

Residuos orgánicos: Fuente de compuestos antioxidantes y reductores benéficos para la salud

Carlos Enrique Escárcega-González^{a*}, Alexis Adrián Coria-Reyes^a, Lizbeth Liliana Díaz-Muñoz^a, Adilson Guadalupe García-González^{a,b} Javier Emanuel Castañeda-Aude^{a,b},

^aUniversidad Autónoma de Nuevo León, UANL. Facultad de Ciencias Químicas. Av. Universidad s/n. CD. Universitaria, 66455, San Nicolás de los Garza, NL, México.

^bCentro de Investigación en Biotecnología y Nanotecnología, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, Km. 10 autopista al Aeropuerto Internacional Mariano Escobedo, Apodaca, Nuevo León 66629, México.

* E-mail: carlos.escarcegagzz@uanl.edu.mx

Recibido 01 de Abril de 2024, Aceptado 28 de Junio de 2024

Resumen

El creciente problema de los residuos orgánicos, especialmente en la industria alimentaria, contribuye significativamente a la contaminación ambiental. En respuesta, México ha adoptado los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU para mejorar la gestión de residuos. Un enfoque innovador es reutilizar estos residuos para obtener antioxidantes, que además de los beneficios que presentan en la salud, tienen aplicaciones en industrias de bioenergéticos, farmacéutica y cosmética, así como en la síntesis de nanopartículas metálicas con propiedades antimicrobianas y terapéuticas. Este método no solo reduce el impacto ambiental y promueve la economía circular, sino que también ofrece soluciones sostenibles y económicas para mejorar la salud pública. Por lo tanto, el presente trabajo explica un breve panorama de la situación actual del país y las posibles alternativas para el aprovechamiento de los mencionados residuos.

Palabras clave: Aprovechamiento de residuos orgánicos, antioxidantes, síntesis verde, nanomateriales, oxidación celular.

Abstract

The growing issue of organic waste, particularly in the food industry, significantly contributes to environmental pollution. In response, Mexico has adopted the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs) to improve waste management. An innovative approach is to reuse this waste to obtain antioxidants, which, in addition to their health benefits, have applications in the bioenergy, pharmaceutical, and cosmetic industries, as well as in the synthesis of metal nanoparticles with antimicrobial and therapeutic properties. This method not only reduces environmental impact and promotes the circular economy, but also offers sustainable and cost-effective solutions to improve public health. Therefore, this work provides a brief overview of the current situation in the country and the possible alternatives for utilizing the mentioned waste.

Keywords: Utilization of organic waste, antioxidants, green synthesis, nanomaterials, cellular oxidation.

1. Residuos orgánicos y su relación con la contaminación ambiental

Durante los últimos años, el incremento de la población y su alto consumo de recursos naturales han generado una cantidad excesiva de residuos provenientes de alimentos procesados o productos agroindustriales [1]. En particular, las actividades del procesamiento de alimentos producen cinco mil millones de toneladas métricas de residuos al año [2]. Esto a menudo se debe a sistemas de gestión de residuos insuficientes y a instalaciones de disposición inadecuadas en numerosas

regiones, principalmente debido a los altos costos asociados con la gestión de residuos y a una legislación insuficiente [3].

Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ha reportado que alrededor de un tercio de los alimentos producidos no son consumidos por la población, por lo que terminan desaprovechándose y generándose una gran cantidad de residuos (Objetivo de Desarrollo Sostenible No. 12). Lo que significa que cerca de 1300 millones de toneladas de comida que llega a los hogares se desperdicia al año [4].

La suma de residuos generados en ambas fuentes ha ocasionado varios problemas ambientales que son de importancia mayor, ya que se ha observado un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero, la destrucción de áreas naturales y, el uso ineficiente de recursos naturales como el agua y la tierra [1], motivo por el cual, diversos investigadores han centrado su interés en dicha problemática.

2. Los residuos orgánicos y los Objetivos del Desarrollo Sostenible en México

Con lo anterior, en la búsqueda de estrategias para reducir, mitigar y/o evitar la problemática de la contaminación del medio ambiente y de esta forma mejorar la calidad de vida en México, el gobierno de este país ha firmado acuerdos que abordan el programa para el alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la última Cumbre de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) llevada a cabo en el año 2015 [5]. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de la ONU, dicho programa cuenta con 17 ODS, 169 metas y 231 indicadores que tienen el propósito de proteger y cuidar al medio ambiente, contrarrestar e impedir el cambio climático mundial, promover el desarrollo sostenible, abatir la pobreza y promover el bienestar de las poblaciones.

Entre dichos objetivos, la problemática sobre la generación, acumulación, gestión y disposición final de los residuos orgánicos se relaciona directa o indirectamente con los siguientes [6]:

- ✓ Agua limpia y saneamiento: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.
- ✓ Energía asequible y no contaminante: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.
- ✓ Trabajo decente y crecimiento económico: Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.
- ✓ Ciudades y comunidades sostenibles: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles
- ✓ Producción y consumo responsables: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.
- ✓ Acción por el clima: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
- ✓ Vida submarina: Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos.
- ✓ Vida de ecosistemas terrestres: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad.

Estos objetivos mencionados han sido diseñados con el propósito de mejorar la calidad de vida de los mexicanos y proteger el medio ambiente mediante la gestión de residuos orgánicos. La implementación de estos acuerdos

busca enfrentar de manera integral los desafíos ambientales y promover un desarrollo sostenible en el país.

3. Aprovechamiento y usos de los residuos orgánicos en la actualidad

Bajo estas premisas, el aprovechamiento de los residuos orgánicos ha demostrado ser de gran importancia, que ya a través de dicho manejo se intenta obtener productos de valor agregado, reduciendo los problemas medio ambientales mencionados [7]. Específicamente, los residuos que provienen de la industria alimentaria pueden ser tratados y aprovechados para la obtención de productos como los bioenergéticos, biomateriales, biocompuestos, productos farmacéuticos, entre otros [5,8].

Por otro lado, diversos estudios proponen el uso de residuos orgánicos como fuente de obtención de compuestos bioactivos, entre los cuales se destacan los antioxidantes [9]. Entre los más importantes se encuentran los polifenoles, compuestos que presentan grupos fenólicos o fenoles en su estructura química, con propiedades bio- y fisicoquímicas interesantes que tienen acción en diferentes procesos oxidativos [10]. Los polifenoles se clasifican en cuatro familias de acuerdo con el número de anillos fenólicos y a los grupos funcionales unidos a estos, siendo entonces los ácidos fenólicos, taninos, ligninas y flavonoides. Específicamente, los flavonoides son el grupo más grande y con mayor actividad antioxidante de los polifenoles [11]. Estos compuestos bioactivos pueden tener distintas aplicaciones en diferentes industrias tales como la farmacéutica, cosmética y alimentaria, además de ser utilizados como ingrediente en las dietas alimentarias de los animales, entre otros [12], ver Tabla I.

En este sentido, vale la pena señalar algunas de las aplicaciones más interesantes por parte de los antioxidantes, como son la síntesis verde de nanopartículas metálicas [13], suplementos alimenticios [13], productos tópicos [14,15], entre otros, que presentan propiedades benéficas para la salud.

Particularmente, la síntesis verde de nanomateriales metálicos ha sido estudiada debido al poder reductor que los antioxidantes tienen al estar en contacto con sales metálicas de Ag, Cu, Fe, Zn, entre otros [16]. Este tipo de nanomateriales verdes pueden presentar propiedades útiles en algunos campos de estudio, por ejemplo, como agentes antimicrobianos efectivos que pueden ser aplicados en el área de la salud y, como agentes catalíticos para remediación del medio ambiente (suelo, agua y aire) [17].

Especialmente, estos nanomateriales metálicos que han sido aplicados en el área médica continúan siendo objeto de estudio debido a sus propiedades bactericidas que permiten evitar el crecimiento de distintas cepas. Además, en la actualidad, existe el interés en el uso de materiales de esta naturaleza como suplementos alimentarios [18], productos farmacéuticos como cremas

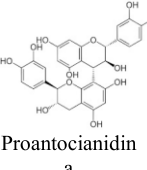
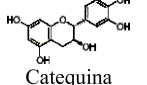
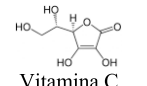
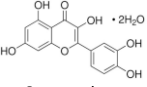
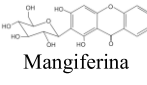
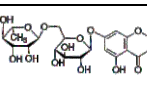
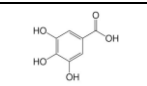
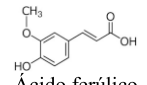
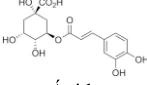
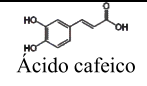
[19] o hidrogeles [20] que tienen acción micótica, o bien, para el tratamiento antibiótico, que, unidos a otros medicamentos pueden actuar de manera conjunta mejorando la acción antibiótica ya existente, sin embargo, aún existe la incertidumbre acerca de la toxicidad de estas nanopartículas en el cuerpo [16]. Por otra parte, los antioxidantes que han sido empleados como suplementos alimenticios presentan diversas ventajas en la salud celular, por lo que existen diferentes productos que son comercializados en la actualidad y que tienen acción benéfica en el cuerpo [15].

Finalmente, es necesario resaltar que para obtener cada producto deseado es necesario conocer las propiedades y características de estos y su impacto en el área de aplicación, por lo tanto, algunos países desarrollados han llevado a cabo investigaciones e implementado estrategias para aprovechar y revalorizar residuos orgánicos. De esta manera, dichos residuos que, inicialmente, son productos secundarios o indeseados, pueden convertirse en materia prima para la obtención de compuestos benéficos, como los antioxidantes, contribuyendo además en la reducción del impacto negativo ambiental que estos producen [5].

La figura 1 refleja la tendencia hacia un creciente interés en la investigación sobre el aprovechamiento de residuos orgánicos para la obtención de agentes antioxidantes y reductores. La Figura 1A muestra un crecimiento constante en el interés general por los residuos orgánicos, alcanzando cerca de 30,000 publicaciones en 2022. La Figura 1B destaca un incremento más reciente y acelerado en estudios que vinculan residuos orgánicos con propiedades antioxidantes, superando los 900 artículos en 2022. La Figura 1C, aunque con menor volumen, muestra un interés creciente en el uso de residuos orgánicos como antioxidantes y agentes reductores. Finalmente, la Figura 1D presenta un aumento notable en investigaciones sobre la aplicación de residuos orgánicos en nanopartículas, alcanzando alrededor de 1,800 publicaciones en 2023. Estos datos sugieren un enfoque cada vez más diversificado y especializado en el estudio de los residuos orgánicos.

Las siguientes secciones describen de forma breve la acción de los antioxidantes en algunas de sus aplicaciones.

Tabla I.- Aplicaciones de antioxidantes obtenidos a partir de residuos orgánicos

Residuo orgánico/Antioxidante obtenido	Estructuras representativas	Aplicación	Referencia
Piel de manzana/ Proantocianidina, flavan-3-oles, flavonoles y antocianina	 Proantocianidina a	Reducir la oxidación de ácidos grasos en alimentos	[21]
Cáscara de plátano/ Fenoles y flavonoides	 Catequina	Producir gelatina con propiedades antioxidantes	[22]
Residuo de hojas y tallos del brócoli/ Ácidos fenólicos, flavonoides y vitamina C	 Vitamina C	Ingrediente en bebidas novedosas	[23]
Piel de granada/Fenoles	 Quercetina	Prevención de la oxidación en el queso panir	[24]
Piel de cítricos/ Flavonoides	 Mangiferina	Mejora la calidad nutricional de los alimentos	[25]
Piel y semilla de mango/ Polifenoles y carotenoides	 Hesperidina	Aditivo natural para el aceite vegetal <i>Sacha inchi</i>	[26]
Cáscara de naranja/ Flavonoides	 Ácido gálico	Efecto inhibitorio sobre <i>Staphylococcus aureus</i>	[27]
Desechos de uva en la producción de vino/ Ácido gálico	 Ácido férulico	Conservante natural	[28]
Semilla de aguacate/ Polifenoles	 Ácido clorogénico	Fabricación de crema exfoliante	[29]
Residuos de café (Posos de café)/ Polifenoles	 Ácido cafeico	Conservante natural de aceites y productos cárnicos	[30]

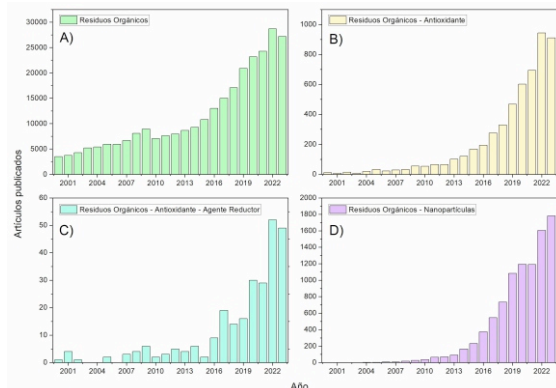


Figura 1. Incremento en el número de artículos publicados sobre residuos orgánicos en diferentes contextos. A) en general, B) como antioxidantes, C) como antioxidantes y agentes reductores, D) en la síntesis de nanopartículas desde el año 2000 hasta 2023. Fuente: Web of Science

4. Antioxidantes y Radicales libres

Como se mencionó en previas secciones, los antioxidantes han sido ampliamente estudiados por sus diversas propiedades que le permiten tener diferentes aplicaciones, como en el área de la salud.

Bajo este contexto, un antioxidante es una biomolécula que tiene la capacidad de evitar la oxidación de otras moléculas. Durante el proceso de oxidación, se transfieren electrones de una sustancia a otra la cual pueda recibirlos. Sin embargo, durante esta reacción química pueden producirse radicales libres que pueden interactuar con estructuras celulares causando daños en las mismas [16]. Los radicales libres son moléculas que tienen electrones libres o desapareados, por lo tanto, requieren de un electrón para estabilizarse. Por ello, los radicales libres al ser muy reactivos, roban electrones de moléculas estables para así alcanzar su estabilidad electroquímica, y por consecuencia, la molécula antes estable se convierte en un radical libre iniciando así reacciones en cadena provocando daño a otras moléculas presentes en estructuras celulares como membranas, las mismas células y tejidos.

Por otro lado, conviene señalar que el daño producido por radicales libres se debe principalmente a un aumento en su concentración en los sistemas biológicos. Además, en organismos como el ser humano, algunas células producen radicales libres de manera controlada con la finalidad de combatir virus y bacterias [17].

Al respecto, es importante mencionar que el oxígeno es indispensable para los organismos aerobios, ya que es pieza clave en el proceso de obtención de energía de las células. Sin embargo, durante este proceso aerobio se pueden generar radicales libres de oxígeno o mejor dicho especies reactivas de oxígeno (ERO), tales como el superóxido, peróxido, alcoxi, hidroxilo y peróxido de hidrógeno, que son los tipos de radicales que más pueden afectar a las células. Además, las ERO, en su búsqueda

de estabilización, reaccionan con moléculas como el óxido nítrico, lo que conlleva a la producción de especies reactivas de nitrógeno [31].

Ahora bien, en los humanos, las células poseen mecanismos antioxidantes endógenos protectores para neutralizar el ataque de los radicales libres. Dicha protección es realizada por enzimas catalíticas entre las cuales destacan la superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa, siendo esta última fundamental en la defensa de las células contra la acción de los radicales libres [32]. Sin embargo, en ciertas condiciones la actividad de dichas enzimas para neutralizar a los radicales libres es insuficiente, por lo que es necesario y posible obtener compuestos antioxidantes a partir del consumo de alimentos o suplementos alimenticios que contengan compuestos antioxidantes exógenos, como por ejemplo algunas vitaminas (A, C, E) y compuestos fenólicos [33].

5. Estrés oxidativo

En las células y tejidos, durante los procesos bioquímicos y fisiológicos, la concentración de radicales libres depende del equilibrio entre su producción y su eliminación por parte de los mecanismos antioxidantes celulares tanto exógenos como endógenos. Por ello, en condiciones de concentraciones elevadas de radicales libres, las células expresan genes para la producción de moléculas con actividad antioxidante [34]. Sin embargo, cuando la velocidad de producción de radicales libres es mayor a la de eliminación durante un tiempo prolongado, se rompe el equilibrio provocando un fenómeno denominado estrés oxidativo [31]. Durante este estado, los radicales libres pueden reaccionar, atacar y alterar componentes de proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, provocando cambios bioquímicos y fisiológicos en la célula [35]. Como consecuencia de este tipo de cambios y alteraciones, se puede favorecer la aparición y/o desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas tales como la cirrosis [36], aterosclerosis, cardiomiopatías, enfermedades neurológicas y cáncer [17].

6. Beneficios de los antioxidantes en la salud

Como se ha mencionado anteriormente, los antioxidantes son capaces de neutralizar radicales libres protegiendo la integridad de las células y tejidos. Por ejemplo, la vitamina E es el principal antioxidante protector de lípidos presentes en las membranas celulares contra el daño oxidativo, mientras que en conjunto con la vitamina C pueden regenerarla a su estado activo [32]. Por su parte, el resveratrol es un compuesto fenólico antioxidante que puede activar directamente una proteína que promueve la salud y la longevidad en modelos animales [37]. Al respecto, se conoce que los flavonoides ejercen actividad antioxidante en diferentes sistemas biológicos, además tienen la capacidad de regular ciertas actividades enzimáticas de la membrana celular, por lo que pueden ejercer una influencia positiva en diversos

procesos de dicha membrana tales como la señalización celular, el ciclo celular, la funcionalidad de las mitocondrias entre otros [11].

Por otra parte, se sabe actualmente que enfermedades pulmonares producidas por la contaminación ambiental como es el asma pueden ser prevenidas por el consumo de antioxidantes como las vitaminas C y E [38]. Además, se han reportado efectos benéficos en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares mediante el consumo de polifenoles; tal es el caso de un estudio donde se llevó a cabo el consumo de soja que contiene isoflavonas (antioxidantes), encontrándose una reducción del riesgo de infarto en el miocardio [39]. Por lo tanto, aunque el cuerpo humano tiene mecanismos antioxidantes naturales, a veces estos no son suficientes, haciendo necesario el consumo de antioxidantes externos a través de alimentos o suplementos.

En la Figura 2, se muestra el mecanismo de acción de los radicales libres, así como el mecanismo antioxidante para estabilizarlo. Se puede observar que, en buena parte, la membrana celular presente en las células animales se conforma de lípidos. Cuando hay un radical libre cerca, este le roba un electrón al lípido para estabilizarse generando así un lípido radical con carga positiva que comienza una reacción similar en cadena con otros lípidos produciendo daños a la membrana celular. Para evitar lo anterior, los antioxidantes donan un electrón a los radicales libres para evitar que éstos roben electrones a los lípidos membranales, protegiendo así la integridad a la membrana celular.

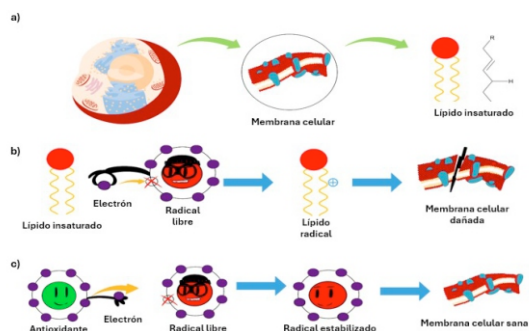


Figura 2. a) Célula animal, b) Mecanismo de reacción de radicales libres sobre lípidos presentes en la membrana celular, c) Mecanismo de reacción de los antioxidantes.

7. Los residuos orgánicos como fuentes de agentes reductores para la síntesis de nanomateriales metálicos funcionales.

Además de los beneficios para la salud mencionados anteriormente, los polifenoles y flavonoides, debido a su capacidad antioxidante y a su interacción con sales metálicas, son capaces de reducir estos metales para así obtener nanopartículas metálicas, como las de plata,

hierro, zinc y cobre [13]. Se ha evaluado la actividad antimicrobiana de estas nanopartículas, e incluso, se han empleado en tratamientos contra el cáncer. Por ejemplo, en un estudio realizado por Usman y col. [40], reportaron la síntesis de nanopartículas de Cu y Ag a partir de cáscaras de cítricos y su evaluación contra *Pectobacterium carotovorum*, *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*. Los resultados indicaron que estas nanopartículas tienen hasta 84 % de actividad antibacteriana. Finalmente, los autores concluyeron que las nanopartículas preparadas son efectivas contra patógenos de la pudrición blanda en plantas y en su aplicación en ropa deportiva bioactiva, batas quirúrgicas, vendajes bioactivos y vendajes de compresión para muñeca o rodilla.

De forma complementaria, en la Tabla II se muestran estudios donde utilizaron extractos orgánicos para la síntesis de nanopartículas metálicas, mencionando información sobre la metodología de extracción de compuestos bioactivos y de síntesis, morfología y su aplicación biomédica. Al respecto, se puede observar que estas tienen el potencial de inhibir el crecimiento de distintas cepas que afectan la salud de los seres humanos [41]. En dichos estudios, tal como se caracteriza la síntesis verde, el método de obtención de nanopartículas consistió en el uso de extractos acuosos del material orgánico, poniendo en contacto con las sales metálicas a ciertos tiempos de reacción, agitación, temperatura y pH. [41-48]. Incluso se puede hacer uso de microondas para llevar a cabo la reacción de síntesis [49]. Ahora bien, la síntesis de nanopartículas metálicas mediante métodos verdes depende de varios factores que influyen en su cantidad y características morfológicas, como tamaño y forma. Estos factores incluyen: la naturaleza y concentración del extracto biológico, la concentración de la sal metálica, la temperatura, el pH y el tiempo de reacción. A mayor concentración de extracto biológico y sal metálica, se forman más nanopartículas, pero el exceso puede provocar aglomeración. Un aumento de temperatura acelera la reacción y reduce el tamaño de las partículas. El pH también afecta el tamaño y rendimiento, siendo pH 7 un valor óptimo. El tiempo prolongado de reacción aumenta la cantidad de nanopartículas hasta que se alcanza un equilibrio [50,51]. Sin embargo, es crucial abordar cuidadosamente los desafíos relacionados con la seguridad y la eficacia para asegurar que estas tecnologías puedan ser utilizadas de manera segura y efectiva en la práctica clínica.

En resumen, estos residuos a menudo son desperdiciados y, se convierten en una fuente económica de agentes antioxidantes y reductores ecológicos. Esto proporciona alternativas sostenibles y novedosas para tratar diversas patologías. Además, el uso de residuos orgánicos en la síntesis de nanopartículas metálicas no solo promueve la economía circular, sino que también reduce el impacto ambiental asociado con la disposición de estos residuos.

Tabla II.- Aplicaciones biomédicas de las nanopartículas metálicas sintetizadas a partir de residuos orgánicos

Residuo Orgánico/Nanopartículas sintetizadas	Método y condiciones de síntesis	Aplicación biomédica	Referencia
<i>Teucrium polium</i> (zamarilla)/ AgNPs	Extracto: 50 °C AgNPs: Agitación a T _{amb} , 30 min Morfología: Esféricas - Casi Esféricas 70 y 100 nm	Actividad anticancerígena contra cáncer gástrico humano MNK45	[42]
<i>Punica granatum</i> (granada)/ ZnONPs	Extracto: 60 °C, 20 min ZnONPs: Agitación, 60 °C, 2 h Morfología: Esféricas 52 y 58 nm	Actividad antibacteriana contra <i>S. aureus</i> , <i>B. cereus</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>S. pneumoniae</i> , <i>S. diarizonae</i> , <i>S. typhi</i> , <i>E. faecalis</i> , <i>E. faecium</i> , <i>E. coli</i> , <i>M. catarrhalis</i> , <i>A. hydrophila</i> y <i>L. monocytogenes</i>	[43]
<i>Cardiospermum halicacabum</i> / CuNPs	Extracto: 90 °C, 1h CuNPs: Agitación, 80°C, 10 min, 1 h, T _{amb} Morfología: Esféricas - Hexagonal 30-40 nm	Actividad antibacteriana contra <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>	[44]
<i>Eriobotrya japonica</i> (nispero)/ AgNPs	Extracto: T _{amb} , agitación 72h AgNPs: Agitación, T _{amb} , 8 h Morfología: Esféricas - Cuasi Esféricas 17-37 nm	Actividad antiproliferativa frente a las células de cáncer de mama MCF-7 y cáncer de cuello uterino HeLa	[45]
<i>Citrus sinensis</i> (naranja)/ CuNPs	Extracto: Jugo exprimido y centrifugado CuNPs: Microondas, 15 min, 700W en agitación Morfología: Esféricas - Hexagonal 7 nm a 20 nm	Actividad antibacteriana contra <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i>	[49]
<i>Cassia auriculata</i> (cassia)/ ZnONPs	Extracto: 60 °C, 30 min ZnONPs: Agitación, T _{amb} , 2h Morfología: Esféricas 20-30 nm	Actividad antibacteriana contra <i>B. subtilis</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>P. aeruginosa</i> y <i>P. mirabilis</i>	[46]
<i>Padina boryana</i> (algas paradas)/ PdNPs	Extracto: Ultrasonido 60 °C, 40 min PdNPs: Agitación, 60 °C, 2 h Morfología: Esféricas 5 - 20 nm	Actividad antibacteriana contra <i>S. aureus</i> , <i>E. fergusonii</i> , <i>A. pittii</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>A. enteropelogenes</i> , <i>P. mirabilis</i> y actividad anticancerígena contra células MCF-7 (cáncer de mama)	[41]
<i>Cyperus rotundus</i> L. (coquito)/ AgNPs	Extracto: 80-90 °C, agitación, 30 min AgNPs: Agitación T _{amb} , 30 min Morfología: Esféricas 11-19 nm	Actividad antiviral contra virus de la laringotraqueitis infecciosa (ILT) y la bronquitis infecciosa (IB) en pollos	[47]

<i>Glaucium flavum</i> (amapola marina)/ AuNPs	Extracto: Calentamiento, 15 min y enfriar 24 h AuNPs: Agitación, 1 h Morfología: Hexagonal, esféricas y triangulares 32 nm promedio	Actividad antiviral contra el virus de la influenza	[48]
--	---	---	------

8. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos del desarrollo sostenible, México sigue avanzando hacia el cumplimiento de estos, sin embargo, se requiere un esfuerzo coordinado y mayores inversiones en áreas clave como la infraestructura verde, el fortalecimiento del Estado de derecho y la inclusión social.

Por lo tanto, como la generación de residuos orgánicos pertenecientes a la agroindustria y de origen doméstico puede presentar impactos negativos ambientales debido a su inadecuada generación, manejo y disposición final. Se ha demostrado que estos residuos pueden ser aprovechados y revalorizados para obtener compuestos con valor agregado como los antioxidantes, con la finalidad de contribuir adecuadamente en la búsqueda de soluciones para abordar este tipo de problemas que afectan el medio ambiente y la sociedad.

Además, los antioxidantes presentan diversos beneficios a la salud, ya que su principal función es inhibir la actividad de los radicales libres y evitar el estrés oxidativo celular y tejidos, producido por el metabolismo durante las actividades cotidianas de la sociedad expuesta a diferentes contaminantes xenobióticos, así como radiación solar. Asimismo, debido a sus propiedades, pueden ser utilizados para el tratamiento de enfermedades ocasionadas por microorganismos patógenos a través de su empleo como suplementos o bien, como precursores de nanopartículas metálicas.

En consecuencia, el aprovechamiento y revalorización de residuos orgánicos para la obtención de compuestos antioxidantes representa una alternativa atractiva considerando las propiedades benéficas de dichos compuestos, así como en la mitigación del impacto ambiental ocasionado por este tipo de residuos que actualmente se generan.

9. Agradecimientos

Los autores agradecen al CONAHCYT por el apoyo derivado del proyecto aprobado en 2023 (Ciencia de Frontera), así como el apoyo de beca de AGGG y JECA en el programa Becas Nacionales de Posgrado y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por medio del PAICYT.

ORCID Identificaciones

Carlos Enrique Escárcega-González:
<https://orcid.org/0000-0002-3762-1455>

Javier Emanuel Castañeda-Aude:
<https://orcid.org/0009-0004-7832-1450>

Lizbeth Liliana Díaz-Muñoz: <https://orcid.org/0000-0002-7683-6520>

10. Referencias

- [1] Russo C., Maugeri A., Lombardo G.E., Musumeci L., Barreca D., Rapisarda A., Cirmi S., Navarra M. (2021). The Second Life of Citrus Fruit Waste: A Valuable Source of Bioactive Compounds. *Molecules*, 26, 5991. <https://doi.org/10.3390/molecules26195991>
- [2] Gaur V.K., Sharma P., Sirohi R., Awasthi M.K., Dussap C.G., Pandey A. (2020). Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*, 398, 123019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123019>
- [3] Ferronato N., Torretta V. (2019). Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
- [4] Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención. (2012). FAO. content.fao.org
- [5] Mejías-Brizuela N., Orozco-Guillen E., Galáan-Hernández N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2, 27-41. Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N6_4.pdf (ecorfan.org)
- [6] Objetivos de Desarrollo. ONU. Recuperado 25 de julio de 2024, de <https://onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/>
- [7] Rojas-González, A. F., Flórez-Montes, C. and López-Rodríguez, D. F. (2019). Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales, *Revista Cubana de Química*, 31, 31–52. Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales (sld.cu)
- [8] Almaráz-Sánchez I., Amaro-Reyes A., Acosta-Gallegos J.A., Mendoza-Sánchez M. (2022). Processing Agroindustry By-Products for Obtaining Value-Added Products and Reducing Environmental Impact. *Journal of Chemistry*, 2022, 3656932. <https://doi.org/10.1155/2022/3656932>
- [9] Deng G.F., Shen C., Xu X.R., Kuang R.D., Guo Y.J., Zeng L.S., Gao L.L., Lin X., Xie J.F., Xia E.Q., Li S., Wu S., Chen F., Ling Q.H., Li H.B. (2012). Potential of Fruit Wastes as Natural Resources of Bioactive Compounds. *International Journal of Molecular Sciences*, 13, 8308–8323. <https://doi.org/10.3390/ijms13078308>
- [10] González-Barraza L., Díaz-Godínez R., Castillo-Guevara C., Nieto-Camacho A., Méndez-Iturbide D. (2017). Phenolic compounds: presence, identification and antioxidant activity in plants and fruits. *Mexican Journal of Biotechnology*, 2, 46-64. <http://dx.doi.org/10.29267/mxjb.2017.2.146>
- [11] Brenes-Argüello K.A., García-Cruz G.A., Marín-Argüello I. (2012). Correlación entre la actividad antioxidante y la concentración de polifenoles de tres variedades de albahaca *Ocimum basilicum*, por el método de Folin – Ciocalteu y del radical DPPH en el Laboratorio de Biociencia de la UNAN-Managua. Octubre 2011- Marzo 2012. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Nicaragua]. correlacion-entre-la-actividad-antioxidante-y-la-concentracion_kWeMEV3.pdf (bvsalud.org)
- [12] Preciado-Saldaña A.M., Ruiz-Canizales J., Villegas-Ochoa M.A., Domínguez-Avila J.A., González-Aguilar G.A. (2022). Aprovechamiento de subproductos de la industria agroalimentaria. Un acercamiento a la economía circular. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 23, 92-99. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81373798002>
- [13] Aswathi, V. P., Meera, S., Maria, C. G. A., & Nidhin, M. (2023). Green synthesis of nanoparticles from biodegradable waste extracts and their applications: a critical review. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 8, 377–397. <https://doi.org/10.1007/s41204-022-00276-8>
- [14] Travieso-Novelles M.C., Rubio-Ortega A., Pino-Pérez O. (2019). Las nanopartículas a partir de plantas como base para el diseño de nuevos antimicrobianos. *Revista Cubana de Farmacia*, 51, 27. <https://revfarmacia.sld.cu/index.php/far/article/view/263>
- [15] Ojeda G.A., Arias-Gorman A.M., Sgroppo S.C. (2020). Nanotechnology and its applications in food. *Mundo nano*, 12, 23. <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.23.677>
- [16] Llacuna, L., Mach, N. (2012). Papel de los antioxidantes en la prevención del cáncer, *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 16, 16–24. <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-nutricion-humana-dietetica-283-articulo-papel-antioxidantes-prevencion-del-cancer-S2173129212700674>
- [17] Avello, M., Suwalsky, M. (2006). Radicales libres, antioxidantes naturales y mecanismos de protección. *Atenea*, 494, 161–172. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-04622006000200010>
- [18] Couto C., Ameida A. (2022). Metallic nanoparticles in the food sector: A mini-review. *Foods*, 11, 402. <https://doi.org/10.3390/foods11030402>
- [19] Pulić-Prociak J., Grabowska A., Chwastowski J., Majka T.M., Banach M. (2019). Safety of the application of nanosilver and nanogold in topical cosmetic preparations. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 183, 110416. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110416>
- [20] Gao W., Zhang Y., Zhang Q., Zhang L. (2016). Nanoparticle-Hydrogel: A Hybrid Biomaterial System for Localized Drug Delivery. *Annals of Biomedical Engineering*, 44, 2049-2061. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1583-9>
- [21] Huber, G. M. and Rupasinghe, H. P. V. (2009). Phenolic

- profiles and antioxidant properties of apple skin extracts. *Journal of Food Science*, 74, 693–700. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01356.x>
- [22] Lee E.H., Yeom H.J., Ha Mi-Sun, Bae D.H. (2010). Development of banana peel jelly and its antioxidant and textural properties, *Food Science and Biotechnology*, 19, 449–455. <https://doi.org/10.1007/s10068-010-0063-5>
- [23] Domínguez-Perles R., Moreno D.A., Carvajal M., García-Viguera C. (2011). Composition and antioxidant capacity of a novel beverage produced with green tea and minimally-processed byproducts of broccoli. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12, 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.04.005>
- [24] Genitha-Immanuel, S. S. Extraction of Antioxidants from Fruit Peels and its Utilization in Paneer. (2014). *Journal of Food Science and Technology* 2014, 5. <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7110.1000349>
- [25] Mirabella N., Castellani V., Sala S. Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. (2014). *Journal of Cleaner Production*, 65, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>
- [26] Tenorio, M. Flavonoids extracted from orange peelings tangelo (*Citrus reticulata* x *Citrus paradisi*) and their application as a natural antioxidant in sachá inchi (*Plukenetia volubilis*) vegetable oil (2016). *Scientia Agropecuaria*, 7, 419–431. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.04.07>
- [27] Aguilar Coveña, C. F. and Reyes Cedeño, N. A. (2019). Efecto inhibitorio del ácido gálico extraído de los desechos de la producción de vino y néctar de uva (*Vitis vinifera*) sobre el *Staphylococcus aureus*. Tesis de Licenciatura, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. ULEAM-AGROIN-0034.pdf
- [28] Avila-Rodríguez F.A., Guerrero-López K.B. (2019). Obtención de un conservante natural a partir de la semilla de aguacate variedad Hass (*Persea Americana* Mill), *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 1689–1699. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7627>
- [29] Delgado-Arias S., Zapata-Valencia S., Cano-Agudelo Y., Osorio-Arias J. Vega O. (2020). Evaluation of the antioxidant and physical properties of an exfoliating cream developed from coffee grounds, *Journal of Food Process Engineering*, 43, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.13067>
- [30] Sampaio S.L., Petopoulos S.A., Alexopoulos A., Heleno S.A., Santos-Buelga C., Barros L., Ferreira I.C.F.R. (2020). Potato peels as sources of functional compounds for the food industry: A review, *Trends in Food Science & Technology*, 103, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.015>
- [31] Petruk G., Del-Giudice R., Rigano M.M., Monti D.M. (2018). Antioxidants from plants protect against skin photoaging, *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018, 1454936. <https://doi.org/10.1155/2018/1454936>
- [32] San-Miguel A., Martín-Gil F. J. Importancia de las especies reactivas al oxígeno (radicales libres) y los antioxidantes en clínica. (2009). *Gaceta Médica de Bilbao*, 106, 106–113. <https://www.elsevier.es/es-revista-gaceta-medica-bilbao-316-articulo-importancia-especies-reactivas-al-oxigeno-S030448580974661X>
- [33] Reyes-Munguía A., Galicia-Cardoso M.T., Carrillo-Inungaray M.L. (2011). Antioxidantes: La magia de lo natural. *Tlatemoani: Revista Académica de Investigación*, 8, 16. Antioxidantes: La Magia De Lo Natural (repec.org)
- [34] Dorado-Martínez C., Vargas C.R., Rivas-Arancibia S. Estrés oxidativo y neurodegeneración. (2003). *Revista de la Facultad de Medicina UNAM*, 46, 229–235. Estrés oxidativo y neurodegeneración | *Revista de la Facultad de Medicina (unam.mx)*
- [35] Ramos-Ibarra M.L., Batista-González C.M., Gómez-Meda B.C., Zamora-Pérez A.L. (2006). Diabetes, estrés oxidativo y antioxidantes, *Investigación en Salud*, VIII, 7–15. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14280102>
- [36] Casas-Grajales, S. Antioxidants in liver health. (2015). *World Journal of Gastrointestinal Pharmacology and Therapeutics*, 6, 59. <https://doi.org/10.4292%2Fwjgpt.v6.i3.59>
- [37] Islam M.N., Gracia F. (2014). Los antioxidantes para la salud óptima. *Revista Médico Científica* 26, 3–9. <https://www.revistamedicocientifica.org/index.php/rmc/article/view/371>
- [38] López L., A., Fernando C.A., Lazarova Z., Bañuelos R.V., Sánchez S.H.R. (2012). Antioxidantes, un paradigma en el tratamiento de enfermedades. *Revista ANACEM* 6, 48–53. Antioxidantes, un paradigma en el tratamiento de enfermedades | *Rev. ANACEM (Impresa)*:6(1): 48-53, abr. 2012. tab | LILACS (bvsalud.org)
- [39] González-Jiménez, F., Hernández-Espinosa N., Cooper-Bribiesca B.L., Núñez-Bretón L.C., Reyes-Reyes M. (2015). Empleo de antioxidantes en el tratamiento de diversas enfermedades crónico-degenerativas, *Vertientes*, 18, 16–21. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/vertientes/article/view/51730>
- [40] Usman O., Mohsin M.M.B., Ikram M., Iqbal T., Islam S., Syed W., Al-Rawi M.B.A., Naseem M. (2024). Green synthesis of metal nanoparticles and study their anti-pathogenic properties against pathogens effect on plants and animals. *Scientific Reports*, 14, 11354. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61920-8>
- [41] Sonbol H., Ameen F., AlYahya S., Almansob A., Alwakeel S. (2021). Padina boryana mediated green synthesis of crystalline palladium nanoparticles as potential nanodrug against multidrug resistant bacteria and cancer cells. *Scientific Reports*, 11, 5444. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84794-6>
- [42] Hashemi S. F., Tasharofi N., Saber M. M. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles using *Teucrium polium* leaf extract and assessment of their antitumor effects against MNK45 human gastric cancer cell line. *Journal of Molecular Structure*, 2020, 1208. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.127889> <https://doi.org/10.1080/21691401.2020.1867152>
- [43] Ifeanyichukwu U. L., Fayemi O. E., Ateba C. N. (2020). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from pomegranate (*Punica granatum*) extracts and characterization of their antibacterial activity. *Molecules* 2020, 25. <https://doi.org/10.3390/molecules25194521>

- [44] Punniyakotti P., Panneerselvam P., Perumal D., Aruliah R., Angaiah S. (2020). Anti-bacterial and anti-biofilm properties of green synthesized copper nanoparticles from *Cardiospermum halicacabum* leaf extract. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 43, 1649–1657. <https://doi.org/10.1007/s00449-020-02357-x>
- [45] Jabir M.S., Hussien A.A., Sulaiman G.M., Yaseen N.Y., Dewir Y.H., Alwahibi M.S., Soliman D.A., Rizwana H. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles from *Eriobotrya japonica* extract: a promising approach against cancer cells proliferation, inflammation, allergic disorders and phagocytosis induction. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 49, 48–60.
- [46] Ramesh P., Saravanan K., Manogar P., Johnson J., Vinoth E., Mayakannan M. (2021). Green synthesis and characterization of biocompatible zinc oxide nanoparticles and evaluation of its antibacterial potential. *Sensing and Bio-Sensing Research* 2021, 31. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100399>
- [47] Abo-El-Yazid Z. H., Ahmed O. K., El-Tholoth M., Ali M. A. S. (2022). Green synthesized silver nanoparticles using *Cyperus rotundus* L. extract as a potential antiviral agent against infectious laryngotracheitis and infectious bronchitis viruses in chickens. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2022, 9. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00325-z>
- [48] Dehghani F., Mosleh-Shirazi S., Shafiee M., Kasaei S. R., Amani A. M. (2023). Antiviral and antioxidant properties of green synthesized gold nanoparticles using *Glaucium flavum* leaf extract. *Applied Nanoscience*, 13, 4395–4405. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02705-1>
- [49] Jahan I., Erci F., Isildak I. (2021). Facile microwave-mediated green synthesis of non-toxic copper nanoparticles using *Citrus sinensis* aqueous fruit extract and their antibacterial potentials. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2021, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.102172>
- [50] Ghosh, P. R., Fawcett, D., Sharma, S. B., Poinern, G. E. (2017). Production of high-value nanoparticles via biogenic processes using aquacultural and horticultural food waste. *Materials*, 10, 852. <https://doi.org/10.3390/ma10080852>
- [51] Akhtar, M. S., Panwar, J., Yun, Y. S. Biogenic synthesis of metallic nanoparticles by plant extracts. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1, 591-602. <https://doi.org/10.1021/sc300118u>