

# TÉCNICA INNOVADORA PARA LA CAPTURA DE MICROPLÁSTICOS EN AGUAS CONTAMINADAS USANDO FIBRAS ÓPTICAS

INNOVATIVE TECHNIQUE FOR CAPTURE OF MICROPLASTICS IN CONTAMINATED WATER USING OPTIC FIBERS

R. Zaca-Morán1\*, A. Guzmán-Barraza1, P. Zaca-Morán2, J. P. Padilla-Martínez2, J. G. Ortega-Mendoza1\*\*

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 11 -20

**RD-ICUAP**

<https://orcid.org/0009-0001-1609-7949>  
<https://orcid.org/0000-0002-9410-5852>  
<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>  
<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>

Año 11 No. 31

Recibido: 06/noviembre/2023  
Aprobado: 02/diciembre/2024  
Publicado: 20/enero/2025

1División de Posgrados, Universidad Politécnica de Tulancingo,  
Hidalgo 43629, México.  
2Instituto de Ciencias, BUAP, Puebla 72050, México.  
[rafaelzcmrn@gmail.com](mailto:rafaelzcmrn@gmail.com)\*, [gabriel.ortega@upt.edu.mx](mailto:gabriel.ortega@upt.edu.mx)\*\*

## Resumen

En la actualidad, la contaminación por microplásticos representa un problema global con graves implicaciones para el medio ambiente y la salud humana, ya que estas diminutas partículas se encuentran en cuerpos de agua en todo el mundo, desde océanos hasta fuentes de agua potable, amenazando a los ecosistemas acuáticos y la cadena alimentaria. Ante esta preocupación, se ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras para capturar y eliminar eficazmente los microplásticos en aguas contaminadas. Este artículo introduce una novedosa técnica que utiliza fibra óptica, nanopartículas y luz láser para atraer y capturar microplásticos. Las nanopartículas metálicas son depositadas sobre la sección transversal de una fibra óptica y posteriormente calentadas para generar cambios graduales de temperatura que actúan como imanes virtuales, permitiendo la captura eficiente de los microplásticos. Esta innovación no solo facilita su identificación y análisis con técnicas ópticas, sino que también plantea la posibilidad de utilizarla para la purificación del agua, lo que podría contribuir significativamente a la protección del medio ambiente y la salud pública. En resumen, el extremo de una fibra óptica con nanopartículas metálicas funciona como una trampa termo-óptica altamente efectiva para atraer microplásticos, con un potencial prometedor como método de purificación del agua.

Palabras clave: Microplásticos, Fibra Óptica, Trampa Termo-Óptica, Salud.

## Abstract

Currently, microplastic pollution is a global issue with serious implications for the environment and human health. These tiny particles are found in bodies of water worldwide, from oceans to sources of drinking water, threatening aquatic ecosystems and the food chain. In response to this concern, there has been a push to find innovative solutions to capture and effectively eliminate microplastics in contaminated waters. This article introduces a novel technique that uses optical fiber, nanoparticles, and laser light to attract and capture microplastics. Metallic nanoparticles are deposited on the cross-sectional area of an optical fiber and subsequently heated to generate gradual temperature changes that act as virtual magnets, allowing for the efficient capture of microplastics. This innovation not only facilitates their identification and analysis using optical techniques but also raises the possibility of using it for water purification, which could significantly contribute to environmental protection and public health. In summary, the end of an optical fiber with metallic nanoparticles can function as a highly effective thermo-optical trap for attracting microplastics, with promising potential as a water purification method.

Keywords: Microplastics, Optical Fiber, Thermo-Optic Trap, Health

## Los microplásticos en ecosistemas acuáticos

La contaminación de cuerpos de agua por microplásticos es un problema de dimensiones colosales. Ha sido reportado el hallazgo de estas micropartículas en océanos (Enders, Lenz et al. 2015, Pan, Sun et al. 2019), ríos (Rico and Van den Brink 2015, D'Avignon, Gregory-Eaves et al. 2022) lagos, e incluso se en fuentes de agua potable (Mintenig, Löder et al. 2019, Li, Li et al. 2020). Su presencia no solo altera los ecosistemas acuáticos, sino que también tiene efectos en cascada en la biodiversidad marina y la salud humana, Ver Figura 1 (Mintenig, Löder et al. 2019). La persistencia y la falta de biodegradabilidad de los microplásticos plantean preocupaciones significativas en cuanto a la acumulación a largo plazo de estas partículas y sus consecuencias para el medio ambiente.

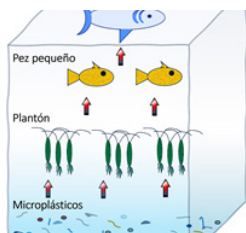


Figura 1. El diagrama muestra un escenario en el que los microplásticos pueden ser transferidos desde organismos de nivel inferior (zooplancton), hasta niveles superiores (peces) mediante la ingesta, lo que, en última instancia conduce a peces y/o mariscos contaminados que son consumidos por los humanos.

Los microplásticos son pequeñas partículas que generalmente miden menos de 5 milímetros de diámetro, y pueden variar en forma y tamaño. Algunos tienden a ser esféricos, mientras que otros son fragmentos irregulares. Los microplásticos comúnmente encontrados en los cuerpos de agua incluyen polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliéster (PET) y polimetacrilato de metilo (PMMA) (Andrady and Neal 2009, Enders, Lenz et al. 2015).

Los microplásticos se clasifican en dos grupos: los primarios, que se producen intencionalmente para aplicaciones

específicas, sobre todo para la industria (Andrady and Neal 2009). Por ejemplo, las microperlas, que son pequeñas esferas de plástico que se encuentran en productos de cuidado personal. Las microfibras textiles: que son fibras de plástico liberadas por la ropa sintética durante el lavado (Koelmans, Besseling et al. 2015). Mientras que los microplásticos secundarios, se forman a partir de la descomposición de plásticos de escala macro en el medio ambiente, este proceso es conocido como fotodegradación. Por ejemplo, el PE y PP son dos de los plásticos ampliamente utilizados para envases, botellas y bolsas de plástico, productos que se descomponen en pequeñas partículas, estas a menudo son tan pequeñas que los sistemas de tratamiento de aguas residuales no pueden filtrarlas.

La fotodegradación ocurre debido a la exposición a la radiación ultravioleta (UV) del Sol, cuyos rayos de luz (fotones) contienen una alta energía que puede romper los enlaces químicos en las moléculas del plástico, alterando sus aspecto físico y mecánico, lo que genera pérdida de flexibilidad, formación de grietas y reducción de su resistencia mecánica, volviéndolos frágiles, descolorados y propensos a desmoronarse (D'Avignon, Gregory-Eaves et al. 2022). Cuando se trata de plásticos en ambientes marinos, el viento y las olas también desempeñan un papel en el proceso de degradación natural.

El tiempo de descomposición o degradación de los plásticos está relacionado con diversos factores, incluido el tipo de plástico, las condiciones ambientales y la influencia de la acción microbiana. Algunas investigaciones han sugerido que los plásticos pueden experimentar una degradación más rápida en entornos terrestres, en comparación con ambientes marinos, donde el proceso puede extenderse durante décadas (Koelmans, Kooi et al. 2017). Es importante subrayar que la descomposición lenta de los microplásticos en el agua plantea un desafío ambiental de gran relevancia debido a su impacto perjudicial en los ecosistemas marinos (Amin, Sohaimi et al. 2020). Esto subraya la necesidad imperante de desarrollar nuevos métodos para la captura o eliminación efectiva de estos microplásticos.

## Métodos y técnicas de atrapamiento de microplásticos

La proliferación de microplásticos en cuerpos de agua es un desafío ambiental urgente que requiere soluciones efectivas. En este sentido, los métodos químicos han surgido como una prometedora estrategia para abordar esta contaminación. Estos métodos implican la manipulación de propiedades químicas para atrapar y eliminar los microplásticos. No obstante, también se encuentran los métodos físicos, como la filtración y sedimentación, esenciales en la lucha contra la contaminación por microplásticos. Ambos se describen a continuación.

### Métodos químicos

En la captura de microplásticos mediante métodos químicos, se recurre a sustancias químicas que, al modificar las propiedades químicas de los líquidos y los propios microplásticos, permiten su retención y posteriormente su eliminación. Entre las estrategias más empleadas en este contexto se incluyen el uso de polímeros y compuestos óxidos metálicos, como el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), además de nanomateriales con la capacidad de establecer nuevos enlaces químicos (Martin, Sheng et al. 2022). También se emplean hidrogeles con propiedades de adsorción que se adhieren a átomos, iones o moléculas en superficies tanto líquidas como sólidas, garantizando la retención tanto de agua como de microplásticos, como se muestra en la Figura 2 (Park, Oh et al. 2022).

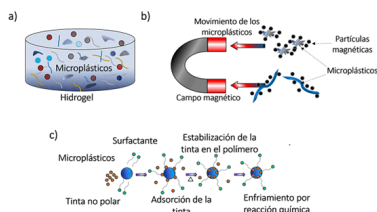


Figura 2. Proceso de adsorción de microplásticos usando a) hidrogeles, b) campos magnéticos y c) compuestos químicos

Otros métodos efectivos abarcan sistemas de alta adsorción basados en carbón activado, polímeros magnéticos que atraen microplásticos mediante campos magnéticos, tratamientos con surfactantes que reducen la tensión superficial de los líquidos, lo que provoca la aglomeración de microplásticos, así como la flotación selectiva, que modifica la superficie de los microplásticos volviéndolos hidrofóbicos (repelentes al agua). Adicionalmente, se emplean técnicas electroquímicas que hacen uso de campos eléctricos en sustancias químicas para lograr la captura eficiente de microplásticos (Andrady and Neal 2009, Koelmans, Besseling et al. 2015, Wagner and Lambert 2018, Rani, Ducoli et al. 2023).

### Métodos físicos

Los métodos físicos de atrapamiento de microplásticos en cuerpos de agua se basan principalmente en el uso de técnicas mecánicas, uso de filtros o sedimentación como lo muestra la Figura 3. Estas técnicas comprenden la filtración mecánica, que consiste en pasar el agua a través de filtros contruidos con mallas o membranas diseñadas para retener partículas de acuerdo con su tamaño (esencial que los orificios en las mallas no superen los 5 mm para microplásticos). La implementación de barreras flotantes que aprovechan las corrientes para dirigir los contaminantes hacia un punto de recolección. Bombas de succión que aspiran el agua contaminada para su posterior filtración, y la sedimentación, un proceso natural en el cual los microplásticos tienden a desplazarse hacia el fondo de los cuerpos de agua debido a su densidad. Además, se lleva a cabo una separación por suspensión de microplásticos según su densidad y tamaño, abarcando técnicas como la centrifugación, la generación de ciclones hidráulicos y el uso de tamices de tambor (Koelmans, Kooi et al. 2017).

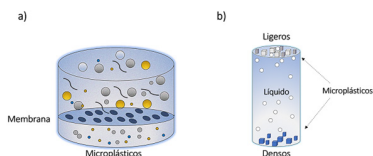


Figura. 3. Proceso de filtración mecánica de microplásticos usando a) membranas o mallas y por b) flotabilidad en función de la densidad de los microplásticos

Los distintos métodos de atrapamiento de microplásticos mencionados anteriormente presentan desventajas, como la ineficiencia selectiva, la generación de subproductos o residuos no deseados, el consumo excesivo de energía, los costos de operación elevados y posibles daños colaterales a la vida acuática, entre otros.

La fibra óptica es un medio de transmisión de información que utiliza a la luz para transmitir datos. Aunque tradicionalmente se ha utilizado en telecomunicaciones y redes de datos, su versatilidad ha llevado a investigaciones en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la detección y monitoreo ambiental.

En este contexto, nuestro grupo de trabajo ha investigado un enfoque prometedor para la captura de cantidades significativas de diminutas partículas de plástico mediante el uso de la fibra óptica. Esta innovadora técnica aprovecha un fenómeno conocido como 'trampa termo-óptica'. En términos sencillos, cuando se expone la fibra óptica a la luz, ciertas partículas metálicas adheridas a la punta de la fibra óptica absorben esta luz y generan un cambio en la temperatura. Como resultado, se forma una fuente de 'atrapa-partículas' en la punta de la fibra óptica, lo que le permite recolectar eficazmente microplásticos presentes en el agua. Este enfoque revolucionario

no solo demuestra un alto potencial en la captura de microplásticos, sino que también podría desempeñar un papel fundamental en la preservación de nuestros ecosistemas acuáticos y la protección de la vida marina.

## Atrapamiento de microplásticos con fibra óptica multimodo

En este experimento, se emplean nanopartículas de plata (576832, Sigma-Aldrich) como medio absorbente, las cuales se inmovilizaron en la punta de una fibra óptica multimodo (Thorlabs FG105LVA, 105/125  $\mu\text{m}$  de diámetro del núcleo/revestimiento respectivamente) mediante la técnica de fotodeposición, generando pérdidas de 10 dB (se provoca que salga solo el 10 % de la luz y el resto sea absorbida) (Ortega-Mendoza, Soto-López et al. 2019). Posteriormente, se conecta la fibra óptica a un láser de onda continua cuya longitud de onda es de 450 nm y emite a una potencia de 63 mW. La extremidad de la fibra óptica fotodepositada se introduce en una cavidad de vidrio en una solución con microplásticos, como se ilustra en la Figura 4. Aquí dos mezclas son utilizadas: la primera con 1 mg de partículas de polimetacrilato de metilo (PMMA) y la segunda 1 mg de partículas de polietileno (PE), ambas disueltas en 5  $\mu\text{l}$  de agua destilada y sometidas a un proceso de filtrado y de ultrasonido para provocar una distribución uniforme. Para observar la dinámica de captura de microplásticos, se utilizó una cámara (Moticam 2500, Motic) en un microscopio metalográfico (PT-XJL101, Physical Test Solutions) equipado con un objetivo de microscopio de 40x. Los videos capturados por la cámara son posteriormente analizados mediante el programa Motic Images Plus 2.0.

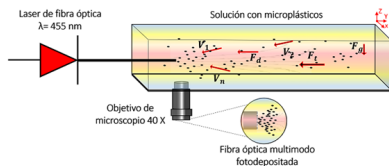


Figura 4: Diseño experimental implementado para el atrapamiento de microplásticos. Donde  $F_g$  es la fuerza de gravedad,  $F_t$  la fuerza termoforética (fuerza debido al gradiente térmico provocado por el calentamiento de las nanopartículas metálicas en la punta de la fibra óptica) y  $F_d$  la fuerza de arrastre (siguen la trayectoria del movimiento del fluido). Por lo que fuerza resultante es la suma lineal de estas, dada como  $F_T = F_t + F_d + F_g$ .

Las Figuras 5 y 6 muestran el atrapamiento de dos tipos de microplásticos PMMA y PE en un intervalo temporal de 10 minutos. Se puede observar que, al paso del tiempo en la punta de la fibra óptica se va incremento la cantidad de microplásticos atrapados. Para llevar a cabo estos experimentos se generaron pérdidas de potencia de 10 dB y se activó el láser a una potencia de 67 mW, que son las condiciones óptimas para trabajar con este método. Potencias o pérdidas menores a las mencionadas genera pequeños cambios de temperatura, haciendo que el proceso de atrapamiento sea lento. Mientras que potencias y pérdidas mayores a las mencionadas, dan paso a la formación de una burbuja de vapor en la punta de la fibra, esparciendo todos los microplásticos atrapados previamente. La formación de la burbuja de vapor es debida a que el gradiente térmico (cambios de temperatura), supera la temperatura del punto de ebullición de la solución.

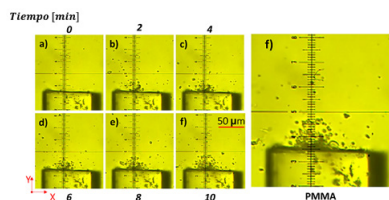


Figura 5: Atrapamiento de microplásticos de PMMA en la punta de la fibra óptica fotodepositada por un tiempo de 10 minutos.

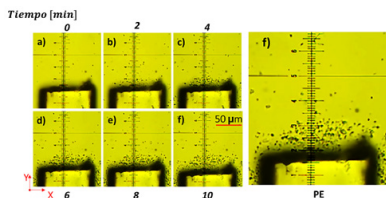


Figura 6: Atrapamiento de microplásticos de PE en la punta de la fibra óptica fotodepositada por un tiempo de 10 minutos.

Para explicar el atrapamiento termo-óptico de los microplásticos en la punta de la fibra óptica, se realizó la simulación del gradiente térmico generado por la radiación láser incidente en las nanopartículas metálicas de plata. Se consideró inicialmente que la fibra está en un ambiente acuoso y sin un material absorbente (Figura 7 a). Posteriormente, se asume que las nanopartículas de plata formaban una película delgada con un grosor de  $\mu\text{m}$  (Figura 7 b), las cuales son absorbentes a la longitud de onda de operación ( $\mu = 455\text{ nm}$ ). En ambas simulaciones, tanto con nano o sin nanopartículas metálicas, al láser se le asignó una potencia de emisión de 67 mW. A partir de estas condiciones, la temperatura del líquido circundante a la fibra óptica alcanza una temperatura alrededor de los  $80^\circ\text{C}$ , lo que da paso a la formación de corrientes convectivas, estas últimas se muestran en la Figura 7 c) y 7 d) que son los planos YX y ZX respectivamente. Se asume que las corrientes convectivas son el principal factor para el atrapamiento de los microplásticos frente a la punta de la fibra, como lo muestra la figura 7 c).

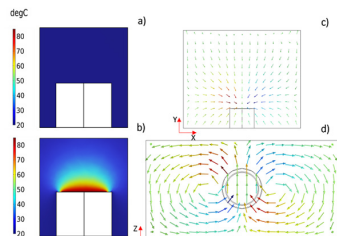


Figura 7. Simulación del gradiente térmico sobre la punta de la fibra óptica multimodo a) sin nanopartículas y con b) nanopartículas, en ambos casos la fuente simulada tiene una potencia de salida de 63 mW. Por otro lado, en c) y d) se muestran las corrientes convectivas generadas en los plano YX y ZX respectivamente, para el caso b).

El gradiente de temperatura induce la convección térmica, conocida como corrientes convectivas, que es el movimiento del fluido debido a las diferentes temperaturas causadas por la absorción de la película metálica. Los cambios de temperatura en la solución se rigen por la ecuación de calor  $\mu l c_p U \cdot T = \cdot (\mu T) + Q$ , donde  $c_p$  representa la capacidad calorífica y  $\mu$  representa conductividad térmica. En esta ecuación,  $Q = I_o \alpha$  es la fuente de calor por unidad de volumen, donde  $\alpha$  el coeficiente de absorción (la capacidad del material para absorber la luz) y  $I_o$  es la intensidad de la fuente óptica (Nalupurackal, Gunaseelan et al. 2022). El equilibrio entre la fuerza de atracción generada por las corrientes convectivas y las fuerzas generadas por la termofóresis, así como la gravedad, dan como resultado la captura de los microplásticos en la punta de la fibra óptica, como lo muestra la Figura 4. Esto representa un nuevo método para atrapar microplásticos y limpiar aguas contaminadas.

## Conclusiones

Este estudio se presenta un enfoque novedoso para la captura de microplásticos en el agua utilizando una fibra óptica multimodo con nanopartículas metálicas en su extremo, que actúan como una trampa termo-óptica al absorber la energía de la luz y retener estas partículas dañinas. Aunque representa un avance en la eliminación de microplásticos en entornos acuáticos, la efectividad de esta técnica puede variar según el contexto, la calidad del agua y la concentración de microplásticos. Es esencial reconocer que, además de soluciones tecnológicas, abordar las fuentes primarias de contaminación de microplásticos, como la reducción de plásticos de un solo uso y la gestión de residuos mejorada, es crucial para abordar de manera integral este problema ambiental.

## Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

## Conflicto de interés

Los autores participantes en la elaboración de este artículo manifestamos no tener ningún conflicto de interés personal o económico.

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo económico brindado en el marco de Estancias

Posdoctorales por México 2022 (3), con CVU 771927.

## Referencias

- Amin, R. M., et al. (2020). Microplastic ingestion by zooplankton in Terengganu coastal waters, southern South China Sea. *Marine pollution bulletin* 150: 110616. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110616>.
- Andrady, A. L. and M. A. Neal (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364(1526): 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>.
- D'Avignon, G., et al. (2022). Microplastics in lakes and rivers: an issue of emerging significance to limnology. *Environmental Reviews* 30(2): 228-244. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0048>.
- Enders, K., et al. (2015). Abundance, size and polymer composition of marine microplastics  $\geq 10 \mu\text{m}$  in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine pollution bulletin* 100(1): 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>.
- Koelmans, A. A., et al. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. *Marine anthropogenic litter*: 325-340. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16510-3\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16510-3_12).
- Koelmans, A. A., et al. (2017). All is not lost: deriving a top-down mass budget of plastic at sea. *Environmental Research Letters* 12(11): 114028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9500>.
- Li, Y., et al. (2020). Occurrence, removal and potential threats associated with microplastics in drinking water sources. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(6): 104527. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104527>.
- Martin, L. M., et al. (2022). Testing an iron oxide nanoparticle-based method for magnetic separation of nanoplastics and microplastics from water. *Nanomaterials* 12(14): 2348. <https://doi.org/10.3390/nano12142348>.
- Mintenig, S. M., et al. (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the total environment* 648: 631-635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178>.
- Nalupurackal, G., et al. (2022). A hydro-thermophoretic trap for microparticles near a gold-coated substrate. *Soft matter* 18(36): 6825-6835. <https://doi.org/10.1039/D2SM00627H>.
- Ortega-Mendoza, J., et al. (2019). Generating micropatterns onto the core of an optical fiber end with nanoparticles using fiber modes. *Laser Physics Letters* 16(4): 045105. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab0c88>.

Pan, Z., et al. (2019). Prevalence of microplastic pollution in the Northwestern Pacific Ocean. *Chemosphere* 225: 735-744. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.076>.

Park, D. H., et al. (2022). In Situ Fluorescent Illumination of Microplastics in Water Utilizing a Combination of Dye/Surfactant and Quenching Techniques. *Polymers* 14(15): 3084. <https://doi.org/10.3390/polym14153084>.

Rani, M., et al. (2023). A Complete Guide to Extraction Methods of Microplastics from Complex Environmental Matrices. *Molecules* 28(15): 5710. <https://doi.org/10.3390/molecules28155710>.

Rico, A. and P. J. Van den Brink (2015). Evaluating aquatic invertebrate vulnerability to insecticides based on intrinsic sensitivity, biological traits, and toxic mode of action. *Environmental Toxicology and Chemistry* 34(8): 1907-1917. <https://doi.org/10.1002/etc.3008>.

Wagner, M. and S. Lambert (2018). Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?, *Springer Nature*. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/42902>.

Thompson, J. D., Higgins, D. G., & Gibson, T. J. (1994). CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Research*, 22(22), 4673-4680. doi:10.1093/nar/22.22.4673

Trott, O. & Olson, A. J. (2010) AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455-461. doi:10.1002/jcc.21334

Waterhouse A. M., Procter J. B., Martin D. M. A., Clamp M., & Barton G. J. (2009) Jalview Version 2 - A multiple sequence alignment editor and analysis workbench. *Bioinformatics* 25 1189-1191. doi:10.1093/bioinformatics/btp033

Webb, B., & Sali, A. Comparative Protein Structure Modeling Using Modeller. *Current Protocols in Bioinformatics* 54, John Wiley & Sons, Inc., 5.6.1-5.6.37, 2016. doi:10.1002/cpbi.3

wwPDB consortium. Protein Data Bank: the single global archive for 3D macromolecular structure data (2019). *Nucleic Acids Research*, 47, D520-D528, doi:10.1093/nar/gky949