silver in medicine: A brief history BC 335 to present," *Burns*, vol. 40, pp. S3–S8, 2014.
- [50] V. Edwards-Jones, "The benefits of silver in hygiene, personal care and healthcare," *Letters in Applied Microbiology*, vol. 49, pp. 147–152, 2009.
- [51] M. Radetić, "Functionalization of textile materials with silver nanoparticles," *Journal of Materials Science*, vol. 48, pp. 95–107, 2012.
- [52] W. Sim, R. Barnard, M. A. T. Blaskovich, and Z. Ziora, "Antimicrobial Silver in Medicinal and Consumer Applications: A Patent Review of the Past Decade (2007–2017)," *Antibiotics*, vol. 7, pp. 1–15, 2018.
- [53] A. Ebrahimzad, M. J. Raee, Z. Manafi, A. S. Jahromi, and Y. Ghasemi, "Ancient and Novel Forms of Silver in Medicine and Biomedicine," *Journal of Advanced Medical Sciences and Applied Technologies*, vol. 2, pp. 122–128, 2016.
- [54] G. Anjana, M. Gowri, C. S. A. Raja, M. Prasath, S. Balakumar, and V. Ganesh, "Silver Nanoparticles as a Non Alcoholic Hospital Disinfectant to Combat Nosocomial Pathogens," *Journal of Bionanoscience*, vol. 9, pp. 102–111, 2015.
- [55] S. P. Deshmukh, S. M. Patil, S. B. Mullani, and S. D. Delekar, "Silver nanoparticles as an effective disinfectant: A review," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 97, pp. 954–965, 2019.
- [56] E. O. Simbine, L. d. C. Rodrigues, J. Lapa-Guimaraes, E. S. Kamimura, C. H. Corassin, and C. A. F. d. Oliveira, "Application of silver nanoparticles in food packages: a review," *Food Science and Technology*, vol. 39, no. 4, pp. 793–802, 2019.
- [57] I. Zorraquín-Peña, C. Cueva, B. Bartolomé, and M. V. Moreno-Arribas, "Silver Nanoparticles against Foodborne Bacteria. Effects at Intestinal Level and Health Limitations," *Microorganisms*, vol. 8, pp. 1–25, 2020.
- [58] R. Thombre, Kamlesh Jangid, Ravi Shukla, and Noton Kumar Dutta, "Editorial: Alternative Therapeutics Against Antimicrobial-Resistant Pathogens," *Frontiers in Microbiology*, vol. 10, pp. 1–2, 2019.
- [59] A. Ivanova, K. Ivanova, A. Tied, T. Heinze, and T. Tzanov, "Layer-By-Layer Coating of Aminocellulose and Quorum Quenching Acylase on Silver Nanoparticles Synergistically Eradicate Bacteria and Their Biofilms," *Advanced Functional Materials*, pp. 1–9, 2020.
- [60] Z. Hussain, M. A. S. Abourehab, S. Khan, and H. E. Thu, "Silver nanoparticles: a promising nanopatform for targeted delivery of therapeutics and optimized therapeutic efficacy," in *Metal Nanoparticles for Drug Delivery and Diagnostic Applications*. Elsevier, 2020, pp. 141–173.
- [61] J. A. Garza-Cervantes, G. Mendiola-Garza, E. M. de Melo, T. I. J. Dugmore, A. S. Matharu, and J. R. Morones-Ramirez, "Antimicrobial activity of a silver-microfibrillated cellulose biocomposite against susceptible and resistant bacteria," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, 2020.
- [62] Z. Zhou, X. Chen, H. Sheng, X. Shen, X. Sun, Y. Yan, J. Wang, and Q. Yuan, "Engineering probiotics as living diagnostics and therapeutics for improving human health," *Microbial Cell Factories*, vol. 19, pp. 1–12, 2020.

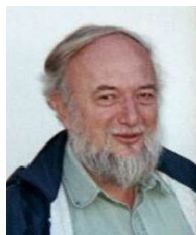
- [63] Z. Harrison, L. Pace, R. Awais, and J. A. Jennings, "Local Delivery of Anti-biofilm Therapeutics," in *Racing for the Surface*. Springer, 2020, pp. 477–510.
- [64] D. S. Mohamed, R. M. A. El-Baky, T. Sandle, S. A. Mandour, and E. F. Ahmed, "Antimicrobial Activity of Silver-Treated Bacteria against other Multi-Drug Resistant Pathogens in Their Environment," *Antibiotics*, vol. 9, pp. 1–14, 2020.
- [65] J. P. Ruparelia, A. K. Chatterjee, S. P. Duttagupta, and S. Mukherji, "Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles," *Acta Biomaterialia*, vol. 4, no. 3, pp. 707–716, 2008.
- [66] E. A. Araújo, N. J. Andrade, L. H. M. da Silva, P. C. Bernardes, Á. V. N. de C. Teixeira, J. P. N. de Sá, J. F. Q. Fialho, and P. E. Fernandes, "Antimicrobial Effects of Silver Nanoparticles against Bacterial Cells Adhered to Stainless Steel Surfaces," *Journal of Food Protection*, vol. 75, no. 4, pp. 701–705, 2012.
- [67] A. Barapatre, K. R. Aadil, and H. Jha, "Synergistic antibacterial and antibiofilm activity of silver nanoparticles biosynthesized by lignin-degrading fungus," *Bioresources and Bioprocessing*, vol. 3, pp. 1–13, 2016.
- [68] M. Qasim, N. Udumluck, J. Chang, H. Park, and K. Kim, "Antimicrobial activity of silver nanoparticles encapsulated in poly-N-isopropylacrylamide-based polymeric nanoparticles," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 13, pp. 235–249, 2018.
- [69] A. Al-Sharqi, K. Apun, M. Vincent, D. Kanakaraju, and L. M. Bilung, "Enhancement of the Antibacterial Efficiency of Silver Nanoparticles against Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria Using Blue Laser Light," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2019, pp. 1–12, 2019.
- [70] P. Surwade, C. Ghildyal, C. Weikel, T. Luxton, D. Peloquin, X. Fan, and V. Shah, "Augmented antibacterial activity of ampicillin with silver nanoparticles against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA)," *Journal of Antibiotics*, vol. 72, pp. 50–53, 2018.
- [71] X. Yan, B. He, L. Liu, G. Qu, J. Shi, L. Hu, and G. Jiang, "Antibacterial mechanism of silver nanoparticles in *Pseudomonas aeruginosa*: proteomics approach," *Metallomics*, vol. 10, pp. 557–564, 2018.
- [72] F. Dong and Y. Zhou, "Differential transformation and antibacterial effects of silver nanoparticles in aerobic and anaerobic environment," *Nanotoxicology*, vol. 13, pp. 339–353, 2019.
- [73] S. Gurunathan, "Rapid biological synthesis of silver nanoparticles and their enhanced antibacterial effects against *Escherichia fergusonii* and *Streptococcus mutans*," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 12, pp. 168–180, 2019.
- [74] M. Sivakumar, S. Surendar, M. Jayakumar, P. Seedeve, P. Sivasankar, M. Ravikumar, M. Anbazhagan, T. Murugan, S. S. Siddiqui, and S. Loganathan, "Parthenium hysterophorus Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles and its Evaluation of Antibacterial and Antineoplastic Activity to Combat Liver Cancer Cells," *Journal of Cluster Science*, pp. 1–11, 2020.
- [75] M. Hashimoto and Y. Honda, "Effect of silver nanoparticle size on biofilm formation," *J. Biomater. Tiss. Eng.*, vol. 9, pp. 450–455, 2019.
- [76] L. Zhang, L. Wu, Y. Mi, and Y. Si, "Silver Nanoparticles Induced Cell Apoptosis, Membrane Damage of *Azotobacter vinelandii* and *Nitrosomonas europaea* via Generation of Reactive Oxygen Species," *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 103, pp. 181–186, 2019.
- [77] S. N. Nyamu, L. Ombaka, E. Masika, and M. Ng'ang'a, "One-pot microwave-assisted synthesis of size-dependent l-glutathione-capped spherical silver nanoparticles suitable for materials with antibacterial properties," *Journal of Interdisciplinary Nanomedicine*, vol. 4, no. 3, pp. 86–94, 2019.
- [78] J. Y. Cheon, S. J. Kim, Y. H. Rhee, O. H. Kwon, and W. H. Park, "Shape-dependent antimicrobial activities of silver nanoparticles," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 14, p. 2773, 2019.
- [79] J. Moon, J. I. Kwak, and Y.-J. An, "The effects of silver nanomaterial shape and size on toxicity to *Caenorhabditis elegans* in soil media," *Chemosphere*, vol. 215, pp. 50–56, 2019.
- [80] H. R. Ali, A. N. Emam, N. F. Koraney, E. G. Hefny, and S. F. Ali, "Combating the prevalence of water-borne bacterial pathogens using anisotropic structures of silver nanoparticles," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, pp. 1–15, 2020.
- [81] F. Qu, H. Xu, H. Wei, W. Lai, Y. Xiong, F. Xu, Z. P. Aguilar, H. Xu, and Y. A. Wang, "Effects of pH and temperature on antibacterial activity of silver nanoparticles," in *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, vol. 5, 2010, pp. 2033–2037.
- [82] V. Sharma, S. Kaushik, P. Pandit, D. Dhull, J. P. Yadav, and S. Kaushik, "Green synthesis of silver nanoparticles from medicinal plants and evaluation of their antiviral potential against chikungunya virus," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 103, no. 2, pp. 881–891, 2019.
- [83] O. Zachar, "Formulations for COVID-19 Early Stage Treatment via Silver Nanoparticles Inhalation Delivery at Home and Hospital," *ScienceOpen Preprints*, 2020.
- [84] S. Sarkar, "Silver Nanoparticles with Bronchodilators Through Nebulisation to Treat COVID 19 Patients," *Journal of Current Medical Research and Opinion*, vol. 3, pp. 449–450, 2020.
- [85] J. Ramyadevi, K. Jeyasubramanian, A. Marikani, G. Rajakumar, and A. A. Rahuman, "Synthesis and antimicrobial activity of copper nanoparticles," *Materials Letters*, vol. 71, pp. 114–116, 2012.
- [86] M. J. Woźniak-Budych, Ł. Przysiecka, K. Langer, B. Peplińska, M. Jarek, M. Wiesner, G. Nowaczyk, and S. Jurga, "Green synthesis of rifampicin-loaded copper nanoparticles with enhanced antimicrobial activity," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 28, no. 3, pp. 1–16, 2017.
- [87] H. Palza, "Antimicrobial polymers with metal nanoparticles," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 16, no. 1, pp. 2099–2116, 2015.
- [88] V. J. Prado, R. A. Vidal, and C. T. Durán, "Application of copper bactericidal properties in medical practice," *Revista Medica de Chile*, vol. 140, no. 10, pp. 1325–1332, 2012.
- [89] N. Febre, V. Silva, A. Baez, H. Palza, K. Delgado, I. Aburto, and V. Silva, "Antibacterial activity of copper salts against microorganisms isolated from chronic infected wounds," *Revista Medica de Chile*, vol. 144, no. 12, pp. 1523–1530, 2016.
- [90] K. Sunada, M. Minoshima, and K. Hashimoto, "Highly efficient antiviral and antibacterial activities of solid-state cuprous compounds," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 235, pp. 265–270, 2012.
- [91] N. Shionoiri, T. Sato, Y. Fujimori, T. Nakayama, M. Nemoto, T. Matsunaga, and T. Tanaka, "Investigation of the antiviral properties of copper iodide nanoparticles against feline calicivirus," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 113, no. 5, pp. 580–586, 2012.
- [92] Y. Fujimori, T. Sato, T. Hayata, T. Nagao, M. Nakayama, T. Nakayama, R. Sugamata, and K. Suzuki, "Novel Antiviral Characteristics of Nano-sized Copper(I) Iodide Particles Showing Inactivation Activity against 2009 Pandemic H1N1 Influenza Virus," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 78, no. 4, pp. 951–955, 2011.
- [93] M. C. Sportelli, M. Izzi, E. A. Kukushkina, S. I. Hossain, R. A. Picca, N. Ditaranto, and N. Cioffi, "Can Nanotechnology and Materials Science Help the Fight against SARS-CoV-2?" *Nanomaterials*, vol. 10, no. 4, pp. 1–12, 2020.
- [94] N. Jones, B. Ray, K. T. Ranjit, and A. C. Manna, "Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms," *FEMS Microbiology Letters*, vol. 279, no. 1, pp. 71–76, 2008.
- [95] W. Chai, S. S. Zakrzewski, D. Günzel, R. Pieper, Z. Wang, S. Twardziok, P. Janczyk, N. Osterrieder, and M. Burwinkel, "High-dose dietary zinc oxide mitigates infection with transmissible gastroenteritis virus in piglets," *BMC Veterinary Research*, vol. 10, no. 1, p. 75, 2014.
- [96] S. S. Shinde, "Antimicrobial Activity of ZnO Nanoparticles against Pathogenic Bacteria and Fungi," *JSM Nanotechnology & Nanomedicine*, pp. 1–9, 2015.
- [97] A. Sirelkhatim, S. Mahmud, A. Seeni, N. H. M. Kaus, L. C. Ann, S. K. M. Bakhori, H. Hasan, and D. Mohamad, "Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism," *Nano-Micro Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 219–242, 2015.
- [98] E. Ozkan, E. Allan, and I. P. Parkin, "White-Light-Activated Antibacterial Surfaces Generated by Synergy between Zinc Oxide Nanoparticles and Crystal Violet," *ACS Omega*, vol. 3, no. 3, pp. 3190–3199, 2018.
- [99] K. M. Varier, W. Liu, Y. Ben-David, Y. Li, A. Chinnasamy, and B. Gajendran, "Light-Activated Nanoparticles for Antibacterial Studies," in *Environmental Chemistry for a Sustainable World*. Springer International Publishing, 2019, pp. 185–216.
- [100] M. Abinaya, B. Vaseeharan, M. Divya, A. Sharmili, M. Govindarajan, N. S. Alharbi, S. Kadaikunnan, J. M. Khaled, and G. Benelli, "Bacterial exopolysaccharide (EPS)-coated ZnO nanoparticles showed high antibiofilm activity and larvicidal toxicity against malaria and zika virus vectors," *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, vol. 45, pp. 93–103, 2018.
- [101] T. E. Antoine, Y. K. Mishra, J. Trigilio, V. Tiwari, R. Adelung, and D. Shukla, "Prophylactic, therapeutic and neutralizing effects of zinc oxide tetrapod structures against herpes simplex virus type-2 infection," *Antiviral Research*, vol. 96, no. 3, pp. 363–375, 2012.
- [102] T. E. Antoine, S. R. Hadigal, A. M. Yakoub, Y. K. Mishra, P. Bhattacharya, C. Haddad, T. Valyi-Nagy, R. Adelung, B. S. Prabhakar,

- and D. Shukla, "Intravaginal zinc oxide tetrapod nanoparticles as novel immunoprotective agents against genital herpes," *The Journal of Immunology*, vol. 196, no. 11, pp. 4566–4575, 2016.
- [103] N. Duggal, D. Jaishankar, T. Yadavalli, S. Hadigal, Y. K. Mishra, R. Adelung, and D. Shukla, "Zinc oxide tetrapods inhibit herpes simplex virus infection of cultured corneas," *Molecular Vision*, vol. 23, pp. 26–38, 2017.
- [104] Y. Jang, J. Park, Y. K. Pak, and J. J. Pak, "Immunosensor based on the ZnO nanorod networks for the detection of h1n1 swine influenza virus," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 12, no. 7, pp. 5173–5177, 2012.
- [105] R. Viter, M. Savchuk, N. Starodub, Z. Balevicius, S. Tumenas, A. Ramanaviciene, D. Jevdokimovs, D. Erts, I. Iatsunskyi, and A. Ramanavicius, "Photoluminescence immunosensor based on bovine leukemia virus proteins immobilized on the ZnO nanorods," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 285, pp. 601–606, 2019.
- [106] G. D. Venkatasubbu, R. Baskar, T. Anusuya, C. A. Seshan, and R. Chelliah, "Toxicity mechanism of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles against food pathogens," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 148, pp. 600–606, 2016.
- [107] Z. Zhu, H. Cai, and D.-W. Sun, "Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) photocatalysis technology for nonthermal inactivation of microorganisms in foods," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 75, pp. 23–35, 2018.
- [108] B. Horvat, A. Rečnik, and G. Dražič, "The growth of anatase bipyramidal crystals during hydrothermal synthesis," *Journal of Crystal Growth*, vol. 347, no. 1, pp. 19–24, 2012.
- [109] J. Lin, P. Li, H. Xu, Y. Kim, Z. Jing, and D. Zheng, "Controlled synthesis of mesoporous single-crystalline TiO<sub>2</sub> nanoparticles for efficient photocatalytic H<sub>2</sub> evolution," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 391, pp. 1–8, 2020.
- [110] L. A. Al-Hajji, A. A. Ismail, M. Alseidi, F. Almutawa, S. Ahmad, and A. Bumajdad, "Green approach and ease synthesis of C/N-codoped TiO<sub>2</sub> nanocrystals for photodegradation of endocrine," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, no. 2, pp. 1–14, 2020.
- [111] K. Santhi, M. Navaneethan, S. Harish, S. Ponnusamy, and C. Muthamizhchelvan, "Synthesis and characterization of TiO<sub>2</sub> nanorods by hydrothermal method with different pH conditions and their photocatalytic activity," *Applied Surface Science*, vol. 500, pp. 1–6, 2020.
- [112] M. V. Liga, S. J. Maguire-Boyle, H. R. Jafry, A. R. Barron, and Q. Li, "Silica decorated TiO<sub>2</sub> for virus inactivation in drinking water – simple synthesis method and mechanisms of enhanced inactivation kinetics," *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no. 12, pp. 6463–6470, 2013.
- [113] G. W. Park, M. Cho, E. L. Cates, D. Lee, B.-T. Oh, J. Vinjé, and J.-H. Kim, "Fluorinated TiO<sub>2</sub> as an ambient light-activated virucidal surface coating material for the control of human norovirus," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 140, pp. 315–320, 2014.
- [114] V. Caratto, L. Ball, E. Sanguineti, A. Insorsi, I. Firpo, S. Alberti, M. Ferretti, and P. Pelosi, "Antibacterial activity of standard and N-doped titanium dioxide-coated endotracheal tubes: an in vitro study," *Revista Brasileira de Terapia Intensiva*, vol. 29, no. 1, pp. 55–62, 2017.
- [115] A. S. Roy, A. Parveen, A. R. Koppalkar, and M. A. Prasad, "Effect of nano-titanium dioxide with different antibiotics against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*," *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, vol. 1, no. 1, pp. 37–41, 2010.
- [116] N. A. Mazurkova, Y. E. Spitsyna, N. V. Shikina, Z. R. Ismagilov, S. N. Zagrebelskiy, and E. I. Ryabchikova, "Interaction of titanium dioxide nanoparticles with influenza virus," *Nanotechnologies in Russia*, vol. 5, no. 5–6, pp. 417–420, 2010.
- [117] T. Takahashi, Y. Shoji, O. Inoue, Y. Miyamoto, and K. Tokuda, "Antibacterial properties of rayon fibers containing titanium oxide photocatalyst," *Biocontrol Science*, vol. 9, no. 3, pp. 51–60, 2004.
- [118] L. Caballero, K. A. Whitehead, N. S. Allen, and J. Verran, "Inactivation of *Escherichia coli* on immobilized TiO<sub>2</sub> using fluorescent light," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 202, no. 2–3, pp. 92–98, 2009.
- [119] S. M. Dizaj, F. Lotfipour, M. Barzegar-Jalali, M. H. Zarrintan, and K. Adibkia, "Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 44, pp. 278–284, 2014.
- [120] L.-Y. Tan, L. T. Sin, S.-T. Bee, C. T. Ratnam, K.-K. Woo, T.-T. Tee, and A. R. Rahmat, "A review of antimicrobial fabric containing nanostructures metal-based compound," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, vol. 25, no. S1, pp. E3–E27, 2017.
- [121] R. H. Piva, M. C. Rocha, D. H. Piva, O. R. K. Montedo, H. Imasato, I. Malavazi, and U. P. Rodrigues-Filho, "Combating pathogens with Cs<sub>2.5</sub>H<sub>0.5</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub> nanoparticles: a new proton-regulated antimicrobial agent," *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 6, no. 1, pp. 143–152, 2018.
- [122] C. H. Nguyen, J. A. Field, and R. Sierra-Alvarez, "Microbial toxicity of gallium- and indium-based oxide and arsenide nanoparticles," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 55, no. 2, pp. 168–178, 2019.
- [123] A. Chokshi, Z. Sifri, D. Cennimo, and H. Horng, "Global contributors to antibiotic resistance," *Journal of Global Infectious Diseases*, vol. 11, no. 1, pp. 36–42, 2019.
- [124] I. Francolini, C. Vuotto, A. Piozzi, and G. Donelli, "Antifouling and antimicrobial biomaterials: an overview," *APMIS*, vol. 125, no. 4, pp. 392–417, 2017.
- [125] I. Francolini and A. Piozzi, "Polymeric Systems as Antimicrobial or Antifouling Agents," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 19, pp. 1–5, 2019.
- [126] A. Carmona-Ribeiro and L. de Melo Carrasco, "Cationic Antimicrobial Polymers and Their Assemblies," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 14, no. 5, pp. 9906–9946, 2013.
- [127] D. S. S. M. Uppu, M. M. Konai, P. Sarkar, S. Samaddar, I. C. M. Fensterseifer, C. Farias-Junior, P. Krishnamoorthy, B. R. Shome, O. L. Franco, and J. Haldar, "Membrane-active macromolecules kill antibiotic-tolerant bacteria and potentiate antibiotics towards Gram-negative bacteria," *PLoS ONE*, vol. 12, no. 8, pp. 1–30, 2017.
- [128] B. Agrillo, M. Balestrieri, M. Gogliettino, G. Palmieri, R. Moretta, Y. Proroga, I. Rea, A. Cornacchia, F. Capuano, G. Smaldone, and L. D. Stefano, "Functionalized Polymeric Materials with Bio-Derived Antimicrobial Peptides for "Active" Packaging," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 3, pp. 1–13, 2019.
- [129] C. N. Galvão, L. M. Sanches, B. I. Mathiazzi, R. T. Ribeiro, D. F. S. Petri, and A. M. Carmona-Ribeiro, "Antimicrobial Coatings from Hybrid Nanoparticles of Biocompatible and Antimicrobial Polymers," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 19, no. 10, pp. 1–13, 2018.
- [130] Y. Gurianov, F. Nakonechny, Y. Albo, and M. Nisnevitch, "Antibacterial Composites of Cuprous Oxide Nanoparticles and Polyethylene," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 2, pp. 1–16, 2019.
- [131] I. Yudovin-Farber, N. Beyth, E. I. Weiss, and A. J. Domb, "Antibacterial effect of composite resins containing quaternary ammonium polyethyleneimine nanoparticles," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 12, no. 2, pp. 591–603, 2009.
- [132] Y. M. Bar-On, A. Flamholz, R. Phillips, and R. Milo, "SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers," *eLife*, vol. 9, pp. 1–15, 2020.
- [133] E. O. Ogunsona, R. Muthuraj, E. Ojogbo, O. Valerio, and T. H. Mekonnen, "Engineered nanomaterials for antimicrobial applications: A review," *Applied Materials Today*, vol. 18, pp. 1–32, 2020.
- [134] S. ul-Islam Shahid-ul Islam, B. S. Butola, and F. Mohammad, "Silver nanomaterials as future colorants and potential antimicrobial agents for natural and synthetic textile materials," *RSC Advances*, vol. 6, no. 50, pp. 44 232–44 247, 2016.
- [135] E. Acayanka, J.-B. Tarkwa, K. N. Nchimi, S. A. Y. Voufou, A. Tiya-Djowe, G. Y. Kamgang, and S. Laminsi, "Grafting of N-doped titania nanoparticles synthesized by the plasma-assisted method on textile surface for sunlight photocatalytic self-cleaning applications," *Surfaces and Interfaces*, vol. 17, pp. 1–7, 2019.
- [136] S. S. B. Touhid, M. R. K. Shawon, N. A. Khoso, Q. Xu, D. Pan, and X. Liu, "TiO<sub>2</sub>/Cu Composite NPs Coated Polyester Fabric for the Enhancement of Antibacterial Durability," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 774, pp. 1–16, 2020.
- [137] R. Singh, "Microwave Mediated Impregnation of Silver Nanoparticles on Silk Fabric for Hygienic Clothing," *Journal of Bacteriology & Mycology*, vol. 5, pp. 1–4, 2017.
- [138] A. G. Rodrigues, P. J. R. de Oliveira Gonçalves, C. A. Ottoni, R. de Cássia Ruiz, M. A. Morgano, W. L. de Araújo, I. S. de Melo, and A. O. D. Souza, "Functional textiles impregnated with biogenic silver nanoparticles from *Bionectria ochroleuca* and its antimicrobial activity," *Biomedical Microdevices*, vol. 21, pp. 1–10, 2019.
- [139] R. R. Gadkari, S. W. Ali, A. Das, and R. Alagirusamy, "Chapter 13 - Nanoparticles: a novel use in bioactive textiles," in *Handbook of Nanomaterials for Manufacturing Applications*, C. M. Hussain, Ed. Elsevier, 2020, pp. 297–306.
- [140] S. A. Noorian, N. Hemmatinejad, and J. A. R. Navarro, "Ligand modified cellulose fabrics as support of zinc oxide nanoparticles for

- UV protection and antimicrobial activities,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 154, pp. 1215–1226, 2020.
- [141] Ž. Senić, S. Bauk, M. Vitorović-Todorović, N. Pajić, A. Samolov, and D. Rajić, “Application of TiO<sub>2</sub> nanoparticles for obtaining self-decontaminating smart textiles,” *Scientific Technical Review*, vol. 61, no. 3–4, pp. 63–72, 2011.
- [142] G. Borkow, S. S. Zhou, T. Page, and J. Gabbay, “A Novel Anti-Influenza Copper Oxide Containing Respiratory Face Mask,” *PLoS ONE*, vol. 5, no. 6, pp. 1–8, 2010.
- [143] C. B. Hiragond, A. S. Kshirsagar, V. V. Dhapte, T. Khanna, P. Joshi, and P. V. More, “Enhanced anti-microbial response of commercial face mask using colloidal silver nanoparticles,” *Vacuum*, vol. 156, pp. 475–482, 2018.
- [144] Y. Li, P. Leung, L. Yao, Q. W. Song, and E. Newton, “Antimicrobial effect of surgical masks coated with nanoparticles,” *Journal of Hospital Infection*, vol. 62, no. 1, pp. 58–63, 2006.
- [145] B. Gutarowska and A. Michalski, “Antimicrobial activity of filtrating meltblown nonwoven with the addition of silver ions,” *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, no. 3 (74), pp. 23–28, 2009.
- [146] D. Kharaghani, M. Khan, A. Shahzad, Y. Inoue, T. Yamamoto, S. Rozet, Y. Tamada, and I. Kim, “Preparation and In-Vitro Assessment of Hierarchical Organized Antibacterial Breath Mask Based on Polyacrylonitrile/Silver (PAN/AgNPs) Nanofiber,” *Nanomaterials*, vol. 8, no. 7, pp. 1–12, 2018.
- [147] A. M. Davison, “Pathogen inactivation and filtration efficacy of a new anti-microbial and anti-viral surgical facemask and N95 against dentistry-associated microorganisms,” *International Dentistry Australasian Edition*, vol. 7, pp. 36–42, 2012.
- [148] G. Borkow and J. Gabbay, “Putting copper into action: copper-impregnated products with potent biocidal activities,” *The FASEB Journal*, vol. 18, no. 14, pp. 1728–1730, 2004.
- [149] A. R. Abbasi, N. Noori, A. Azadbakht, and M. Bafarani, “Dense coating of surface mounted Cu<sub>2</sub>O nanoparticles upon silk fibers under ultrasound irradiation with antibacterial activity,” *Journal of the Iranian Chemical Society*, vol. 13, no. 7, pp. 1273–1281, 2016.
- [150] Q. Xu, X. Ke, N. Ge, L. Shen, Y. Zhang, F. Fu, and X. Liu, “Preparation of Copper Nanoparticles Coated Cotton Fabrics with Durable Antibacterial Properties,” *Fibers and Polymers*, vol. 19, no. 5, pp. 1004–1013, 2018.
- [151] L. E. Román, J. Huachani, C. Uribe, J. L. Solís, M. M. Gómez, S. Costa, and S. Costa, “Blocking erythemally weighted UV radiation using cotton fabrics functionalized with ZnO nanoparticles in situ,” *Applied Surface Science*, vol. 469, pp. 204–212, 2019.
- [152] T. Shaheen, M. E. El-Naggar, A. M. Abdelgawad, and A. Hebeish, “Durable antibacterial and UV protections of in situ synthesized zinc oxide nanoparticles onto cotton fabrics,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 83, pp. 426–432, 2016.
- [153] B. A. Çakır, L. Budama, Önder Topel, and N. Hoda, “Synthesis of ZnO nanoparticles using PS-b-PAA reverse micelle cores for UV protective, self-cleaning and antibacterial textile applications,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 414, pp. 132–139, 2012.
- [154] S. Selvam and M. Sundrarajan, “Functionalization of cotton fabric with PVP/ZnO nanoparticles for improved reactive dyeability and antibacterial activity,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 87, no. 2, pp. 1419–1424, 2012.
- [155] S. Pal, S. Mondal, and J. Maity, “Synthesis, characterization and photocatalytic properties of ZnO nanoparticles and cotton fabric modified with ZnO nanoparticles via in-situ hydrothermal coating technique: Dual response,” *Materials Technology*, vol. 33, no. 14, pp. 884–891, 2018.
- [156] S. A. B. Sharifuddin, S. B. Ismail, I. Abdullah, I. Mohamad, and J. S. Mohammed, “Antibacterial evaluation of activated carbon cloth with Ag<sup>+</sup> impregnated with ZnO nanoparticles,” *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 23, no. 3, pp. 232–243, 2019.
- [157] A. Baji, K. Agarwal, and S. V. Oopath, “Emerging Developments in the Use of Electrospun Fibers and Membranes for Protective Clothing Applications,” *Polymers*, vol. 12, no. 2, pp. 1–20, 2020.
- [158] A. K. Yetisen, H. Qu, A. Manbachi, H. Butt, M. R. Dokmeci, J. P. Hinestroza, M. Skorobogatiy, A. Khademhosseini, and S. H. Yun, “Nanotechnology in Textiles,” *ACS Nano*, vol. 10, no. 3, pp. 3042–3068, 2016.
- [159] L. M. Margarucci, V. Romano Spica, and C. Protano, “Potential antimicrobial effects of photocatalytic nanotechnologies in hospital settings,” *Ann Ig*, no. 5, pp. 461–473, 2019.
- [160] B. Mahltig and H. Miao, “Microwave-assisted preparation of photoactive TiO<sub>2</sub> on textile substrates,” *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 14, no. 3, pp. 721–733, 2017.
- [161] A. Nazari, “Superior Self-cleaning and Antimicrobial Properties on Cotton Fabrics Using Nano Titanium Dioxide along with Green Walnut Shell Dye,” *Fibers and Polymers*, vol. 20, no. 12, pp. 2503–2509, 2019.
- [162] R. M. El-Shishtawy, A. M. Asiri, N. A. M. Abdelwahed, and M. M. Al-Otaibi, “In situ production of silver nanoparticle on cotton fabric and its antimicrobial evaluation,” *Cellulose*, vol. 18, no. 1, pp. 75–82, 2011.
- [163] M. D. Teli and J. Sheikh, “Modified bamboo rayon–copper nanoparticle composites as antibacterial textiles,” *International journal of biological macromolecules*, vol. 61, pp. 302–307, 2013.



**Rosario I. Yocupicio-Gaxiola** nació en Los Mochis, Sinaloa, México. Egresó de la Carrera de Ingeniería Química en el Instituto Tecnológico de Los Mochis, del Tecnológico Nacional de México, en el año 2007. Se tituló como Maestro y Doctor en Ciencia e ingeniería de materiales por la Universidad Nacional Autónoma de México en los años 2011 y 2017, respectivamente. Desde el 2017 a 2019, se desempeñó como investigador posdoctoral en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM. Actualmente es investigador posdoctoral en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California. Sus intereses de investigación están relacionados con la síntesis, análisis y aplicaciones de materiales porosos, específicamente, el estudio de MOF y zeolitas jerárquicas y en bulto. Su investigación está enfocada al uso de estos materiales como catalizadores, soportes catalíticos, sorbentes y dispositivos ópticos.



**Vitalii Petranovskii** realizó sus estudios de doctorado en el Instituto de Cristalografía, Moscú, Rusia (1988). Desde 1993 hasta 1994 trabajó como investigador invitado en el Instituto Nacional de Materiales e Investigación Química en Japón. A partir de 1995 ha estado trabajando en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (fue jefe de departamento de Nanocatálisis desde 2006 a 2014). Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, la Asociación Internacional de Zeolitas y la Sociedad Química D.I.

Mendelev de Rusia. Ha publicado más de 160 artículos en revistas arbitradas y 5 capítulos de libro. También es el coautor de la monografía *Clusters and Matrix Isolated Clustered Superstructures* (San Petersburgo, 1995). Sus intereses de investigación incluyen la síntesis y propiedades de nanopartículas depositadas en matrices zeolíticas, y la modificación de las matrices zeolíticas para su uso en alta tecnología.



**Perla Sánchez** estudió Ingeniería Química en el Instituto Tecnológico de Los Mochis, titulándose en 2011. Recibió los grados de Maestra y Doctora en Ciencia e Ingeniería de Materiales por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 2014 y 2019, respectivamente. Desde 2019 se encuentra realizando una investigación posdoctoral en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM. Sus intereses de investigación están enfocados en la síntesis y estudio de catalizadores multimetálicos soportados en zeolitas con aplicaciones en la protección del medio ambiente y en la transformación de hidrocarburos pesados. En 2014 recibió mención honorífica al obtener el grado de Maestra en Ciencias por la UNAM y en 2020 la Academia de Catálisis le otorgó mención honorífica por la mejor tesis de doctorado en catálisis.



**Joel Antúnez-García** recibió el título de licenciado en Física por parte de la Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, en 1999, el grado de Maestro en Ciencias por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, en el 2003 y el grado de Doctor en Ingeniería Física-Industrial por la Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, en 2010. Del 2011 a 2013, estuvo realizando una estancia posdoctoral en la Universidad Nacional Autónoma de México, Baja California. Del 2013

al 2015 se desempeñó como profesor de tiempo completo en el CETYS-Universidad. Desde del 2015 ha estado trabajando como investigador posdoctoral en la UNAM. Sus temas de interés en la investigación, incluyen el estudio a través de cálculos DFT de las propiedades catalíticas de zeolitas y en compuestos bi- y tri-metálicos, y simulaciones de dinámica molecular de cúmulos metálicos.



**Gabriel Alonso-Núñez** es originario del estado de Veracruz, obtuvo la licenciatura de Químico Industrial en la UABC, en Tijuana, B.C. (1987) y la maestría en Ciencias Químicas en el Centro de Graduados del Instituto Tecnológico, Tijuana, Mexico (1994). El doctorado en Física de Materiales lo obtuvo en 1998, en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE-UNAM). Llevó a cabo un posdoctorado en la Universidad de Texas en El Paso, TX, USA (1999-2002). La línea de investigación en la que se

destaca su trabajo de investigación es en el área de síntesis de nanoestructuras (óxidos, sulfuros y nanotubos de carbono) con aplicación en catálisis y electrocatálisis. El Dr. Alonso trabajó como investigador en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Chihuahua, México (2002-2008) donde formó el Laboratorio de Catálisis. En el año 2008 se incorporó al Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM, Ensenada, B.C. en donde trabaja actualmente como investigador titular. El Dr. Alonso ha publicado 3 capítulos de libro y 170 artículos de investigación científica en revistas internacionales indizadas y tiene 3 patentes internacionales, ha graduado a 17 estudiantes de licenciatura y 40 estudiantes de posgrado, le han otorgado constancias como asesor y evaluador internacional de proyectos de investigación y ha impartido 40 pláticas invitadas nacionales e internacionales. El Dr. Alonso tiene reconocimiento nivel 3 del Sistema Nacional de Investigadores en México.



**Donald H. Galván** terminó la licenciatura en Físico-Matemáticas en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León. Estudió la maestría en ciencias, Física, en la Universidad del Sur de Illinois, Carbondale, Illinois, EUA y obtuvo el grado de Doctor en Filosofía en Ciencia Molecular, Física, en la misma universidad. Sus áreas de investigación incluyen estudio de materiales superconductores de alta  $T_c$ , producción y caracterización de sus propiedades de transporte, producción y caracterización de nanotubos de carbón

y de dicalcogenuros, estudio de las propiedades electrónicas y magnéticas de sistemas cristalinos utilizando cálculos extendidos de Huckel, y de primeros principios con otros programas especializados.



**Fabian N. Murrieta-Rico** obtuvo los títulos de Ingeniero en Mecatrónica y Maestro en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Mexicali (ITM) en 2008 y 2013 respectivamente, en 2017 obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en Física de Materiales en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California. Actualmente trabaja como docente de asignaturas de Bioingeniería en la Universidad Autónoma de Baja California y como investigador posdoctoral en el Centro de Nanociencias y Nanotec-

nología de la Universidad Nacional Autónoma de México (CNYN-UNAM). Los reconocimientos obtenidos a su trabajo incluyen "Outstanding Paper in the 2017 Emerald Literati Network Awards for Excellence" por el artículo titulado "Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application" publicado en *Industrial Robot: An International Journal*, "the best session presentation award" otorgado al trabajo titulado "Resolution improvement of accelerometers measurement for drones in agricultural applications" y presentado en "IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society". Sus intereses de investigación están enfocados en el estudio de nuevas técnicas de medición de parámetros de tiempo y frecuencia, desarrollo de sensores modificados con nanomateriales y aplicaciones de materiales zeolíticos.