



Transición de fase líquido-sólido 2D en coloides paramagnéticos

Arely Durán Ramírez, Emilio Toledo Espinoza, Sarahí Becerra Camarena, Erick Sarmiento Gómez

¹ División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato

E-mails: e.sarmiento@fisica.ugto.mx, fa.duranramirez@ugto.mx, e.toledo.espinoza@ugto.mx, mfs.becerracamarena@ugto.mx



Resumen

En este trabajo, implementamos un arreglo óptico con el cual fuimos capaces de observar la transición líquido-sólido en un sistema quasi 2D de partículas coloidales paramagnéticas. Las partículas contienen material paramagnético, que mediante la aplicación de un campo magnético externo, se les induce un momento magnético en éstas. El campo magnético es generado por una bobina de cobre donde fluye una corriente eléctrica, así generando un campo magnético uniforme y constante. La interacción dipolar magnética en las partículas permite que se reorganicen por su repulsión, formando estructuras que conducen a la transición de fase líquido-sólido. Reproducimos el experimento con distintas intensidades de corriente eléctrica, apreciando las variaciones estructurales y dinámicas del sistema conforme modulábamos dicha variable.

Consideraciones preliminares

En la elección de partículas paramagnéticas, revisamos en las opciones que tiene Thermo Fisher Scientific; en nuestras consideraciones a trabajar en el proyecto, dentro de la lista a elegir, era partículas que sí tenían un núcleo con material magnético, pero sus caracterizaciones estaban más orilladas a estudios biológicos y químicos de compuestos. Decidimos por las partículas Dynabeads MyOne Carboxylic Acid de 1 μm de diámetro, de este mismo laboratorio, ya que por los grupos de ácido carboxílico en la superficie de las cuentas y la superficie hidrofílica contribuye a que estén funcionalizadas para una muy baja sedimentación, con una baja unión entre éstas y fácilmente dispersivas. Asimismo, consultamos artículos donde se trabajó con partículas de características similares e igualmente estudiaran las transiciones líquido-sólido en un sistema quasi 2D (Ebert et al., 2009)^[1]. En éste se desarrolla la relación entre la energía magnética de las partículas y la energía *térmica* de las mismas; el concepto relacionado a la temperatura de las partículas en la variable gamma (Γ) hace alusión a una preconcepción de materiales líquidos y sólidos y el ordenamiento de las estructuras internas en función de la temperatura de ellas, que define si están más dispersas o condensadas en su volumen, y este trabajo, con el entendimiento de dicho ordenamiento estructural, se refiere cuánta energía *térmica* requiere el sistema para transicionar de líquido a sólido bajo un campo magnético uniforme, resultando un valor adimensional. De esta relación estimamos el número de vueltas para el embobinado mínimo necesario para que suceda la transición líquido-sólido.

$$\Gamma = \frac{E_{mag}}{k_b T} = \frac{\mu_0^3 \chi^2 \left(\frac{I^2 N^2}{4r^2}\right) (\pi\rho)^{3/2}}{4\pi K_b T} \quad (1)$$

Donde:

μ_0 : permeabilidad magnética del vacío.

k_b : constante de Boltzmann.

T : temperatura del medio.

χ : susceptibilidad magnética por partícula

I : intensidad de corriente eléctrica.

N : número de vueltas de embobinado.

ρ : concentración de partículas.

Arreglo experimental



Fig. 8 Diseño de impresión 3D de la bobina, con un radio $r=10\text{cm}$.

Se visualizó por medio de videomicroscopía, la transición líquido-sólido de nuestras partículas paramagnéticas, para esto fue necesario elaborar un arreglo óptico que nos permitiera generar una imagen de las partículas de 1 μm de diámetro. Así como diseñar un modelo 3D de una bobina circular Fig. 8 ; se imprimió la bobina con una impresora 3D.

Una vez teniendo en cuenta las medidas necesarias del camino óptico (observe la Fig.9) para producir una imagen adecuada, se procedió a montar el arreglo experimental mostrado en la Fig. 10. El cual consta de una lámpara que incide luz sobre nuestra muestra, la cual a su vez está inmersa en un campo magnético producido por la bobina alimentada por una fuente de voltaje. El objetivo de microscopio 100x amplifica la imagen, la cual es redirigida por un espejo que se colocó formando un ángulo de 45° con la normal, hacia una lente, que a su vez produce imagen a la distancia que se encuentra la cámara, mediante la computadora observamos y grabamos la suspensión coloidal. Para preparar la muestra fue necesario tomar de un frasco de partículas paramagnéticas 0.4 μl de partículas previamente mezcladas y 0.2 μl de agua y agitamos la solución, la vertimos en el portaobjetos y tapamos con el cubreobjetos, ambos lavados con anterioridad. Es importante que la altura de la muestra sea de 3 μm , para obtener un sistema quasi 2D.

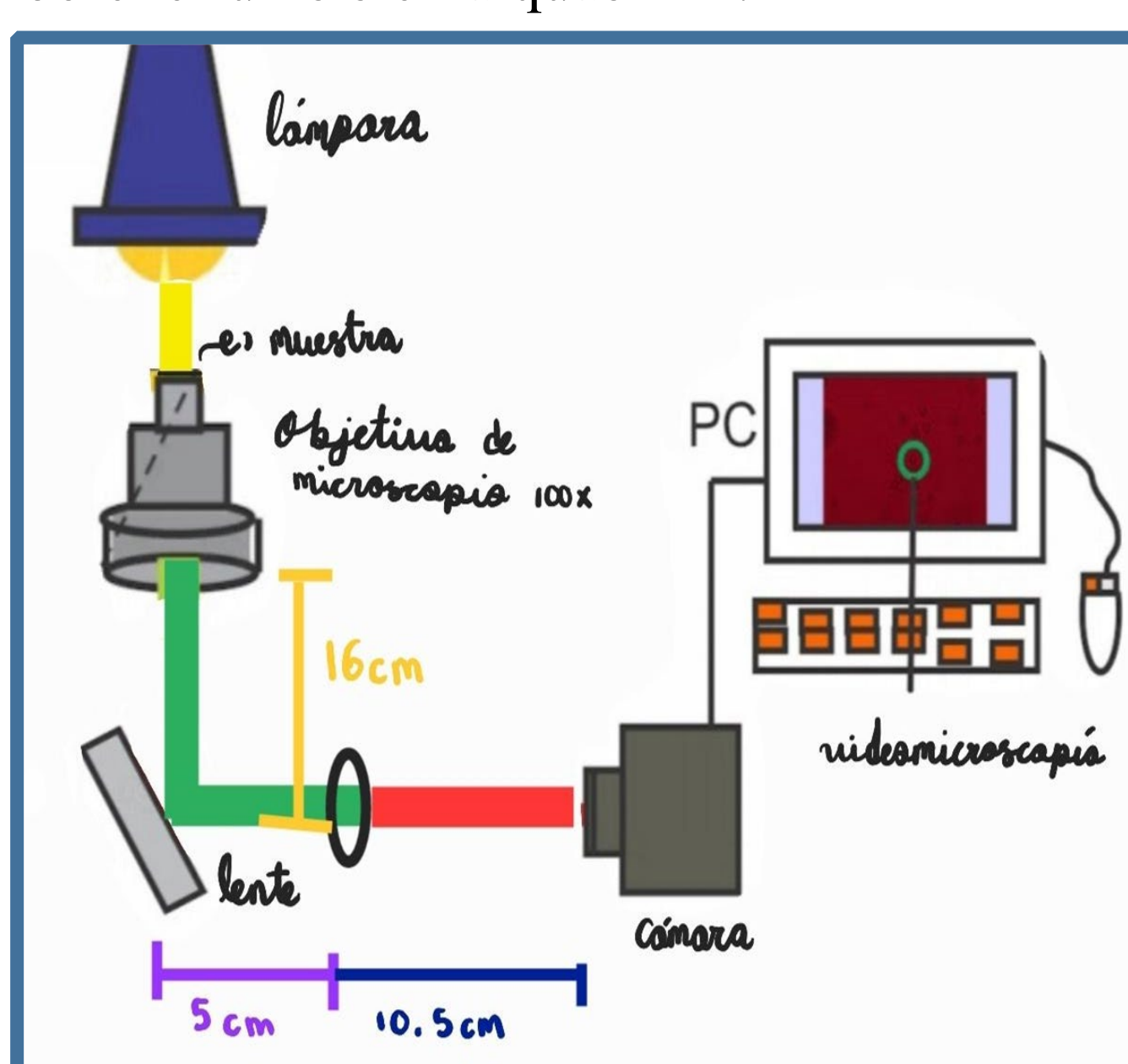


Fig. 9 Camino óptico utilizado para obtener videomicroscopía.

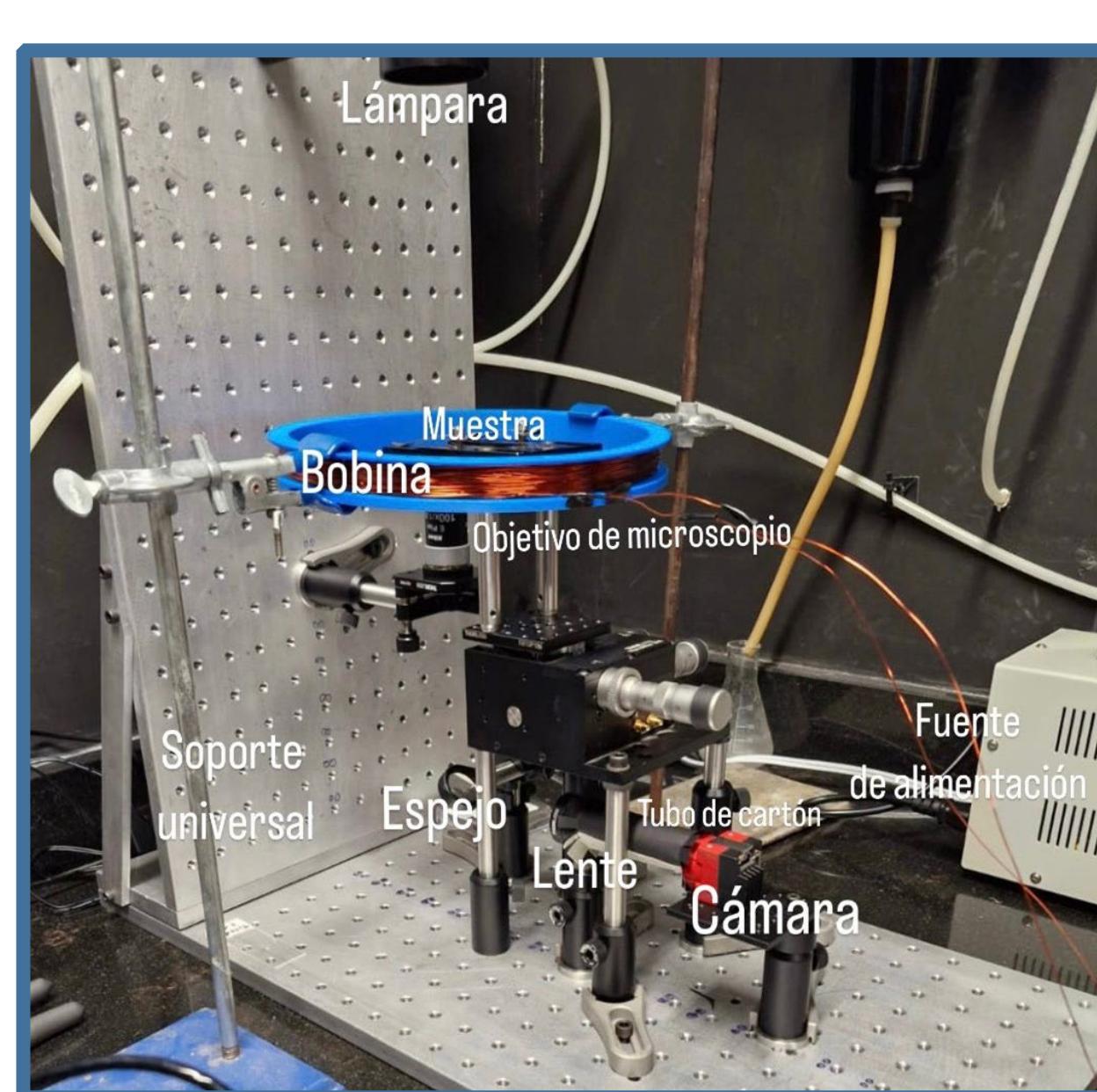


Fig. 10 Fotografía del arreglo óptico laborado.

Resultados y discusión

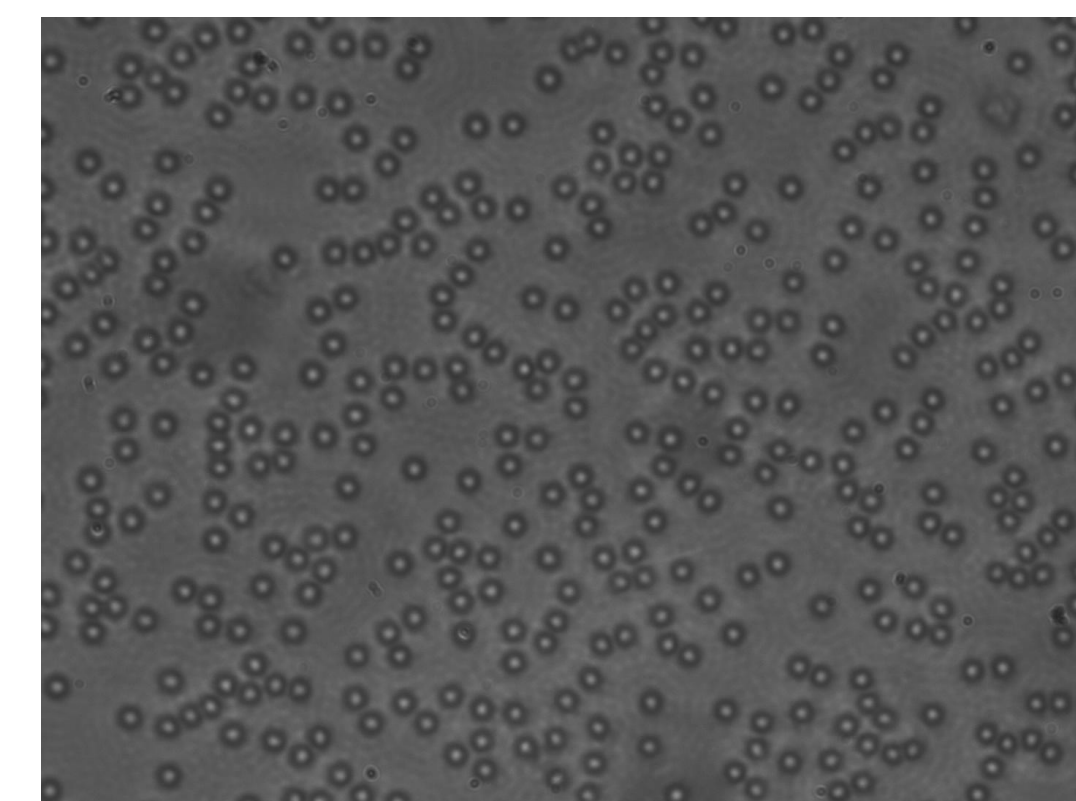


Fig. 1 : Sistema quasi 2D de partículas paramagnéticas observadas al microscopio sin corriente eléctrica.

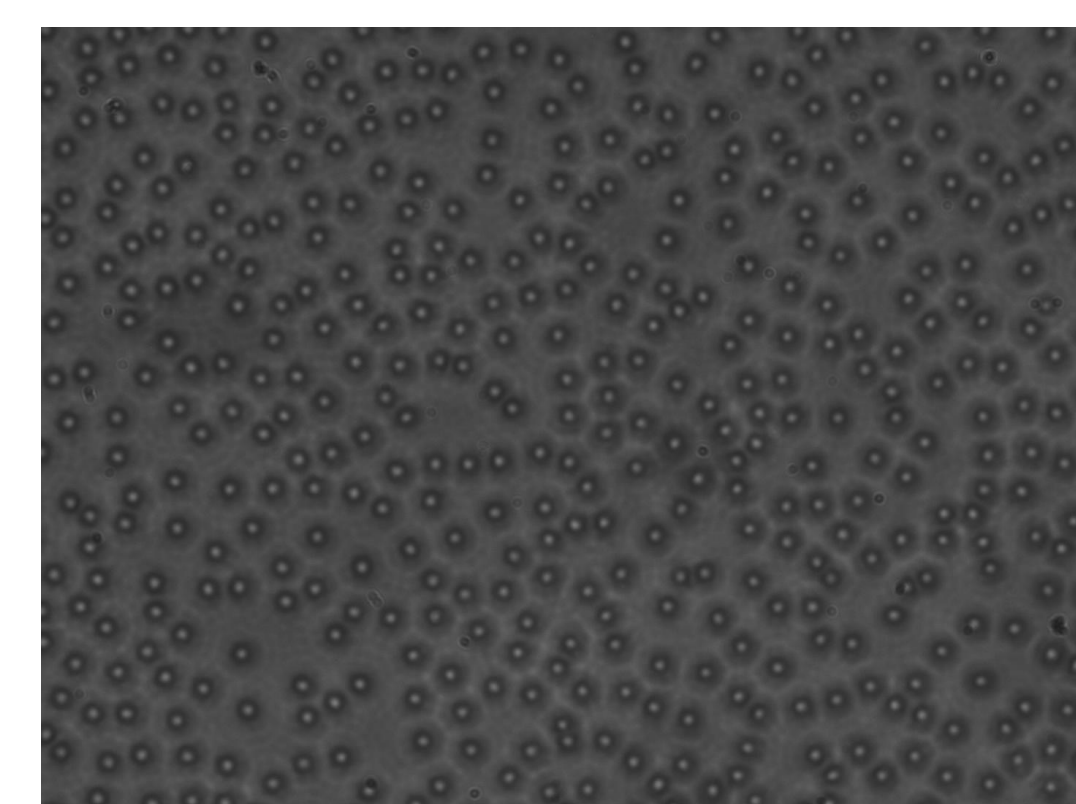


Fig. 2 : sistema quasi 2D de partículas paramagnéticas observadas al microscopio con 1 A.

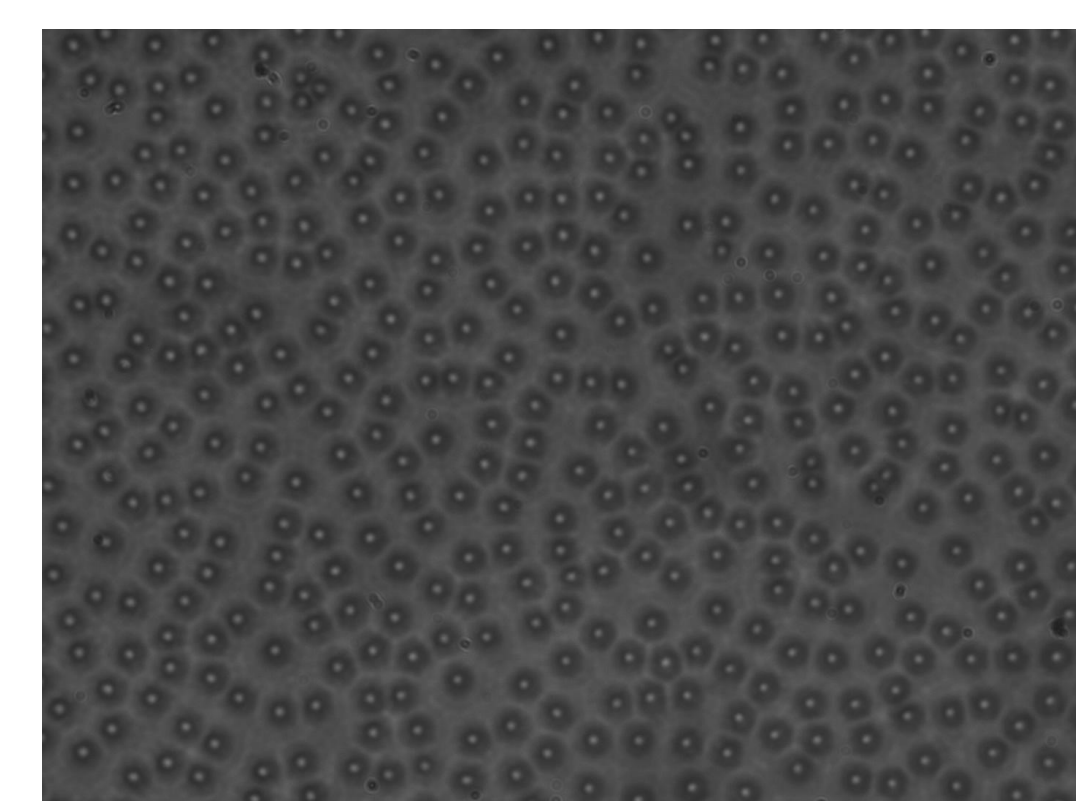


Fig. 3 : sistema quasi 2D de partículas paramagnéticas observadas al microscopio con 2 A.

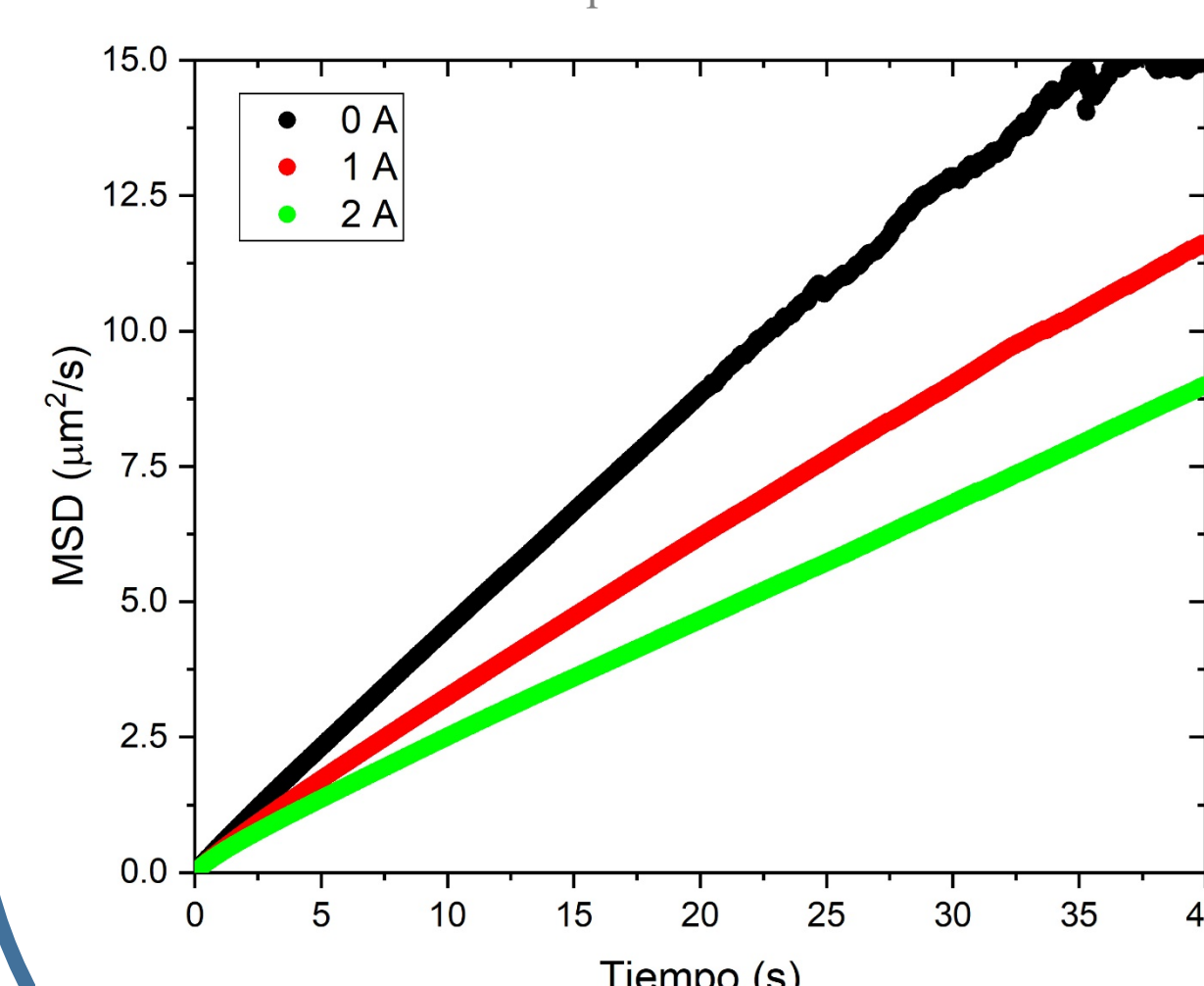


Fig. 7 Desplazamiento cuadrático medio de las partículas sin corriente eléctrica, 1 A y 2 A.

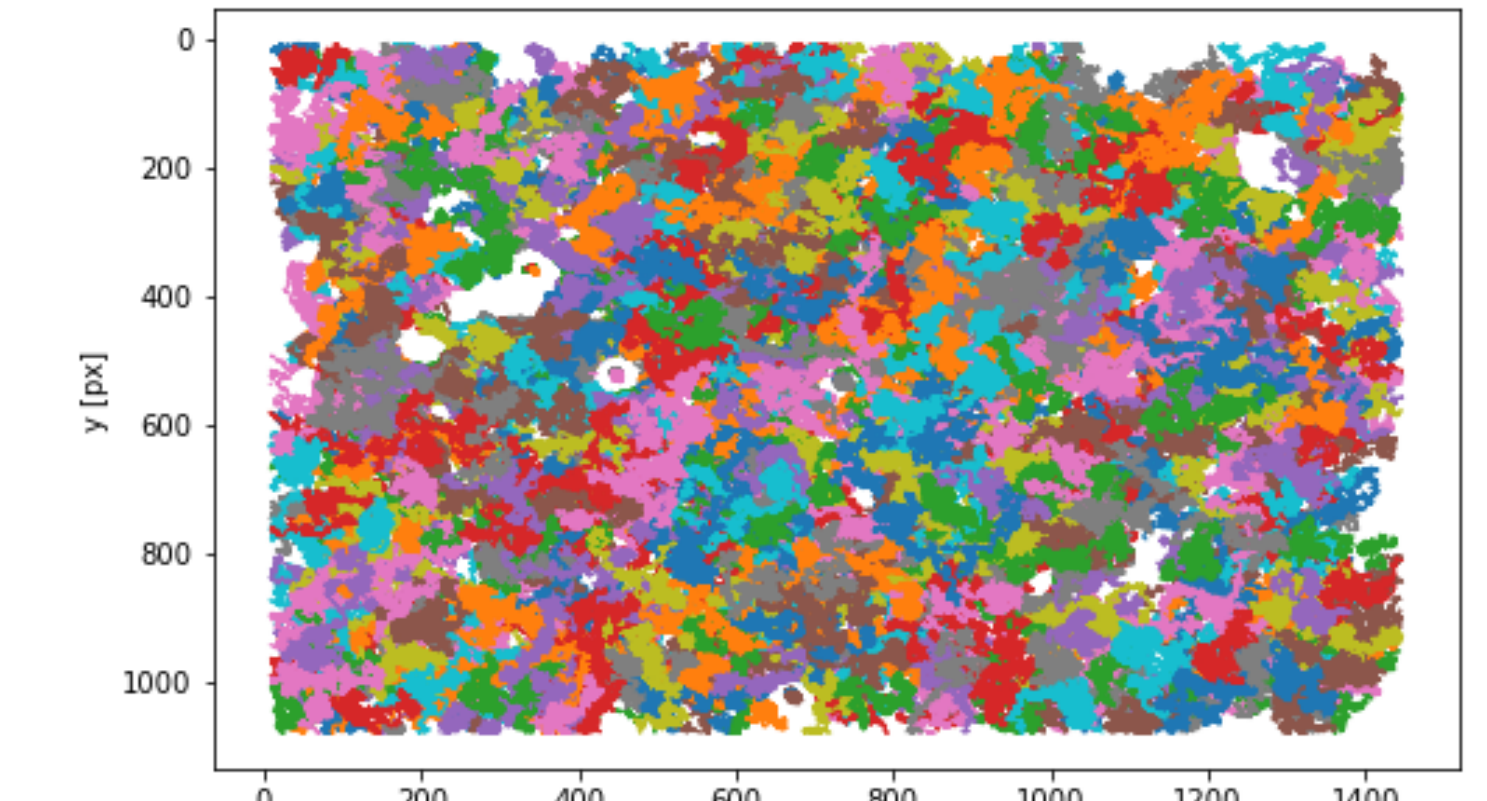


Fig. 4 : gráfica de la trayectorias 2D de cada partícula en la sección observada sin corriente eléctrica.

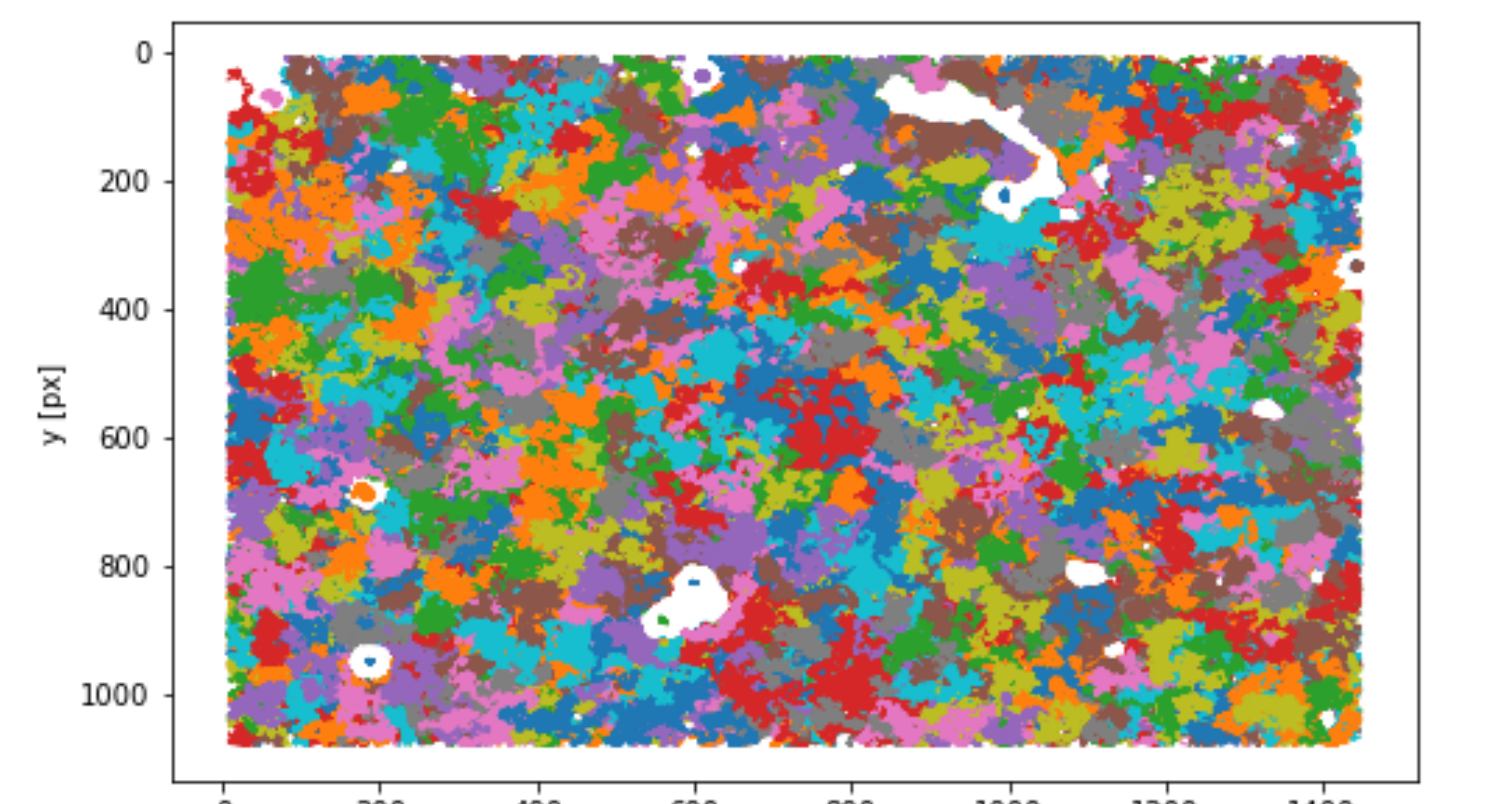


Fig. 5 : gráfica de la trayectorias 2D de cada partícula en la sección observada con 1 A.

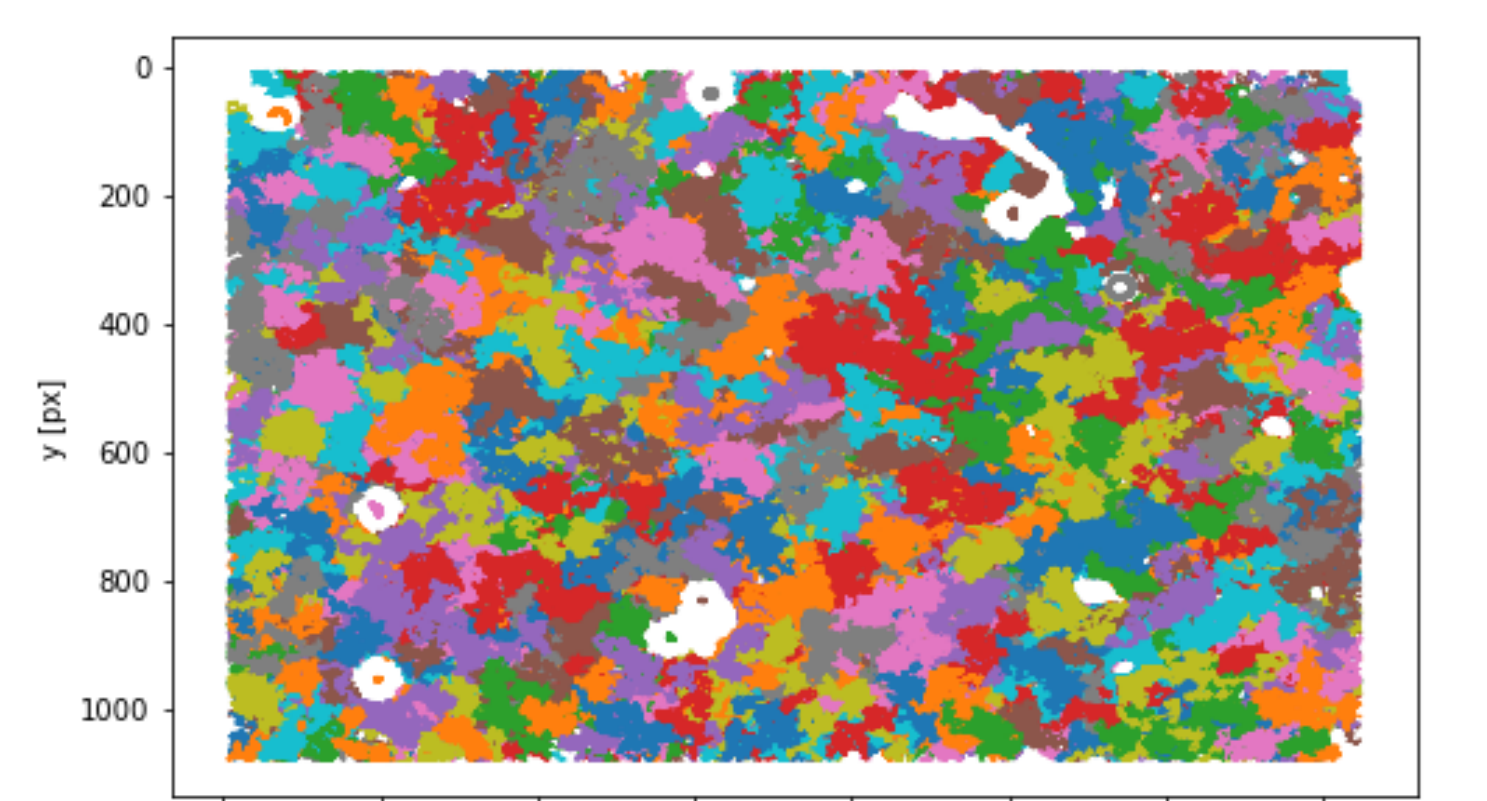


Fig. 6 : gráfica de la trayectorias 2D de cada partícula en la sección observada con 2 A.

Claramente observamos la interacción repulsiva entre las partículas provocado por el cambio del momento magnético de éstas al someterlas a un campo magnético. A mayor campo magnético, la repulsión entre partículas aumenta, produciendo un ordenamiento estructural como consecuencia de minimizar la energía total del sistema. Así mismo la dinámica de las partículas se reduce considerablemente al aumentar la repulsión

Perspectivas

El proyecto puede ser amplificado con un cálculo más preciso de la susceptibilidad magnética de las partículas y un análisis topológico de los polígonos de Voronoi, es decir el polígono que forma una partícula y sus vecinos al solidificarse o cristalizarse. Podemos mejorar el arreglo añadiendo más bobinas para intensificar el campo magnético. Se plantea que estos proyectos serán abordados próximamente.

Conclusiones

Cuando incidimos un campo magnético en un sistema quasi 2D de partículas coloidales paramagnéticas, dichas partículas se reorganizan generando una transición de fase. Se pudo observar cualitativamente las predicciones del parámetro gamma Γ . Al aumentar la corriente eléctrica se intensifica el campo magnético, lo que genera una mayor repulsión entre las partículas paramagnéticas y el desplazamiento cuadrático medio de las partículas es menor.

Bibliografía

- [1] Ebert, F., Dillmann, P., Maret, G., & Keim, P. (2009). The experimental realization of a two-dimensional colloidal model system. *Review Of Scientific Instruments Online/Review Of Scientific Instruments*, 80(8). <https://doi.org/10.1063/1.3188948>
- [2] Pérez-Guerrero, D., Morales-Cruzado, B., Guerrero-García, G. I., & Sarmiento-Gómez, E. (2024). On the Brownian motion of a colloid trapped in optical tweezers: Experiments and simulations. *American Journal Of Physics*, 92(4), 290-298. <https://doi.org/10.1119/5.0077571>
- [3] *An Introduction to Dynamics of Colloids*. (s. f.). Elsevier Shop. <https://shop.elsevier.com/books/an-introduction-to-dynamics-of-colloids/dhont/978-0-444-82009-9>
- [4] Dillmann, P., Maret, G., & Keim, P. (2012). Comparison of 2D melting criteria in a colloidal system. *Journal Of Physics. Condensed Matter*, 24(46), 464118. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/24/46/464118>