



# Dosificación de nanopartículas de hierro zero valente y tiempo de contacto para la eliminación de coliformes en aguas residuales municipales

Dosing of zero valent iron nanoparticles and contact time for the removal of coliforms in municipal wastewater

Ochoa, Henry R.<sup>1</sup>; Loayza, Cesar A.<sup>1</sup>; Ceras, Caty <sup>1</sup>;  
 Mendoza, Fiorella S.<sup>2</sup> y Ochoa, Hans G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química,  
Universidad Nacional del Centro del Perú,  
Huancayo, Perú.

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Ambiental,  
Universidad Alas Peruanas,  
Huancayo, Perú.

## Cómo referenciar:

Ochoa, H. R., Loayza, C. A., Ceras, C., Mendoza, F. S., y Ochoa, H. G. (2023). Dosificación de nanopartículas de hierro zero valente y tiempo de contacto para la eliminación de coliformes en aguas residuales municipales. *Prospectiva Universitaria*, 20(01), 54–60. <https://doi.org/10.26490/uncp>

## Resumen

Las aguas residuales municipales son aguas de abastecimiento utilizadas en las actividades domésticas, por ende, requieren de tratamiento, sin embargo, no todo tratamiento brinda resultados efectivos, actualmente el uso de nanopartículas es un tratamiento prometedor para las aguas residuales, por ende, en este trabajo de investigación se buscó determinar la eficacia de las nanopartículas de Fe cero valente en la eliminación de coliformes totales (CT) y Coliformes termotolerantes (CF). El tipo de investigación fue experimental con un diseño de pre y post tratamiento y grupo de control, se analizó la variación de la dosis de nanopartículas y el tiempo de contacto mediante el análisis experimental en 150 mL de agua residual municipal con nZVI de 0.5g, 1.0g y 1.5g por 30 min, 60 min y 100 min. Las concentraciones iniciales encontradas fueron CT y CF:  $>1.1 \times 10^5$  cada una; logrando un máximo porcentaje de remoción de 85.91% de CT y 89.09% de CF, ambos con 0.5 g de dosis y 100 min de tiempo de contacto, 91.45% en CT y 93.68% en CF, ambos con 1.0 g de dosis y 60 min de tiempo de contacto y 98.59% en CT y 98.95% en CF, ambos con 1.5 g de dosis y 100 min de tiempo de contacto. Con los resultados deducimos que la mayor eficacia de eliminación de coliformes totales y termotolerantes se dan a una dosis de 1.5g con un tiempo de contacto de 100 minutos.

*Palabras clave:* eliminación, nZVI, coliformes, coliformes termotolerantes, dosis, tiempo de contacto.

## Abstract

Municipal wastewater is a water supply used in domestic activities, therefore, it requires treatment, however, not every treatment provides effective results, currently the use of nanoparticles is a promising treatment for wastewater, therefore, in this research work we sought to determine the effectiveness of Fe zero valent nanoparticles in the elimination of total coliforms (TC) and thermotolerant coliforms (TC). The type of research was experimental with a pre- and post-treatment design and control group. The variation of nanoparticle dose and contact time was analyzed by experimental analysis in 150 mL of

municipal wastewater with nZVI of 0.5g, 1.0g and 1.5g for 30 min, 60 min and 100 min. The initial concentrations found were CT and CF:  $>1.1 \times 10^5$ , respectively, achieving a maximum removal percentage of 85.91 of CT and 89.09 of CF, both with 0.5 g dose and 100 min contact time, 91.45 in CT and 93.68 in CF, both with 1.0 g dose and 60 min contact time and 98.59 in CT and 98.95 in CF, both with 1.5 g dose and 100 min contact time. With the results we deduce that the highest total and thermotolerant coliforms elimination efficiency occurs at a dose of 1.5 g with a contact time of 100 min.

*Keywords:* elimination, nZVI, coliforms, thermotolerant coliforms, dosage, contact time.

## 1 Introducción

Se conoce al agua residual como toda aquella alterada negativamente a causa de la actividad humana, donde al analizarlas resultan no aptas para el consumo humano, de esta manera el agua residual es toda aquella utilizada en los domicilios, centros urbanos, industria y ganadería, así como las naturales que se mezclan con ellas.

En el tratamiento de aguas residuales municipales, se usan diversas tecnologías en las diferentes etapas del proceso, tanto en el tratamiento primario, secundario y desinfección. Sin embargo, muchos de estos no cuentan con la eficiencia esperada para remover altos porcentajes de microorganismos como los «coliformes totales» y «termo tolerantes», las cuales afectan a los seres humanos y al medio ambiente, provocando un desequilibrio en el ecosistema e incluso generando la propagación de enfermedades intestinales. Existen estudios que buscan solucionar este problema, no obstante, muchos no han tenido resultados con gran relevancia o algunos generan efectos secundarios (Sonune & Ghate, 2004).

Hoy en día, las nanopartículas ofrecen diferentes tratamientos ambientales y remediaciones para aguas residuales, aire, aguas subterráneas, superficies y suelos contaminados (Borja et al., 2020). Las nanopartículas tienen la capacidad de brindar solución a los retos tecnológicos y ambientales en distintas áreas como la medicina, química y ambiente (Astruc et al., 2005).

Además, durante los últimos años, los estudios sobre nanopartículas magnéticas se han incrementado a causa de su multifuncionalidad, que engloba desde la aplicación en la biomedicina hasta el obtención de imágenes por resonancia magnética, administrar drogas y tratar el cáncer. Por estas razones las nanopartículas se consideran biomateriales por ser biocompatibles y biodegradables (Calero, 2015). El campo en el cual más sobresalen actualmente, en particular las nanopartículas magnéticas de hierro, es el campo ambiental, ya que se usa principalmente para remediar suelo y agua, por su baja toxicidad, de

fácil separación, pequeño tamaño y gran reactividad (Díaz, 2021). Por ello que el presente estudio buscó evaluar la aplicación de la nanotecnología mediante la utilización de nanopartículas de hierro Zero Valente para la remoción y eliminación de bacterias coliformes, a través de procesos seguros y fiables para el medio ambiente.

En tal sentido, se buscó explicar de qué forma influye la dosificación de la nanopartícula de hierro Zero Valente y el tiempo de contacto en la eliminación de los coliformes totales y termo tolerantes de las aguas residuales municipales.

## 2 Materiales y Métodos

### 2.1 Procedimiento

Se diseñó un experimento con grupo control de pre y posprueba para la evaluación de la eficacia de las nanopartículas de hierro zero valente (n-ZVI) en la eliminación de coliformes totales y termotolerantes en aguas residuales municipales.

Las n-ZVI fueron obtenidas de la empresa MK-nano (división de MK Impex Corp.) estas consisten en nanopartículas de superficie estabilizada de Fe(0) que tuvieron un tamaño de 25 nm y fueron elaboradas en el lote N° KC0512.

Para el tratamiento de las aguas residuales se siguió el siguiente procedimiento: (a) en tres vasos precipitados de 150 mL se colocaron 100 mL de agua residual municipal; (b) en cada vaso se adicionó 0.5g, 1g, y 1.5g de n-ZVI; (c) luego, los vasos se colocaron en un agitador magnético para homogeneizar la mezcla a 440 RPM; (d) el proceso de disminución de los microorganismos se controló en tiempos de 20 min, 60 min y 100 min. Una vez culminado el tiempo se procedió a un proceso de filtrado; (e) la cantidad de coliformes removidas se evaluó mediante un análisis de tubos múltiples.

### 2.2 Muestreo

La población objetivo fueron las aguas residuales municipales, mientras que la unidad muestral fueron 150 mL por cada tratamiento con nanopartículas de óxido de hierro cero valentes (n-ZVI). Se tomó 500 mL para la caracterización inicial de la concentración de coliformes totales y termotolerantes y 3L para la parte experimental, las cuales fueron preservadas a menos de 4°C en botellas esterilizadas.

### 2.3 Análisis

El estudio recurrió a técnicas de estadística descriptiva e inferencial para el análisis de los datos; para la evaluación de las hipótesis planteadas se recurrió al análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey.

Para determinar el porcentaje de remoción de coliformes se aplicó la ecuación 1 tomando valores promedio de la cantidad de bacterias medidas después de los tratamientos.

$$\%eliminacin = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde  $C_i$  es coliformes iniciales,  $C_f$  es coliformes finales.

## 3 Resultados

La muestra control de aguas residuales municipales se caracterizó por contener aproximadamente más de  $1.1 \times 10^5$  NPM/100mL de Coliformes Totales y Termotolerantes.

**Tabla 1**

*Reducción de Coliformes Después de los Tratamientos*

Tiempo	Coliformes R1		Coliformes R2	
	Totales	Termo tolerantes	Totales	Termo tolerantes
Dosis de 0.5 gramos				
30	$2.90 \times 10^4$	$2.40 \times 10^4$	$2.90 \times 10^4$	$2.10 \times 10^4$
60	$2.10 \times 10^4$	$1.20 \times 10^4$	$2.40 \times 10^4$	$1.60 \times 10^4$
100	$1.50 \times 10^4$	$1.20 \times 10^4$	$1.60 \times 10^4$	$1.20 \times 10^4$
Dosis de 1.0 gramos				
30	$1.20 \times 10^4$	$9.30 \times 10^3$	$1.50 \times 10^4$	$9.30 \times 10^3$
60	$9.50 \times 10^3$	$7.50 \times 10^3$	$9.30 \times 10^3$	$6.40 \times 10^3$
100	$3.60 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$	$3.40 \times 10^3$	$2.60 \times 10^3$
Dosis de 1.5 gramos				
30	$6.40 \times 10^3$	$4.40 \times 10^3$	$6.40 \times 10^3$	$4.30 \times 10^3$
60	$4.30 \times 10^3$	$3.60 \times 10^3$	$4.20 \times 10^3$	$3.40 \times 10^3$
100	$1.60 \times 10^3$	$1.10 \times 10^3$	$1.50 \times 10^3$	$1.20 \times 10^3$

Nota. Tiempo de tratamientos en minutos.

Luego de la aplicación de las n-ZVI estas cantidades disminuyeron drásticamente a valores que se muestran en la tabla 1.

Con respecto al porcentaje de eliminación de coliformes, la figura 1 evidencia que los tratamientos lograron gran reducción en las muestras de agua. Destacó porcentajes máximos de hasta 98.59% y 98.95% para coliformes totales y termotolerantes, respectivamente; esto a una dosis de 1.5g de n-ZVI y a 100 min de contacto.

Por otro lado, los datos se sometieron a un análisis de varianza para determinar diferencias significativas entre los tratamientos, asimismo este análisis demostró que los factores al trabajar de forma individual o en conjunto obtuvieron un valor-p menor a .05, esto significó que la dosis de nanopartículas influyó significativamente en la reducción de coliformes totales y termotolerantes.

**Tabla 2**

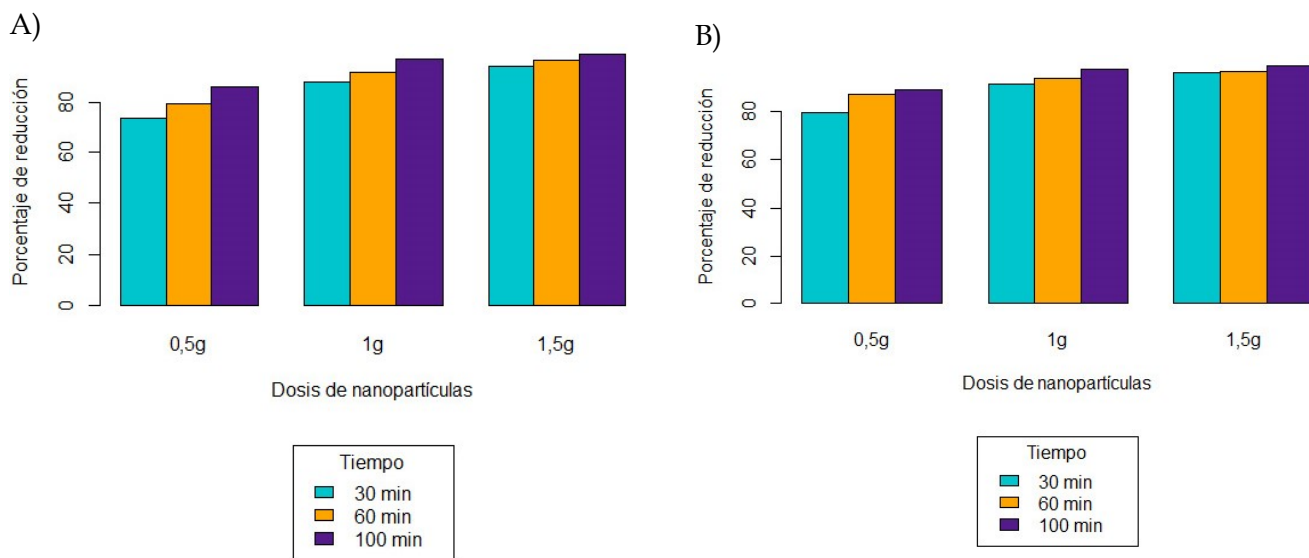
*Eliminación de Coliformes por Dosis*

Dosis de n-ZVI	N	Media	Agrupación
Coliformes totales			
1.5	6	0.9630	A
1.0	6	0.9200	A
0.5	6	0.7970	B
Coliformes termotolerantes			
1.5	6	0.9727	A
1.0	6	0.9426	A
0.5	6	0.8530	B

La tabla 2 muestra la comparación entre las tres dosis de n-ZVI en la reducción de coliformes totales, en ella se evidencia que la menor dosis (0.5g) produjo la media más baja de eliminación (79.70%) mientras que con la mayor dosis (1.5g) se logró la mayor media de eliminación (96.30%).

Con respecto al porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes, la menor dosis (0.5g) produjo un 85.30% de eliminación, siendo la menor de todas. En contraste, con una dosis de 1.5g se logró la media más elevada, alcanzando hasta el 96.30% de eliminación de coliformes termotolerantes.

**Figura 1**  
Porcentaje de Eliminación de Coliformes



Nota. Panel A: Porcentaje de eliminación de coliformes totales. Panel B: Porcentaje de eliminación de coliformes termotolerantes.

**Tabla 3**  
Eliminación de Coliformes por Tiempo de Contacto

Tiempo	N	Media	Agrupación
<b>Coliformes totales</b>			
100	6	0.9377	A
60	6	0.8905	A
30	6	0.8518	A
<b>Coliformes termotolerantes</b>			
100	6	0.9520	A
60	6	0.9259	A
30	6	0.8905	A

En la tabla 3 se observa la comparación de la reducción de coliformes entre los tres tiempos de contacto, con respecto a coliformes totales, el menor tiempo de contacto (30 min) produjo una media de 85.18% de eliminación, siendo la menor de entre todas; mientras que el mayor (100 min.) logró la media más elevada de eliminación (93.77%). Con respecto al porcentaje de reducción de coliformes termotolerantes, el menor tiempo (30 min) produjo una eliminación del 89.05%, mientras que el mayor (100 min.) produjo la media más elevada (95.20%).

Estos datos sugieren que la mayor eficacia de eliminación de coliformes totales y termotolerantes se encuentra con una dosis de 1.5g de n-ZVI a un tiempo de contacto de 100 minutos.

## 4 Discusión

Se demostró que las nanopartículas de Fe zero valente pueden eliminar una gran cantidad de coliformes totales y termotolerantes, alrededor del 98.59% y 98.95% de respectivamente. Esto se puede ver en investigaciones como la de [Groiss et al. \(2017\)](#) que demostró que las nanopartículas de óxido de hierro poseen propiedad antibacteriana potencial contra los parametros microbiologicos que este caso fueron E. coli y S. Epidermidis.

De igual manera [Cross et al. \(2009\)](#), que estudio con nanopartículas de hierro afirma de igual manera que el óxido de hierro retarda la proliferación de bacterias en la superficie de las membranas, lo que resulta en una mejor remediación del agua. [Mukherjee y De \(2015\)](#) demostró de igual manera que la propiedad antibacteriana de las nanopartículas de óxido de hierro logran grandes resultados inhibiendo bacterias hasta un 72%.

[Trujillo et al. \(2018\)](#) menciona que las nanopartículas de oxido de hierro pueden realizar una captura bacteriana eficiente, abriendo puertas a la reducción de la proliferación bacteriana. Asimismo [Najafpoor et al., \(2020\)](#) trabaja con nuestros indicadores afirmando que el aumento de la dosis de nanopartículas y el tiempo de contacto y la disminucion del nivel de contaminación mejoran la eficacia del tratamiento hasta un 55%, resultado que en nuestra investigación demostramos. Por su parte [Hatamie et al. \(2016\)](#) nos



muestra de igual manera que las nanopartículas de hierro zero valente también puede reducir la turbidez y la demanda química de oxígeno, eliminar importantes cationes de metales pesados y aniones al mismo tiempo, siendo una grana alternativa de uso para tratamiento de aguas.

Karnik et al. (2007); Sadek et al. (2021); Seid-Mohammadi et al. (2021) afirman que las nanopartículas nZVI se han distinguido de las granulares de partículas de Fe debido a la mejora en su alta movilidad y reactividad, debido a su mayor área superficial por lo cual presenta mejores resultados. Das et al. (2017) al usar Fe/ZnO NP afirma que es un tratamiento de bajo costo y con alta eficacia bajo la luz solar por lo que puede tener potencial para aplicaciones en el mundo real, para ayudar a reducir la propagación de bacterias resistentes.

(Ahammed & Davra, 2011; Fernández et al., 2020; Sizirici et al., 2019) nos mencionan que el óxido de hierro inactiva las bacterias entéricas naturales presentes en los efluentes de aguas residuales municipales. Por último, complementando con investigaciones como de Horky et al. (2019); Sasidharan et al. (2022); Zarpelon et al. (2016) se demuestra que es necesario el desarrollo de nuevos nano materiales que inhiban o eliminen bacterias ya que es un tema de investigación importante, oportuno y prometedor

Asimismo, con respecto a la dosis de nanopartículas de hierro zero valente, se mostró que un incremento en la dosis de nanopartículas de Fe cero valente tiene una gran capacidad de eliminación de coliformes, alrededor del 96.30% de coliformes totales y 97.27% de coliformes termotolerantes con una cantidad de 1.5 g de nZVI. En resumen, un incremento de nanopartículas de Fe puede eliminar con gran eficacia los coliformes, esto se atribuye a una gran disrup-

ción física en las membranas celulares de los coliformes, lo cual conlleva una mejora en los efectos biocidas del Fe<sub>0</sub>, de igual manera la presencia de Fe<sup>2+</sup> disuelto al reaccionar con el oxígeno intracelular o peróxido de hidrógeno, ocasiona un estrés oxidativo logrando inactivar los coliformes totales y termotolerantes (Baca, 2021). En su investigación Nangmenyi et al. (2011) solo con una dosis de significativa de nanopartículas de hierros zero valente logró una sólida actividad antibacteriana al lograr una eliminación de 2 log de 10<sup>6</sup> CFU /mL de E. coli en 1 min.

Por ultimo, Al-Allaf et al. (2023); Malakotian et al. (2017) nos muestran que las nanopartículas de óxido de hierro en bajas concentraciones pueden actuar como fuente de iones de hierro requeridos por microorganismos, pero en altas concentraciones pueden causar estrés y daño celular en las células bacterianas al reducir el crecimiento celular. Con respecto al tiempo de contacto, puede verse que la eliminación de coliformes aumentó de forma significativa cuando el tiempo de contacto fue mayor logrando una eliminación de 93.77% y 95.20% para coliformes totales y termotolerantes respectivamente. Esto podría atribuirse a que, a mayor dosis de nanopartículas, el proceso anti material tarda más tiempo con respecto a la inhibición bacteriana llegando a durar así varios días (Ingaruca, 2021).

En suma, un incremento del tiempo de contacto tiene la capacidad de eliminar de forma eficiente los coliformes totales y termotolerantes. Por último, investigaciones como de Han et al. (2019) afirman que el aumento del tiempo de contacto inactivó constantemente E. coli sugiriendo que el tratamiento con h-ZVI se puede utilizar en la industria de tratamiento de agua en lo que respecta a la contaminación bacteriana.

## Referencias

- Ahammed, M. M., & Davra, K. (2011). Performance evaluation of biosand filter modified with iron oxide-coated sand for household treatment of drinking water. *Desalination*, 276(1-3), 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.065>
- Al-Allaf, M., Al-Rawi, A., & AL-Ahmadi, K. (2023). Biosynthesis of Iron Oxide Nanoparticles and Using it to Support the Efficiency of Wastewater Filtration System. *Rafidain Journal of Science*, 32(1), 28-39. <https://doi.org/10.33899/rjs.2023.177285>
- Astruc, D., Lu, F., & Aranzaes, J. R. (2005). Nanoparticles as Recyclable Catalysts: The Frontier between Homogeneous and Heterogeneous Catalysis. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(48), 7852-7872. <https://doi.org/10.1002/anie.200500766>
- Baca, L. S. (2021). Dimensionamiento y evaluación de un reactor Raceway como sistema de desinfección solar de agua mediante hierro zero valente a escala de laboratorio, 2019. *Universidad Nacional Jorge*

- Basadre Grohmann. Consultado el 22 de diciembre de 2023, desde <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3323497>  
Accepted: 2022-11-10T21:26:10Z.
- Borja, J. M., Heredia, S. F., & Sáez, M. Á. (2020). Los nanomateriales y sus aplicaciones en la remediación ambiental. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 5, 338-370. Consultado el 22 de diciembre de 2023, desde <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7518060>
- Calero, M. (2015, 11 de diciembre). *Caracterización de nanopartículas magnéticas en cultivos celulares para sus aplicaciones biomédicas* [doctoralThesis]. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/670895>  
Accepted: 2016-05-17T13:21:34Z.
- Cross, K. M., Lu, Y., Zheng, T., Zhan, J., McPherson, G., & John, V. (2009). Water Decontamination Using Iron and Iron Oxide Nanoparticles. En *Nanotechnology Applications for Clean Water* (pp. 347-364). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1578-4.50033-0>
- Das, S., Sinha, S., Das, B., Jayabalan, R., Suar, M., Mishra, A., Tamhankar, A. J., Stålsby Lundborg, C., & Tripathy, S. K. (2017). Disinfection of Multidrug Resistant Escherichia coli by Solar-Photocatalysis using Fe-doped ZnO Nanoparticles. *Scientific Reports*, 7(1), 104. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00173-0>
- Díaz, P. L. (2021). Efecto bactericida de nanopartículas de hierro, cobre y zinc y plata en el tratamiento y desinfección de aguas residuales. *Naturaleza y Tecnología*, (1). Consultado el 22 de diciembre de 2023, desde <http://www.naturalezaytecnologia.com/index.php/nyt/article/view/384>
- Fernández, L., González-Rodríguez, J., Gamallo, M., Vargas-Osorio, Z., Vázquez-Vázquez, C., Piñeiro, Y., Rivas, J., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2020). Iron Oxide-Mediated Photo-Fenton Catalysis in the Inactivation of Enteric Bacteria Present in Wastewater Effluents at Neutral pH. *Environmental Pollution*, 266, 115181. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115181>
- Groiss, S., Selvaraj, R., Varadavenkatesan, T., & Vinayagam, R. (2017). Structural Characterization, Antibacterial and Catalytic Effect of Iron Oxide Nanoparticles Synthesised Using the Leaf Extract of Cynometra Ramiflora. *Journal of Molecular Structure*, 1128, 572-578. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.09.031>
- Han, S., Huang, Y., & Liu, Z. (2019). Bacterial indicator reduction in dairy manure using hybrid zero-valent iron (h-ZVI) system. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(11), 10790-10799. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04501-x>
- Hatamie, A., Parham, H., Zargar, B., & Heidari, Z. (2016). Evaluating magnetic nano-ferrofluid as a novel coagulant for surface water treatment. *Journal of Molecular Liquids*, 219, 694-702. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.020>
- Horky, P., Skalickova, S., Urbankova, L., Baholet, D., Kociova, S., Bytesnikova, Z., Kabourkova, E., Lackova, Z., Cernei, N., Gagic, M., Milosavljevic, V., Smolikova, V., Vaclavkova, E., Nevrla, P., Knot, P., Krystofova, O., Hynek, D., Kopel, P., Skladanka, J., ... Smerkova, K. (2019). Zinc phosphate-based nanoparticles as a novel antibacterial agent: In vivo study on rats after dietary exposure. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 10(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0319-8>
- Ingaruca, K. G. (2021). Evaluación del tiempo de contacto y la concentración de nanopartículas de dióxido de titanio en la desinfección de las bacterias E. coli de las aguas residuales municipales tratadas. *Universidad Continental*. Consultado el 22 de diciembre de 2023, desde <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/9212>  
Accepted: 2021-06-01T17:53:04Z.
- Karnik, B. S., Davies, S. H., Baumann, M. J., & Masten, S. J. (2007). Removal of Escherichia coli after Treatment Using Ozonation-Ultrafiltration with Iron Oxide-Coated Membranes. *Ozone: Science & Engineering*, 29(2), 75-84. <https://doi.org/10.1080/01919510601139492>
- Malakotian, M., Asadipour, A., & Moghaddam, Y. J. (2017). Effect of Iron Oxide Nanoparticles for the Removal of Coliform Bacteria from Contaminated Water.
- Mukherjee, M., & De, S. (2015). Reduction of microbial contamination from drinking water using an iron oxide nanoparticle-impregnated ultrafiltration mixed matrix membrane: Preparation, characteriza-

- tion and antimicrobial properties. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1(2), 204-217. <https://doi.org/10.1039/C4EW00094C>
- Nangmenyi, G., Li, X., Mehrabi, S., Mintz, E., & Economy, J. (2011). Silver-modified iron oxide nanoparticle impregnated fiberglass for disinfection of bacteria and viruses in water. *Materials Letters*, 65(8), 1191-1193. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.01.042>
- Sadek, A. H., Asker, M. S., & Abdelhamid, S. A. (2021). Bacteriostatic impact of nanoscale zero-valent iron against pathogenic bacteria in the municipal wastewater. *Biologia*, 76(9), 2785-2809. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00814-w>
- Sasidharan, A. P., V, M., & Raphael, V. P. (2022). Coliform Removal Efficacy of Polyurethane Foam Impregnated with Chitosan Nanoparticles and Silver/Silver Oxide Nanoparticles. *Water Supply*, 22(5), 5675-5687. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.186>
- Seid-Mohammadi, A., Asgari, G., Rahmani, A., Madrakian, T., & Karami, A. (2021). Evaluation of Zeolite Supported Bimetallic Nanoparticles of Zero-Valent Iron and Copper (Z-nZVI/Cu) in the Presence of Ultrasonic for Simultaneous Removal of Nitrate and Total Coliforms from Aqueous Solutions: Optimization and Modeling with Response Surface Methodology. *Toxin Reviews*, 40(4), 1058-1070. <https://doi.org/10.1080/15569543.2019.1617316>
- Sizirici, B., Yildiz, I., AlAli, A., Alkhomeiri, A., Alkhoori, A., Bufalasa, F., & Alawadi, R. (2019). Modified Biosand Filters Enriched with Iron Oxide Coated Gravel to Remove Chemical, Organic and Bacteriological Contaminants. *Journal of Water Process Engineering*, 27, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.015>
- Sonune, A., & Ghatge, R. (2004). Developments in Wastewater Treatment Methods. *Desalination*, 167, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113>
- Trujillo, W., Zarria, J., Pino, J., Menacho, L., Coca, M., & Bustamante, A. (2018). Adherence of amino acids functionalized iron oxide nanoparticles on bacterial models E. Coli and B. subtilis. *Journal of Physics: Conference Series*, 987(1), 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/987/1/012044>
- Zarpelon, F., Galiotto, D., Aguzzoli, C., Carli, L. N., Figueroa, C. A., Baumvol, I. J. R., Machado, G., Crespo, J. d. S., & Giovanela, M. (2016). Removal of Coliform Bacteria from Industrial Wastewaters Using Polyelectrolytes/Silver Nanoparticles Self-Assembled Thin Films. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.013>