

Estudio del efecto de parámetros físicos en la rigidez de pinzas ópticas

Natalia Margarita Zepeda Montiel¹, Uriel Larrea Corredor², and Erick Sarmiento Gómez³

Universidad de Guanajuato - División de Ciencias e Ingenierías

nm.zepedamontiel@ugto.mx¹, u.larreacorredor@ugto.mx² and e.sarmiento@fisica.ugto.mx³

Resumen

En este trabajo se analiza la dependencia de la constante de rigidez de una partícula atrapada en una pinza óptica en función de algunas propiedades del medio pero también del tipo de partícula. A partir del análisis de la trayectoria de la partícula atrapada, y usando predicciones teóricas del fenómeno, es posible determinar la intensidad del atrapamiento óptico, caracterizado por la constante de rigidez al asumir un modelo de restitución tipo Hooke. Analizamos como cambia la constante de rigidez con la potencia, con el índice de refracción del medio y con el material del que está constituido la partícula. Esta información sería de relevancia en el campo del atrapamiento óptico, con implicaciones tanto en la biología como en la física.

Introducción

Las pinzas ópticas utilizan un láser enfocado para generar fuerzas ópticas que atrapan partículas dieléctricas mediante un equilibrio entre la fuerza de dispersión (dirección de propagación) y la fuerza de gradiente (hacia el foco láser), donde el atrapamiento requiere que el índice de refracción de la partícula (n_p) difiera del medio (n_m) [1]. El movimiento de las partículas atrapadas se caracteriza por el desplazamiento cuadrático medio:

$$\langle \Delta r^2(\tau) \rangle = \langle [r(t + \tau) - r(t)]^2 \rangle \quad (1)$$

que satura a:

$$\langle \Delta r^2(\tau \rightarrow \infty) \rangle = \frac{2k_B T}{\kappa} \quad (2)$$

permitiendo determinar la constante de rigidez κ [2]. En este trabajo estudiamos κ para partículas de sílice y poliestireno ($2 \mu\text{m}$) variando la potencia láser (10-40 mW) y el índice de refracción del medio (agua-glicerol) [3], con aplicaciones en biofísica, nanotecnología y diagnóstico médico [4, 5].

Metodología

El sistema de pinzas ópticas consistió en un láser de **1064 nm** (Thorlabs) acoplado a un microscopio invertido mediante un arreglo de lentes ópticas (Thorlabs), focalizándose a través de un objetivo de alta apertura numérica (**100x, NA 1.3**). La visualización se realizó con una cámara CMOS (Thorlabs) conectada al puerto lateral del microscopio, permitiendo el monitoreo en tiempo real del atrapamiento de partículas.

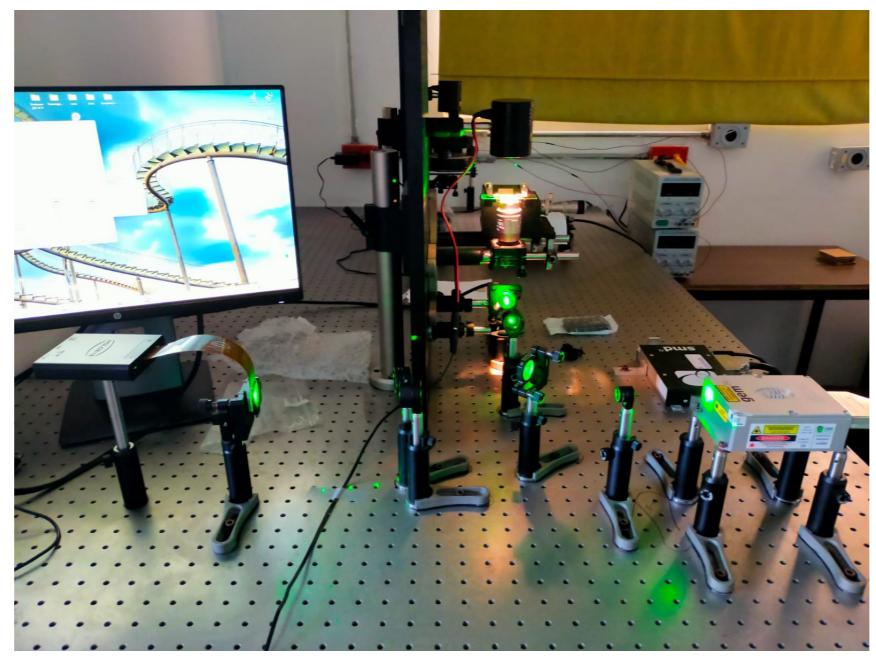


Figure 1: Configuración experimental de las pinzas ópticas

Para la preparación de muestras, se utilizaron partículas de sílice y poliestireno de **2 μm** de diámetro. Estas se diluyeron en agua Milli-Q (**18.2 MΩ·cm**) en una proporción de **1 μL** de partículas por **1 mL** de agua. Además, se fue agregando un 10 % del volumen de glicerol a las muestras cada que se tomaron datos. La suspensión se depositó sobre portaobjetos previamente limpiados con etanol y secados con N_2 , utilizando volúmenes de **5-10 μL** . Los cubreobjetos se sellaron con esmalte de uñas para evitar evaporación y contaminación.

La adquisición de datos se realizó grabando videos de **10 y 30 minutos (18,000 y 54,000 frames respectivamente)** a **30 fps**, utilizando potencias del láser de **10, 20, 30 y 40 mW**. El procesamiento de las trayectorias de las partículas se llevó a cabo con la biblioteca **TrackPy** en Python, implementada en el entorno Spyder. Las trayectorias se analizaron para calcular el desplazamiento cuadrático medio (**MSD**), el cual se ajustó a un modelo de potencial armónico para determinar la constante de rigidez (κ) mediante la relación:

$$\kappa = \frac{2k_B T}{\langle \Delta r^2(\tau \rightarrow \infty) \rangle} \quad (3)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) y T la temperatura (**298 K**).

Resultados

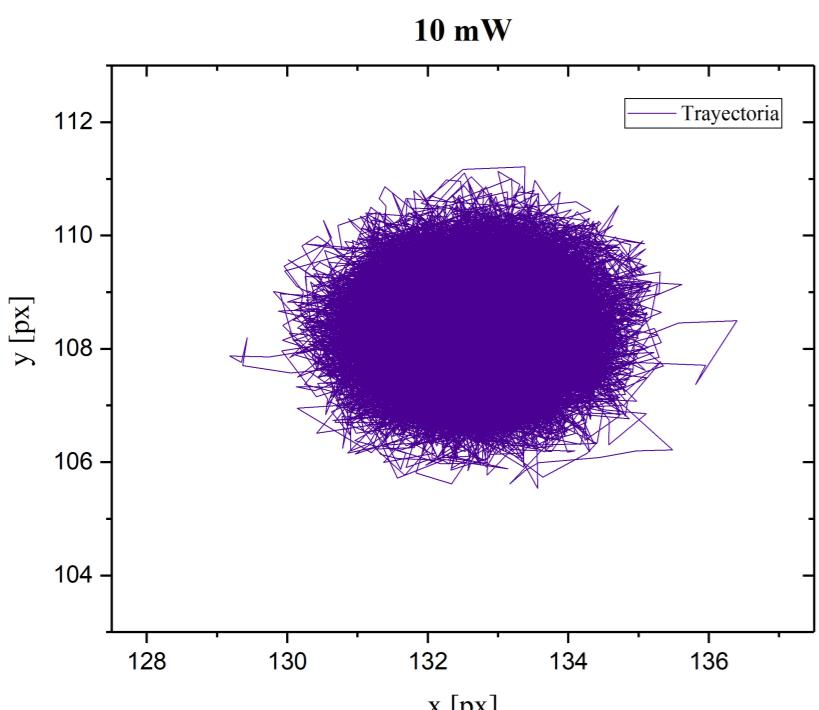


Figure 2: Trayectoria de partícula de sílice a 10 mW

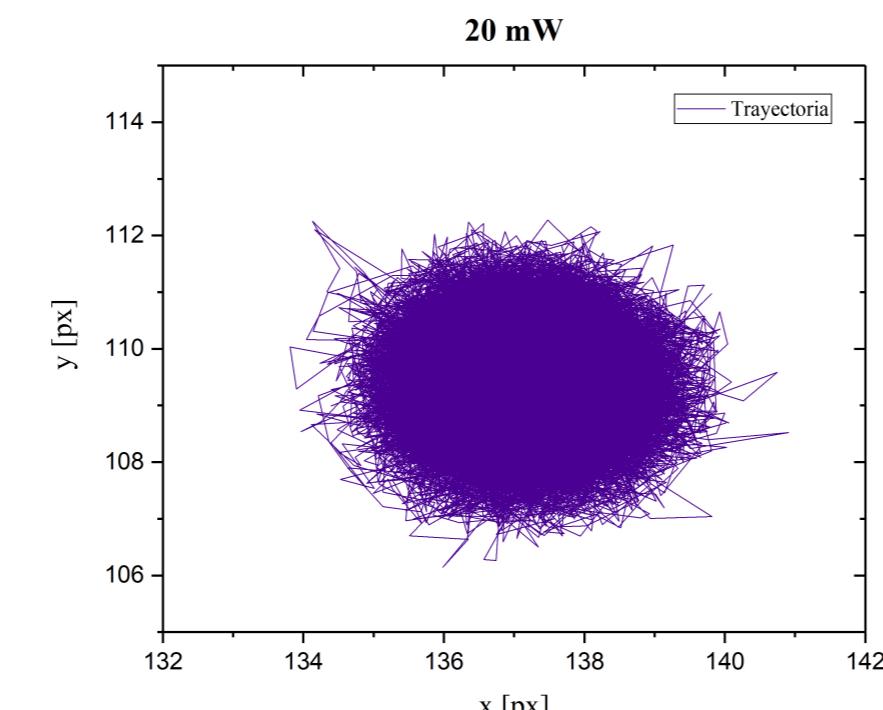


Figure 3: Trayectoria de partícula de sílice a 20 mW

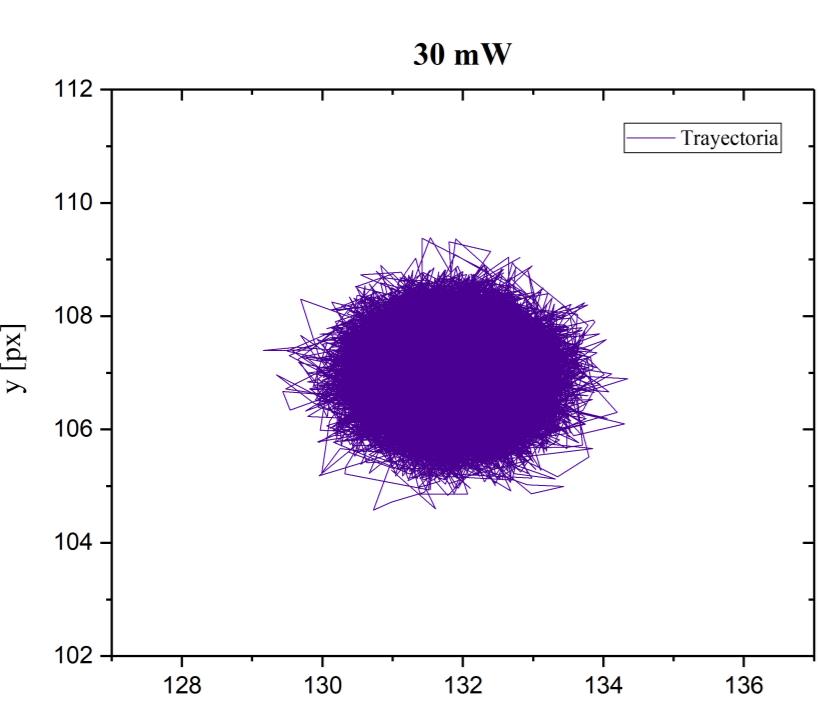


Figure 4: Trayectoria de partícula de sílice a 30 mW

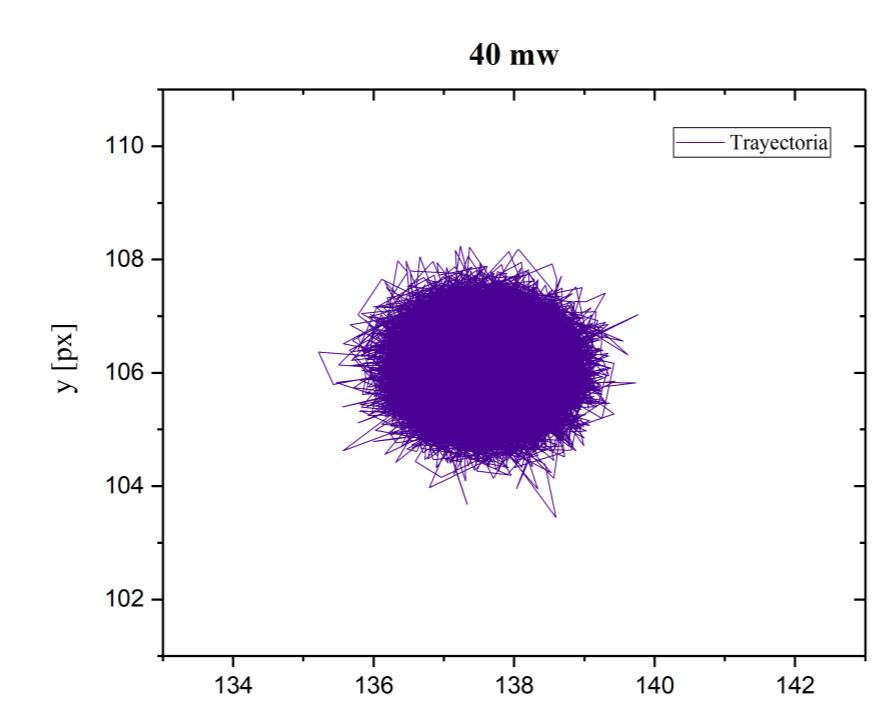


Figure 5: Trayectoria de partícula de sílice a 40 mW

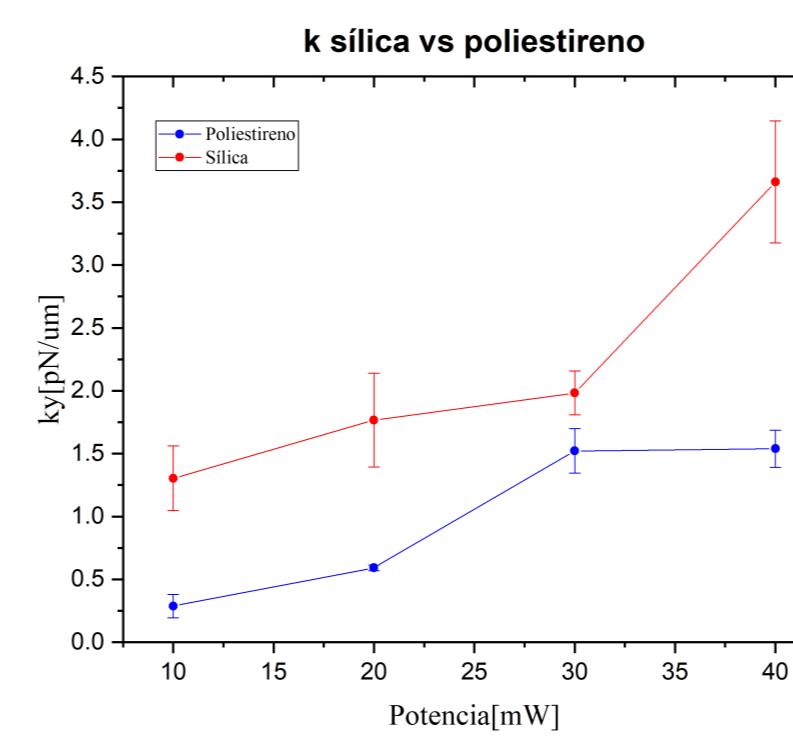


Figure 6: Comparación constantes de rigidez de partículas

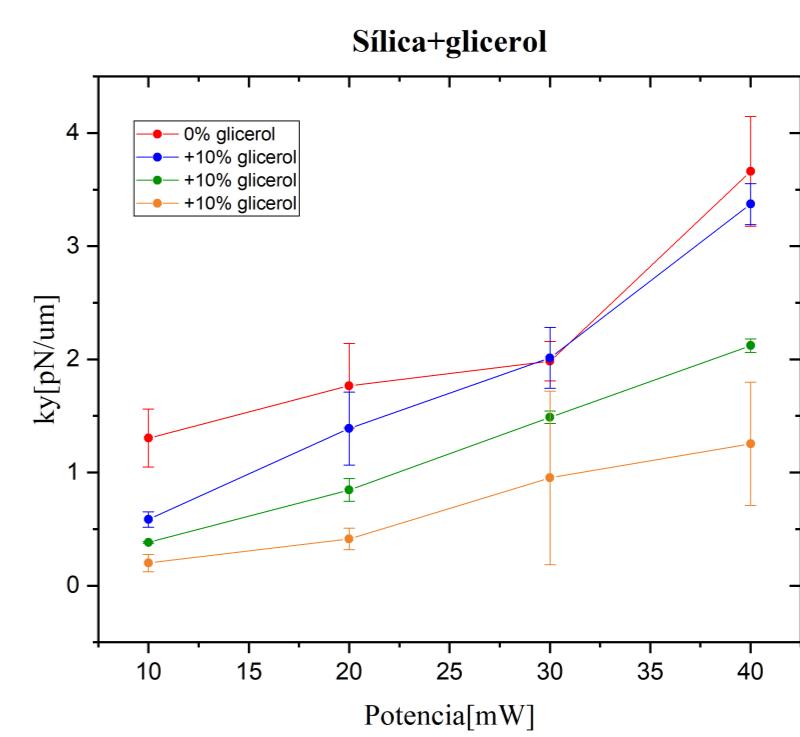


Figure 7: Relación κ de sílice vs potencia láser

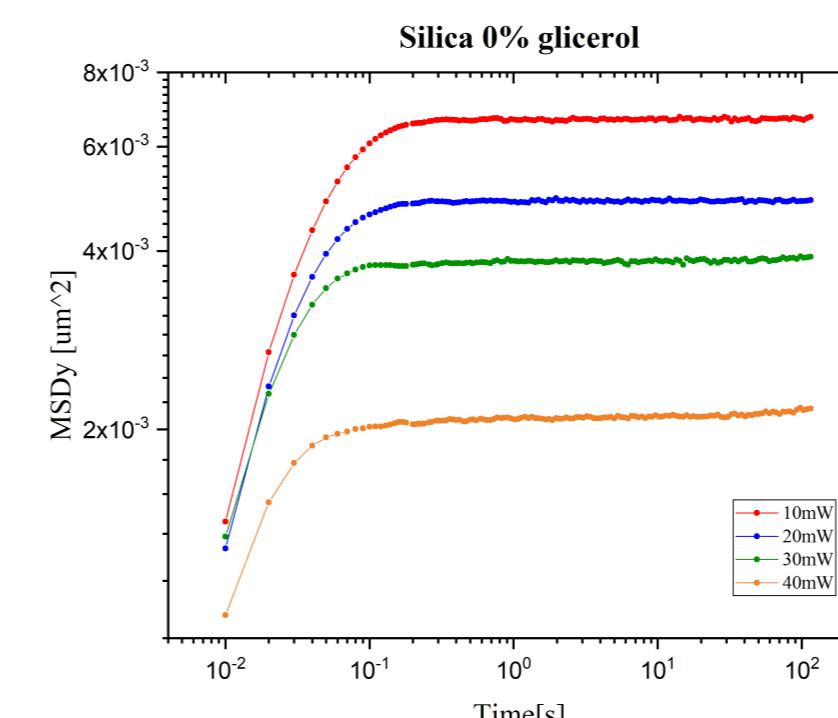


Figure 8: Relación κ de poliestireno vs potencia láser

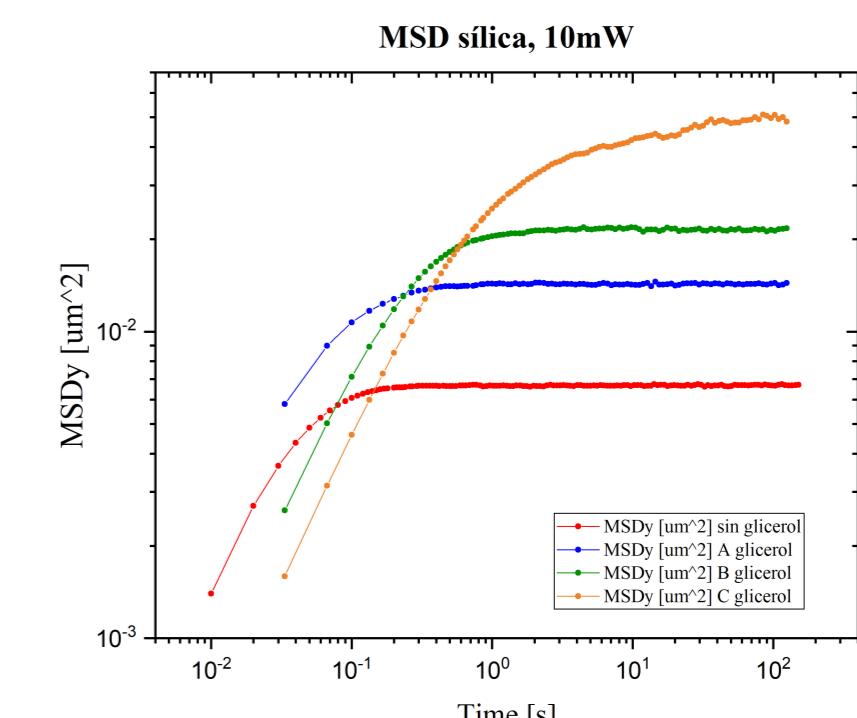


Figure 9: MSD de sílica a 10 mW

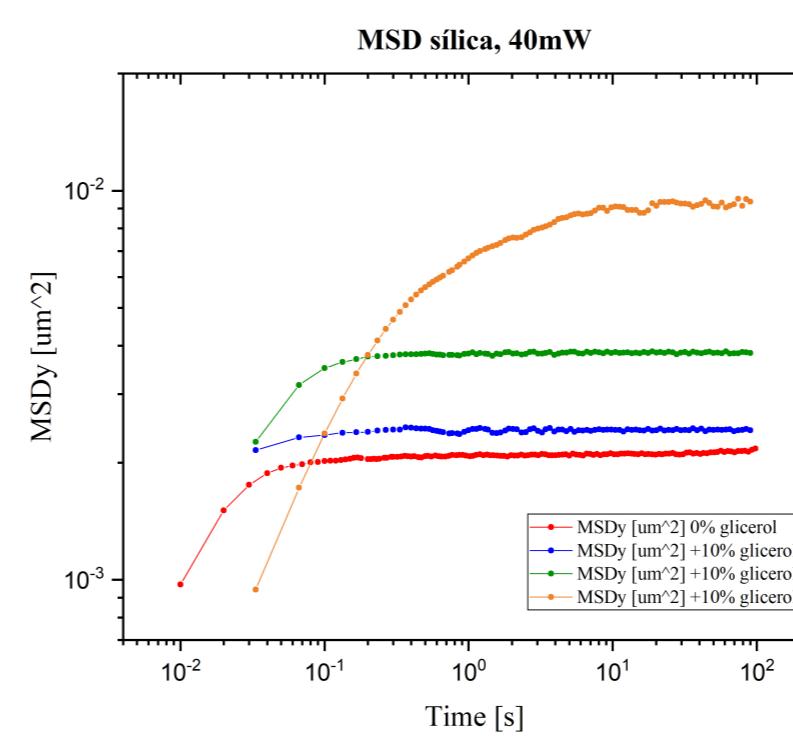


Figure 10: MSD de sílica a 40 mW

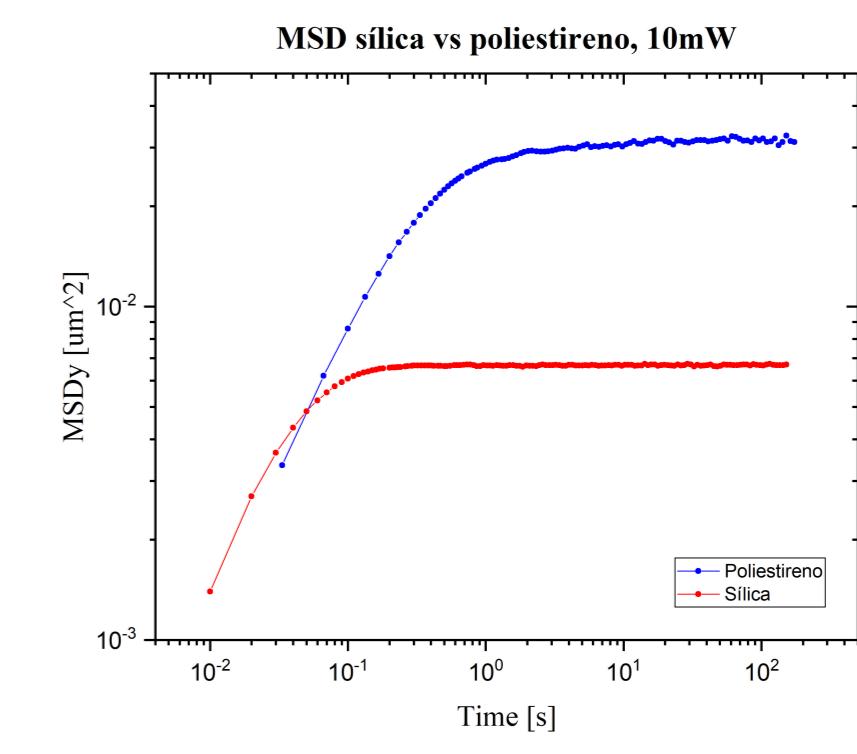


Figure 11: Comparación MSD sílica/poliestireno a 10 mW

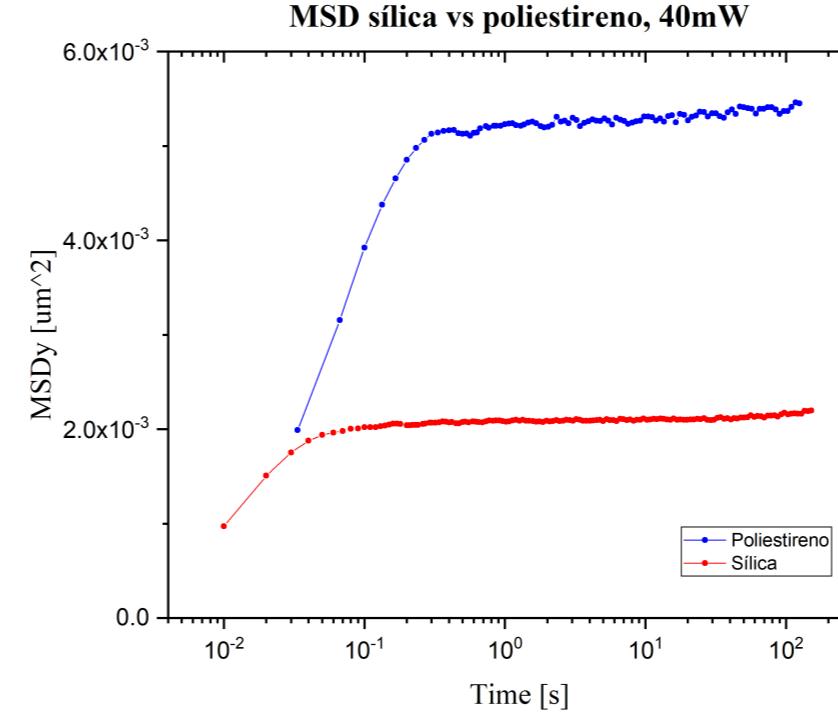


Figure 12: Comparación MSD sílica/poliestireno a 40 mW

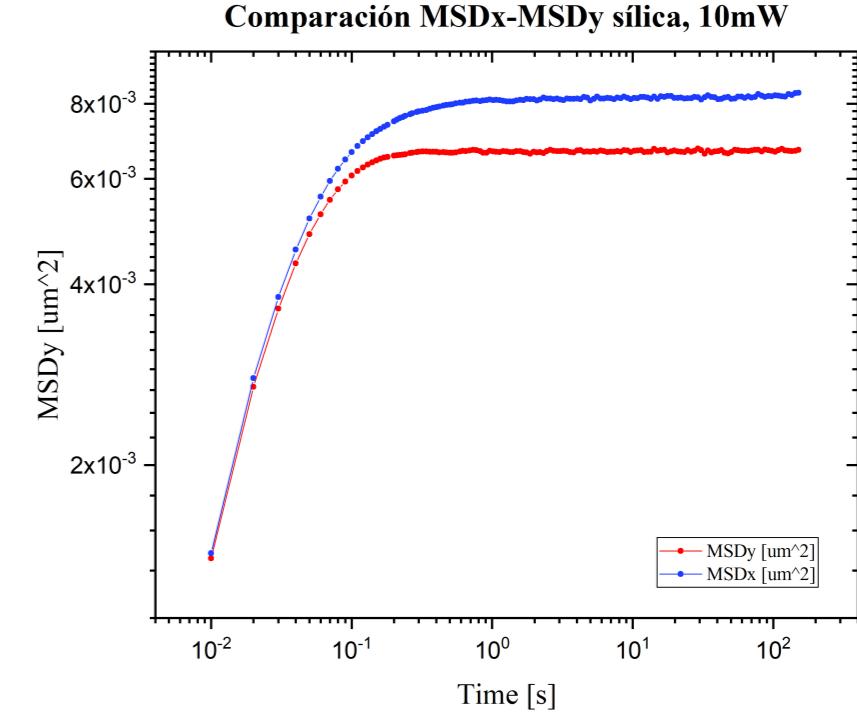


Figure 13: Comparación MSD de sílica (eje X vs Y)

% Glicerol	n_m
0%	1.333
10%	1.3516
20%	1.366
30%	1.377

Table 1: Índice de refracción vs concentración de glicerol

Conclusiones

Los resultados validan el modelo teórico de pinzas ópticas, mostrando que la constante de rigidez (κ) aumenta con la potencia láser y varía según el contraste de índices de refracción (n_p/n_m), como predice la ecuación 2. Los valores de κ (del orden de **pN/ μm**) son consistentes con sistemas microscópicos en equilibrio térmico, confirmando el comportamiento armónico de las partículas atrapadas. Las diferencias observadas entre materiales (sílice vs poliestireno) y con la adición de glicerol demuestran la sensibilidad del método para caracterizar sistemas micrométricos.

References

- [1] Ashkin, A. (1997). *Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers*. PNAS, 94(10), 4853-4860.
- [2] Berg-Sørensen, K., & Flyvbjerg, H. (2004). *Power spectrum analysis for optical tweezers*. Review of Scientific Instruments, 75(3), 594-612.
- [3] Neuman, K. C., & Block, S. M. (2004). *Optical trapping*. Review of Scientific Instruments, 75(9), 2787-2809.
- [4] Zhang, H., et al. (2020). *Optical tweezers in single-cell analysis*. ACS Nano, 14(4), 3781-3792.
- [5] Waigh, T. A. (2005). *Microrheology of complex fluids*. Reports on Progress in Physics, 68(3), 685-742.