



Procesos avanzados de oxidación y su aplicación en alimentos

V. Aurioles-López^{*1}, A. López-Malo Vigil¹, E. R. Bandala²

¹Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental. ²Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
Fundación Universidad de las Américas Puebla. Exhacienda Sta. Catarina Mártir S/N, Cholula, Puebla. C.P.72810.
México.

Resumen

La presencia de microorganismos patógenos en los alimentos es un problema de inocuidad alimentaria, que se trata de evitar a partir de buenas prácticas de producción, así mismo se han buscado métodos efectivos en la desinfección de los alimentos. En la actualidad se están evaluando nuevas tecnologías que cumplan con las expectativas de sanidad necesarias para brindar productos de calidad. Los procesos avanzados de oxidación (PAOs) han probado ser efectivos en la remoción de compuestos orgánicos en agua, y últimamente se está evaluando su eficiencia en la inactivación de microorganismos. Por tal motivo, la presente revisión bibliográfica intenta dar a conocer la aplicación de los PAOs en la inactivación de microorganismos en frutas y hortalizas, como una alternativa segura y novedosa para su desinfección.

Palabras clave: procesos avanzados de oxidación, inactivación de microorganismos, alimentos.

Abstract

Presence of pathogens in food is a concerning safety problem. Attempts to remediate this problem includes good manufacturing practices and the sought of effective methods for disinfecting food. A mandatory task related is evaluating new technologies that meet health expectations necessary to provide quality products. Advanced oxidation processes (AOPs) are cost-effective technologies which have proved high efficiency in removing organic compounds in water as well as in the inactivation of microorganism. Therefore, the present review aims to explain the implementation of AOPs in the inactivation of microorganisms in fruits and vegetables, as a safe and novel disinfection procedure.

Keywords: advanced oxidation process, inactivation of microorganisms, food.

Introducción

Existe cierta problemática en cuanto a la inocuidad en los alimentos que son consumidos frescos y/o crudos, como es el

caso de las frutas y hortalizas, las cuales están expuestas a diversos agentes contaminantes a lo largo de la cadena alimentaria hasta su consumo. En el caso de su contaminación, estos alimentos pueden provocar brotes de enfermedades que pueden llegar a ser de difícil control. En la actualidad se han desarrollado diversos métodos de conservación de los

^{*}Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Tel: +52 222 229 2126, fax: +52 222 229 2727
Dirección electrónica: veronica.aurioleslz@udlap.mx

alimentos, los cuales presentan limitaciones en cuanto a su efectividad, accesibilidad o costo, y que, además, pueden afectar la calidad sensorial de los alimentos y generar subproductos no deseables para el ambiente. De aquí que la necesidad de buscar alternativas que contrarresten esas limitaciones es de gran importancia desde el punto de vista de la salud, del económico y de la calidad sensorial del alimento.

Actualmente se conocen procesos químicos que favorecen la mineralización de compuestos orgánicos de difícil degradación. Estas tecnologías, llamadas emergentes, proporcionan alta efectividad en la remoción de contaminantes y desinfección de agua, y reciben el nombre de procesos avanzados de oxidación (PAOs). Dichos procesos están ganando popularidad debido a su alta eficiencia y además son considerados amigables con el ambiente.

Los PAOs están siendo utilizados también como alternativa en la inactivación de microorganismos, principalmente patógenos, en un principio para la desinfección de agua; sin embargo, actualmente se está explorando la posibilidad de que sean útiles en la inactivación de microorganismos presentes en alimentos.

El objetivo de este artículo de revisión es dar a conocer la aplicación de los procesos avanzados de oxidación en la desinfección de frutas y hortalizas.

Revisión bibliográfica

1. Procesos avanzados de oxidación (PAOs)

Los procesos avanzados de oxidación (PAOs), son los procesos químicos de oxidación más eficaces en el tratamiento de agua (Anipsitakis

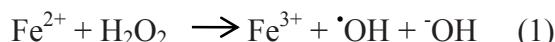
y Dionysiou, 2003; Bankian-Tabrizi y Mehrvar, 2004; Bandala *et al.*, 2007, 2009; Silva *et al.*, 2009). Han sido aplicados satisfactoriamente en la descontaminación de agua con una amplia variedad de productos químicos tales como plaguicidas, fenoles, hidrocarburos, agentes tensoactivos, colorantes, entre otros (Bandala *et al.*, 2007), y recientemente se ha demostrado su aplicación en la inactivación de microorganismos (Domenech *et al.*, 2004; Llonnen *et al.*, 2005; Guisar *et al.*, 2007; Bandala *et al.*, 2009; Muranyi *et al.*, 2010).

Los PAOs involucran la generación de especies oxidantes altamente reactivas capaces de atacar y degradar sustancias orgánicas (Glaze, 1987; Bolton, 2001). Las especies reactivas de oxígeno (EROs) son moléculas de alta reactividad debido a que en el último orbital tienen un electrón no pareado (radical libre), lo cual confiere inestabilidad física. Las principales EROs son: radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), anión superóxido (O_2^-), oxígeno singulete ($^1\text{O}_2$), óxido nítrico (NO), peróxido (ROO), semiquinona (Q) y ozono (O_3) (Mittler, 2002).

Existe un especial interés en los procesos que generan el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), debido a que el $\cdot\text{OH}$ es un oxidante extremadamente activo y no selectivo, capaz de oxidar una amplia variedad de compuestos de difícil degradación (Zhou y Smith, 2002; Pera-Titus *et al.*, 2004; Amat *et al.*, 2005). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la radiación solar) y otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica (Bolton *et al.*, 2001; Domenech *et al.*, 2004).

La reacción de Fenton es uno de los PAOs más utilizado para el tratamiento de contaminantes en solución acuosa. Esta reacción se lleva a cabo mediante una mezcla de sales ferrosas (Fe^{2+}) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que da como resultado la

generación de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), de acuerdo con la ecuación (1):



Los PAOs tienen dos derivaciones principales (Domenech *et al.*, 2004):

Los procesos no fotoquímicos que originan especies reactivas potentes, principalmente el radical hidroxilo, a través de la transformación de especies químicas o mediante la utilización de distintas formas de energía, con excepción de la irradiación luminosa.

Y los procesos fotoquímicos, que son aquellos métodos que utilizan de una manera u otra alguna fuente de radiación (Bankian-Tabrizi y Mehrvar, 2004). La presencia de ésta aumenta la velocidad de reacción en comparación con la misma técnica en su ausencia, además de ampliar la flexibilidad del

sistema debido a que permite el uso de una variedad de oxidantes y condiciones de operación.

En la Tabla I se muestran los procesos no fotoquímicos y fotoquímicos mayormente utilizados y que involucran la generación del radical $\cdot\text{OH}$. Estos procesos implican métodos muy diferentes de activación, así como la generación de oxidantes que pueden utilizar una serie de mecanismos diferentes para la eliminación de contaminantes orgánicos; sin embargo, comparten la química del radical hidroxilo para la remoción de contaminantes (Bolton *et al.*, 2001).

Por otro lado, además de la eficiencia de los diversos PAOs en el tratamiento de agua, se ha demostrado su eficiencia en la inactivación de microorganismos mediante dos PAOs en particular, los procesos photocatalíticos homogéneos y heterogéneos (Srinivasan y Somasundaram, 2003; Guisar *et al.*, 2007; Bandala *et al.*, 2009).

Tabla I. Procesos avanzados de oxidación que involucran principalmente el radical $\cdot\text{OH}$

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)	Procesos fotoquímicos
Ozonización con peróxido de hidrógeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$)	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
Procesos Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) y relacionados	UV/peróxido de hidrógeno
Oxidación electroquímica	UV/O_3
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	Foto-Fenton y relacionadas
Plasma no térmico	Fotocatálisis heterogénea
Descarga electrohidráulica - Ultrasonido	
Oxidación en agua sub/y supercrítica	

Domenech *et al.* (2004).

Los PAOs presentan algunas ventajas sobre otros métodos de descontaminación, principalmente, su capacidad para destruir compuestos orgánicos en el agua sin el traslado a otro medio o generar problemas secundarios en la eliminación de residuos (Bankian-Tabrizi y Mehrvar, 2004). Esto se debe a que cambian químicamente el contaminante y se puede lograr una destrucción completa del mismo; este proceso es llamado mineralización. Además, estos métodos se pueden usar solos o combinados entre ellos o con métodos convencionales, pudiendo ser aplicados también a contaminantes de aire y suelo. Permiten incluso la desinfección por inactivación de bacterias y virus (Domenech *et al.*, 2004).

Otra ventaja es la baja concentración en la cual son funcionales, llegando a generar remoción de partes por billón (ppb). Mejoran además los atributos sensoriales del agua tratada y, en muchos casos, consumen menos energía que otros tratamientos alternativos. Al mismo tiempo, elimina efectos sobre la salud causados por desinfectantes y oxidantes como el cloro y el permanganato de potasio (Domenech *et al.*, 2004).

1.1. Fotocatálisis homogénea

Este proceso se lleva a cabo ya sea por la radiación directa de la oxidación catalítica en el contaminante o mediada por el peróxido de hidrógeno (UV/H₂O₂), por ozono (UV/O₃), o por ambos (UV/H₂O₂/O₃) (Bolton *et al.*, 2001).

La velocidad de generación de radicales ·OH mediante la reacción Fenton se ve ampliamente favorecida con la aplicación de radiación ultravioleta (UV). Al proceso foto-asistido se le conoce como sistema foto-Fenton (Rodríguez *et al.*, 2010) y de forma general se representa por la ecuación (2):



El efecto positivo de la irradiación sobre la producción de los ·OH se debe a que esta energía favorece la regeneración fotoquímica de los iones ferrosos (Fe²⁺), a través de la fotoreducción de los iones férricos (Fe³⁺). Sin embargo, la reacción de catálisis homogénea puede necesitar hasta 50 u 80 mg/L de hierro en solución, y esta necesidad puede estar por encima de lo autorizado para la descarga directa en el ambiente por el tratamiento de agua (Herney-Ramírez *et al.*, 2008).

1.2. Fotocatálisis heterogénea

Es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido que es el fotocatalizador heterogéneo, que normalmente es un semiconductor, por ejemplo, dióxido de titanio (TiO₂), sulfuro de zinc (ZnS), silicio (Si), óxidos de hierro, entre otros (Bolton *et al.*, 2001).

La reacción de destrucción o de remoción de los contaminantes ocurre en la región interfacial entre el sólido excitado y la solución, sin que el catalizador sufra cambios químicos. La excitación del semiconductor puede tener lugar de dos formas (Domenech *et al.*, 2004):

- a) Por excitación directa del semiconductor, de manera que éste es el que absorbe los fotones usados en el proceso.
- b) Por excitación inicial de moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador, las que a su vez son capaces de injectar cargas (electrones) en el semiconductor.

La fotocatálisis heterogénea recurre además a reductores químicos que permiten realizar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como iones metálicos o compuestos halogenados (Domenech *et al.*, 2004).

La principal ventaja de este proceso es su compatibilidad con el ambiente, debido a que usa un reactivo limpio, el electrón (Rodríguez *et al.*, 2010).

2. Inactivación de microorganismos patógenos

La presencia de microorganismos patógenos genera alto riesgo para la salud de los ecosistemas y de los humanos. Por tal motivo, es importante la identificación de los mismos; sin embargo, muchos de los indicadores que se han utilizado en estudios de investigación no son adecuados para el seguimiento y vigilancia de rutina, debido al costo y la dificultad de medición con equipo limitado (Campos, 2008).

Los organismos indicadores son utilizados

para evaluar el riesgo asociado al uso de agua residual en la agricultura en diferentes situaciones (Campos, 2008). Estos indicadores pueden estar directamente relacionados con enfermedades de las poblaciones humanas, por consumo de agua o alimentos. Algunos de los microorganismos indicadores y patógenos se muestran en la Tabla II.

Asimismo, es importante la eliminación de microorganismos peligrosos para la seguridad ambiental y humana.

En la utilización de los PAOs como método alternativo de desinfección, se ha sugerido que el principal mecanismo en la inactivación de microorganismos es el daño celular (Srinivasan y Somasundaram, 2003) que puede conducir a la liberación de ácidos

Tabla II. Ejemplos de indicadores patógenos para humanos.

Patógenos para los humanos	Microorganismo indicador
Bacteria: <i>Shigella</i> <i>Escherichia coli</i> (enterotoxigénica) <i>Campylobacter</i> <i>Vibrio cholerae</i>	<i>E. coli</i> , coliformes fecales, coliformes totales, enterococos
Virus: Adenovirus Rotavirus Enterovirus Hepatitis A Norovirus (“Norwalk-Like Viruses” NLV)	Bacteriófagos Colifagos somáticos Fagos ARN-F
Protozoarios: <i>Cryptosporidium</i> (ooquistes) <i>Giardia</i> (quistes)	<i>Clostridium perfringens</i>
Helmintos: <i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Trichuris trichuris</i> (huevos)	<i>Ascaris</i> (huevos)

Modificada de Campos (2008).

nucleicos (Wang *et al.*, 2007). El daño celular es producido por especies reactivas de oxígeno generadas por la reacción de compuestos tales como oxígeno (O_2) o peróxido de hidrógeno (H_2O_2), así como por las interacciones particulares físicas y químicas entre los compuestos y los organismos (Kim *et al.*, 2010).

Se sabe que las especies reactivas de oxígeno (EROs) se pueden generar en los organismos a partir de procesos endógenos como la respiración celular y la fagocitosis, pero también mediante procesos exógenos como la radiación UV. Además, los organismos cuentan con un sistema de defensa antioxidante encargado de controlar a las EROs (Gil del Valle *et al.*, 1999). Por otro lado, las EROs son indispensables para ciertos procesos bioquímicos involucrados en el señalamiento celular (Mittler, 2002), y están asociadas con la respuesta inmune de los seres vivos (Swindle y Metcalfe, 2007). Sin embargo, la producción excesiva o inapropiada de EROs puede generar un desequilibrio en la producción de antioxidantes y desencadenar “estrés oxidativo”, el cual tiene efectos altamente tóxicos al oxidar moléculas básicas como proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos, mientras que la acumulación de EROs puede ocasionar muerte celular (Mittler, 2002).

Se ha reportado la eficiencia de los PAOs en la inactivación de microorganismos, principalmente en *Escherichia coli*. Sin embargo, esta bacteria puede ser menos resistente a la desinfección que otras bacterias entéricas como *Shigella* y *Salmonella* (Rivera *et al.*, 2010).

Por otro lado, se han realizados estudios sobre el uso de los PAOs para la inactivación de una amplia variedad de microorganismos, mostrando su efectividad. Entre algunos microorganismos estudiados están: parásitos

como *Cryptosporidium parvum* (Cho y Yoon, 2008), esporas de *Bacillus subtilis* (Lonnen *et al.*, 2005; Cho y Yoon, 2008; Bandala *et al.*, 2009), *Pseudomonas aeruginosa* y levaduras como *Candida albicans* (Lonnen *et al.*, 2005), virus como el colifago MS2 (Kim *et al.*, 2010) e incluso hongos del género *Fusarium* (Lonnen *et al.*, 2005; Sichel *et al.*, 2007); evidenciando así la potencialidad de los PAOs en la inactivación de microorganismos.

3. Aplicación de PAOs en la desinfección de alimentos

Los microorganismos patógenos en alimentos son la principal causa de enfermedades transmitidas por estos productos. Por tal motivo, es indispensable mantener un adecuado control de su calidad microbiana (Garret, 2002).

En el caso particular de las frutas y hortalizas, que son productos consumidos generalmente frescos, es evidente la asociación con brotes de enfermedades debidas principalmente a un inadecuado tratamiento de desinfección (Garret, 2002).

Estos alimentos habitualmente llevan un proceso de limpieza a través de diversos métodos desinfectantes como son la utilización de hipoclorito de sodio, ácidos orgánicos, radiación UV, peróxido de hidrógeno, ozono, entre otros. Sin embargo, muchos de ellos pueden afectar las características sensoriales de los alimentos (Parish *et al.*, 2003), y generar subproductos de difícil degradación provocando deterioro ambiental; además de necesitar equipos especializados de alto costo (Kim *et al.*, 2009).

Actualmente, se está en la búsqueda de tratamientos alternativos que desinfecten adecuadamente los alimentos, que no provoquen cambios sensoriales indeseables, que sean seguros para los consumidores, y que sean tecnologías limpias. Una opción que está

siendo evaluada es la utilización de los PAOs como alternativa de desinfección.

Estas tecnologías han sido aplicadas exitosamente en la desinfección de frutas y hortalizas, como lo mencionan Cho *et al.* (2007) quienes sometieron zanahorias al tratamiento heterogéneo UV/TiO₂, mostrando una inactivación de *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium* y *Bacillus cereus*, superior a la lograda en el tratamiento con radiación UV. Las zanahorias tratadas con los diferentes métodos de desinfección, fueron almacenadas durante 21 días a 4 °C, para su posterior análisis sobre la población de bacterias aerobias totales, observando un incremento mayor en las zanahorias desinfectadas con UV en comparación con las tratadas con UV/TiO₂. Los autores observaron 3.1 y 2.4 log UFC/ml después del tratamiento con UV y UV/TiO₂ respectivamente, de una población inicial aproximada de 4.2 log UFC/ml, y un incremento a 6.0 y 4.4 y log UFC/ml respectivamente, a los 21 días de almacenamiento. Por otro lado, Cho *et al.* (2007) mencionan la necesidad de inmovilizar las partículas de TiO₂ en la superficie de tubos de cuarzo, debido a que se ha reportado que este compuesto puede causar inflamación pulmonar crónica en animales y humanos. La inmovilización de TiO₂ puede reducir los efectos adversos de su presencia en los alimentos. Sin embargo, es necesaria la regulación para determinar la seguridad del tratamiento con TiO₂ por agencias especializadas (Cho *et al.*, 2007).

Kim *et al.* (2009) probaron la efectividad de la reacción generada por el tratamiento de UV/TiO₂ en la desinfección de *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella Typhimurium* en lechuga “iceberg”, en comparación con otros métodos de desinfección utilizados comúnmente. La máxima reducción microbiana para el tratamiento con UV/TiO₂ fue de 2.6, 2.5, 2.3 y

2.8 log UFC/ml respectivamente, en comparación con el tratamiento de UV que mostró reducción de 1.4, 1.0, 1.4 y 1.4 log UFC/ml respectivamente; y mayor también comparada con la reducción de la carga microbiana con NaClO que fue de 0.9, 0.8, 0.9 y 1.1 log UFC/ml (Kim *et al.*, 2009). Los mismos autores evaluaron también el recuento de las bacterias aerobias totales después del almacenamiento durante 9 días a 4 °C, encontrando un incremento de 1.2, 1.6 y 1.3 log UFC/ml para los tratamientos UV/TiO₂, UV y NaClO, respectivamente (Kim *et al.*, 2009).

En un estudio realizado por Corwe *et al.* (2007) se demostró la inactivación de microorganismos como *Enterobacter agglomerans* y *Pseudomonas fluorescens*, presentes en el arándano azul (*Vaccinium angustifolium*), causantes del deterioro postcosecha en este fruto. Se encontró que el tratamiento de limpieza con O₃/H₂O₂/UV es más efectivo en comparación al tratamiento con radiación UV, atribuyendo la diferencia a que la radiación UV sólo es efectiva en la superficie del arándano.

Por otro lado, Selma *et al.* (2008) determinaron la calidad microbiana del agua posterior al lavado de algunas hortalizas infectadas intencionalmente con microorganismos, demostrando la alta eficacia del tratamiento de UV/TiO₂ en la inactivación microbiana. Se logró la inactivación total para *Listeria spp.* en el agua de lavado de escarola y achicoria, y alta inactivación de *Listeria spp.* y *Escherichia coli* en lechuga, atribuyendo la disminución de células viables a la acción del radical hidroxilo (·OH) sobre las mismas (Selma *et al.*, 2008).

En la Tabla III se resume la efectividad de desinfección sobre microorganismos, a partir de fotocatálisis heterogénea sobre productos frescos, mostrándose el decremento de las

Tabla III. Eficacia de PAOs utilizados para la inactivación de algunos microorganismos en frutas, hortalizas así como el agua de lavado de algunas hortalizas.

Producto	Microorganismo	Tratamiento	Carga microbiana (log UFC/ml)		Tiempo de reacción
			Inicial	Final	
Arándano azul Crowe <i>et al.</i> (2007)	<i>Enterobacter agglomerans</i>	O ₃ /H ₂ O ₂ / UV	6.74	2.5	2 min
	<i>Pseudomonas florescens</i>		8.03	2.8	2 min
Zanahoria Cho <i>et al.</i> (2007)	<i>Escherichia coli</i>	TiO ₂ /UV	6	2.1	20 min
	<i>Salmonella Typhimurium</i>		6	2.3	20 min
	<i>Bacillus cereus</i>		6	1.8	20 min
Lechuga iceberg Kim <i>et al.</i> (2009)	<i>Escherichia coli</i>	TiO ₂ /UV	6.2	2.6	20 min
	<i>Listeria monocytogenes</i>		6.5	2.5	20 min
	<i>Staphylococcus aureus</i>		6.3	2.3	20 min
	<i>Salmonella Typhimurium</i>		6.8	2.8	20 min
Agua de lavado de					
Lechuga Escarola Achicoria Cebolla Lechuga	<i>Escherichia coli</i>	TiO ₂ /UV	5.2	4.0	1 min
			4.9	1.9	1 min
			3.1	0.9	1 min
			5.7	3.2	1 min
	<i>Listeria spp.</i>		1.9	1.6	1 min
Escarola Achicoria Espinaca Selma <i>et al.</i> (2008)			1.1	1.1	1 min
			1.2	1.2	30 s
			2.2	1.3	5 min

UFC: Unidades formadoras de colonias

unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/ml).

Es claro que la aplicación de tecnologías alternativas como los PAOs en la inactivación de microorganismos, proporcionan alta efectividad que otros tratamientos; sin embargo es necesaria mayor investigación para su utilización sobre frutas y hortalizas.

Conclusiones

A pesar de que los PAOs han demostrado su efectividad en la desinfección de agua, y pueden ser una alternativa en la inactivación de microorganismos patógenos, y además de que se ha probado mayor eficiencia de los PAOs en la desinfección de frutas y hortalizas en comparación con algunos métodos

convencionales, es necesaria mayor investigación en su utilización sobre alimentos como frutas y hortalizas. Siendo esta aplicación relativamente nueva, dicha investigación debe estar encaminada a la regulación de los posibles materiales a utilizar, para la seguridad de los consumidores, así como quizá hacia la combinación con métodos convencionales y evaluar el potencial desinfectante. Considerando los posibles cambios en los atributos sensoriales de las frutas y hortalizas desinfectadas con estos tratamientos así como la evaluación de la inocuidad durante su almacenamiento posterior.

Agradecimientos

A la Universidad de las Américas Puebla y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT, México) por el financiamiento recibido para la realización de este trabajo.

Referencias

- Amat, A. M., Arques, A., Miranda, M. A. y López, F. 2005. Use of ozone and/or UV in the treatment of effluents from board paper Industry. *Chemosphere*. 60(8):1111-1117.
- Anipsitakis, G. y Dionysiou, D. D. 2003. Degradation of organic contaminants in water with sulfate radicals generated by the conjunction of peroximonosulfate with cobalt. *Environmental Science and Technology*. 37:4790-4797.
- Bankian-Tabrizi, G. y Mehrvar, M. 2004. Integration of advanced oxidation technologies and biological processes: Recent developments, trends, and advances. *Journal of Environmental Science and Health. Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*. A39:(11-12) 3029-3081
- Bandala, E. R., Domínguez, F., Rivas, F. y Gelover, S. 2007. Degradation of atrazine using solar driven fenton-like advanced oxidation processes *Journal of Environmental Science and Health. Part-B*. 42:21-26
- Bandala, E. R., Corona-Vásquez, B., Guisar, R. y Uscanga, M. 2009. Deactivation of highly resistant microorganisms in water using solar driven photocatalytic processes. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 7:A7.
- Bolton, J. R. 2001. Ultraviolet applications handbook. Segunda edición. Bolton Photosciences Inc. Ontario, Canadá. 628 p.
- Bolton, J., Bircher, K.G., Tumas, W. y Tolaman, Ch. A. 2001. Figures-of-merit for the technical development and application of advanced oxidation technologies for both electric- and solar-driven systems. *Pure and Applied Chemistry*. 73:627-637.
- Campos, C. 2008. New perspectives on microbiological water control for wastewater reuse. *Desalination*. 218:34-42.
- Crowe, K. M., Bushway, A. A., Bushway, R. J., Davis-Dentici, K. y Hazen, R. A. 2007. A comparison of single oxidants versus advanced oxidation processes as chlorine-alternatives for wild blueberry processing (*Vaccinium angustifolium*) *International Journal of Food Microbiology*. 116:25-31.
- Cho, M. Choi, Y., Park, H., Kim, K., Woo G-J. y Park, J. 2007. Titanium Dioxide/UV Photocatalytic Disinfection in Fresh Carrots. *Journal of Food Protection*. 70(1):97-101.
- Cho, M. y Yoon, J. 2008. Measurement of OH radical CT for inactivating *Cryptosporidium parvum* using photo/ferrioxlate and photo/TiO₂ systems. *Journal of Applied Microbiology*. 104: 759-766.
- Domenech, X., Jardim W. F. y Litter, M. I. 2004. Procesos avanzados de oxidación para la remoción de contaminantes. En: Blesa M.A., Sánchez B. (Eds.) Remoción de contaminantes por fotocatálisis heterogénea. Editorial CIEMAT, Madrid, España.
- Garret, E. 2002. Fresh-cut produce: Tracks and trends. En “Fresh-cut fruits an vegetables Science, Techology, and Market”. Ed. O., Lamikanra. P.1. CRC Press. Boca Raton. Florida. EE.UU.
- Gil del Valle, L., Martínez-Sánchez, G., González-Blanco, I. y Pérez-Avila, L. 1999. Estrés oxidativo: Mecanismos generales involucrados y su relación

- con el virus de la inmunodeficiencia humana. *Bioquímica*. 24:85-92.
- Glaze, W. H. 1987. Drinking water treatment with ozone. *Environmental Science and Technology*. 21:224-230.
- Guisar, R., Herrera, M. I., Bandala, E. R., García, J. y Corona B. 2007. Inactivation of waterborne pathogens using solar photocatalysis. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. 10(2):1-4.
- Herney-Ramírez, J., Lampines, M., Vivente, M. A., Costa, C. A. y Medeira, L. M. 2008. Experimental design to optimize the oxidation of orange II dye solution using a clay-based Fenton-like catalyst. *Industrial Engineering Chemistry Research*. 47(2):284-294.
- Kim, Y., Choi, S., Park, J., Chung, M., Song, K., Hwang, I., Known, K. y Park, K. 2009. Disinfection of iceberg lettuce by titanium dioxide-UV photocatalytic reaction. *Journal of Food Protection*. 72(9):1916-1922.
- Kim, J. Y., Lee, Ch., Sedlak, D. L., Yoon, J. y Nelson, K. L. 2010. Inactivation of MS2 coliphage by Fenton's reagent. *Water Research*. 44:2647-2653.
- Lonnen, J., Kilvington, S., Kehoe, S. C., Al-Touati, F. y McGuigan. 2005. Solar and photocatalytic disinfection of protozoan, fungal and bacterial microbes in drinking water. *Water Research*. 39:877-883.
- Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*. 7(9):405-410.
- Muranyi, P., Schraml, C. y Wunderlich, J. 2010. Antimicrobial efficiency of titanium dioxide-coated surfaces. *Journal of Applied Microbiology*. 108:1966-1973.
- Parish, M. E., Beuchat, L. R., Suslow, T. V., Harris, L. J., Garrett, E. H., Farber, J. N. y Busta, F. F. 2003. Methods to Reduce/Eliminate Pathogens Fresh-Cut Produce. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2 (Suplemento)161-73.
- Pera-Titus, M., García-Molina, V., Baños, M. A., Giménez, J. y Esplugas, S. 2004. Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental*. 47(4):219-256.
- Rivera, S. P., Flóres, L. J. y Sanabria, J. 2010. Standardization of a quantification method for *Salmonella* spp. and *Shigella* spp. in specific liquid media. *Colombia médica*. 41(1):60-70.
- Rodríguez, M., Hernández, A. y Peralta, J. M. 2010. Generación de especies oxidantes por métodos homogéneos y heterogéneos. *Ciencia UANL*. 13(2):162-166.
- Selma, M. V., Allende, A., López-Gálvez, F., Conesa, M. A. y Gil, M. I. 2008. Heterogeneous photocatalytic disinfection of wash waters from the fresh-cut vegetable industry. *Journal of Food Protection*. 71(2):286-292.
- Sichel, C., De Cara, M., Tello, J., Blanco, J. y Fernández-Ibáñez, P. 2007. Solar photocatalytic disinfection of agricultural pathogenic fungi: *Fusarium* species. *Applied Catalysis B: Environmental*. 74:152-160.
- Silva, A., Trujillo, S. A., Aguilar, J. e Hincapié, G. 2009. Tratamiento de contaminantes orgánicos por foto-Fenton con luz artificial. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 8(15):53-62.
- Srinivasan, C. y Somasundaram, N. 2003. Bactericidal and detoxification effects of irradiated semiconductor catalyst, TiO₂. *Current Science*. 85(10):1431-1438.
- Swindle, E. y Metcalfe, D. 2007. The role of reactive oxygen species and nitric oxide in mast cell dependent inflammatory processes. *Immunological Reviews*. 217:186-205.
- Wang, L., Gong, L., Zhao, E., Yu, Z., Torimoto, Y., Sadakata, M. y Li, Q. X. 2007. Inactivation of *Escherichia coli* by O[·] water. *Letters in Applied Microbiology*. 45:200-205.
- Zhou, H. y Smith, D. W. 2002. Advanced technologies in water and wastewater treatment. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1: 247-264.