

La auto-organización: el proceso hacia el orden natural

Elías A. Cobá-Pacheco^{1,*}, Yuliana A. Molina-Cortés², Ángel A. Ayala-Ramos¹, Omar A. Quijano-Briceño³, O. Carvente-Muñoz⁴

¹Escuela Preparatoria No. 2, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

²Preparatoria Estatal No. 8, Carlos Castillo Peraza, Mérida, Yucatán, México.

³Colegio de Bachilleres del Estado de Yucatán, Plantel Progreso, Progreso, Yucatán, México

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Avenida de industrias no contaminantes y periférico norte s/n. Mérida, Yucatán, México.

Fecha de recepción: 01 de marzo de 2018 – Fecha de aprobación: 31 de julio de 2018

RESUMEN

La auto-organización es un proceso mediante el cual los sistemas constituidos por partículas discretas, como nanopartículas, moléculas o materiales granulares, etcétera, pasan de estados desordenados a ordenados sin necesidad de la intervención humana, motivo por el cual se le puede identificar como el proceso hacia el “orden natural”. Partículas disipativas de tamaño milimétrico, comúnmente denominadas partículas no-Brownianas (granulares), el ADN (Ácido Desoxirribonucleico) y la estructura de la piel de los camaleones (cambios estructurales producen los cambios de color que se observan), son ejemplos de sistemas que, bajo ciertas condiciones, pueden auto-organizarse. Estar conscientes de la auto-organización propone nuevas fronteras al conjunto de saberes establecidos a lo largo de los siglos, suponiendo teorías que podrían llegar a complementar los hechos fundamentales de lo que hemos logrado comprender, generando así una ola de nuevos conocimientos para la humanidad.

Palabras clave: auto-organización, esferas no-Brownianas, Kepler, cristales fotónicos.

Self-assembly: the process to natural order

ABSTRAC

Self-assembly refers to the spontaneous organization of discrete particles, a lot of systems like atoms, molecules or granular matter, they are susceptible to a disorder-order structural changes without human intervention, reason for which self-assembly can be recognized as the process to reach the ‘natural order’. Dissipative millimeter-sized particles, commonly called non-Brownian particles (grains), DNA (deoxyribonucleic acid) and the structured skin of chameleons (reversible structural changes produces the change of color), are examples of system that, under the correct conditions, could self-organize. Be conscious about self-assembling proposes new borders to the set of knowledge established over the centuries, assuming theories that could complement the fundamental facts of what we accomplished to understand, being a whole new wave of cognizance.

Keywords: self-assembling, non-Brownian spheres, Kepler, photonic crystals.

*eliascoba_prepa2@outlook.com

Nota: Este artículo de divulgación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 22, No. 2, 2018, ISSN: 2448-8364.

INTRODUCCIÓN

Imaginemos por un momento que nuestros ojos son capaces de ver la estructura de la materia que nos rodea, es decir, son capaces de apreciar con detalle la posición tridimensional que cada átomo ocupa en la materia. Ahora bien, ¿qué observaríamos? ¿Acaso patrones repetitivos de las posiciones de los átomos, o simplemente átomos en posiciones aleatorias? Muchos investigadores (desde los antiguos filósofos griegos) se han planteado preguntas similares, lo que los ha llevado a desarrollar experimentos y proponer teorías que les permitan comprender fenómenos físicos y adentrarse en las diferentes formas, patrones y estructuras en las que se organiza la materia.

Precisamente, la auto-organización, presente en prácticamente todas las escalas (Lash et al. 2015; Von Freymann et al. 2013; Grzybowski et al. 2009), es un fenómeno que mediante su estudio puede llevarnos a responder las preguntas inicialmente planteadas. Una forma sencilla de describir la auto-organización es hablar de un sistema donde sus componentes pasan espontáneamente de un estado desordenado a uno ordenado, sin la necesidad de la intervención humana o instrucciones externas (Ozin et al. 2009), por estas dos últimas razones es que lo podemos considerar como un “orden natural”. Curiosamente, la auto-organización puede ocurrir en sistemas tanto orgánicos como inorgánicos (Grzybowski et al. 2009).

Los sistemas auto-organizados están presentes en muchos lugares, por ejemplo, pueden ser observados en el interior de nuestro cuerpo, en los ribosomas (Ban et al. 2000) o en el ADN. También tienen lugar en la manera en la que acomodamos un grupo de objetos esféricos como dulces o canicas, de tal forma que podamos acomodar la mayor cantidad en el menor espacio (Carvente y Ruiz 2005). Algunos de los ejemplos más atractivos que podemos observar en la naturaleza son el

enigmático “cambio de color” del camaleón (Teyssier et al. 2015) y la iridiscencia en las alas de algunas especies de mariposas (Mika et al. 2012), aves (Von Freymann et al. 2013), entre otros.

En el presente trabajo se expondrá parte del conocimiento que se tiene sobre qué es y cómo ocurre la auto-organización, profundizando principalmente en la auto-organización de sistemas de esferas no-Brownianas, el cual servirá como ejemplo para abordar características generales de los sistemas auto-organizados. Igualmente se hablará de algunos ejemplos como el origen del “cambio de color” en el camaleón y los cristales fotónicos.

Este trabajo está dirigido a personas interesadas en el estudio de la auto-organización, para las cuales tendrá una función introductoria antes de adentrarse en la revisión de la literatura especializada sobre el tema. Por otra parte, también está pensado para aquellos interesados en conocer más sobre los fenómenos físicos en la naturaleza, por lo que se abordan conceptos con algunas analogías de la vida cotidiana, sin embargo, la variedad de ideas podría hacer sentir la lectura un poco pesada; a pesar de esto, aseguramos que al terminar el lector se irá con algunos conocimientos interesantes para compartir.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

A continuación, se explicarán los conceptos básicos que facilitarán la comprensión de los temas abordados, principalmente en la sección 4. Esto será llevado a cabo de una manera sencilla, y siempre manteniendo la idea central que se explica en un contexto técnico. Tales conceptos son: espacio fase, entropía, arreglos o estructuras cristalinas, movimiento Browniano y no-Browniano, etcétera.

- En primer lugar, el espacio fase es un espacio abstracto útil para determinar los estados accesibles de un sistema. Imagine un conjunto de N partículas, para cada una de ellas

conocemos su posición y velocidad (tridimensional). Un posible estado del sistema queda determinado por los valores de posición y velocidad de las N partículas, así, un estado es un conjunto de $6N$ coordenadas, dicho conjunto se mapea al espacio fase como un punto, y el volumen V del conjunto de puntos en el espacio fase determina todos los estados accesibles. Por ejemplo, para una simple pelota que se encuentra estática, únicamente dispone de un solo estado, en cambio, si la pelota se puede mover en un espacio físico determinado su espacio fase aumenta, es decir, una pelota en movimiento tiene más estados accesibles (mayor espacio fase) que una pelota estática.

- Los componentes y/o partículas discretas, son conjuntos de objetos independientes sobre los cuales se tiene la posibilidad de distinguir unos de otros a pesar de ser semejantes. La materia granular (grava, arena o esferas, granos, etcétera) está conformada por partículas discretas.
- Como más adelante se verá en la definición de la auto-organización, en los sistemas auto-organizados se forman estructuras, arreglos o ensamblajes. La estructura BCT (del inglés Body Centered Tetragonal) y la estructura FCC (del inglés Face Centered Cubic) son dos estructuras cristalinas bastante comunes, si hablamos de esferas que se organizan de esta manera, su fracción de compactación es de 69% y 74% respectivamente (González 2014). Sin embargo, también se pueden encontrar otro tipo de estructuras de mayor complejidad, entre las cuales se puede mencionar a la doble hélice del ADN.
- El movimiento Browniano de una partícula susceptible a las fluctuaciones térmicas de su entorno, es el movimiento generado por la energía térmica, causado por las múltiples colisiones de los átomos en una sustancia. El nombre de “Browniano” proviene de Robert Brown, quien en 1828 observó el movimiento de un grano de polen en un contenedor lleno de agua. Lo que se considera no-Browniano es aquello donde las fluctuaciones térmicas o la

variación de la temperatura del sistema, no perturba el estado de movimiento de una partícula o componente; básicamente hablamos de objetos cuyo movimiento se ve restringido por una fuerza. Para entender más acerca de la dinámica de estas partículas y de los conceptos antes mencionados, si tuviéramos “ n ” partículas Brownianas y las comparáramos con “ n ” partículas no-Brownianas, las primeras tendrían una mayor entropía y, por lo tanto, un “espacio fase” mayor para organizarse, en cambio, el segundo grupo de partículas tendría un solo estado accesible debido a que están en reposo y su entropía sería cero. El concepto de entropía está relacionado con el espacio fase, así, a mayor volumen en el espacio fase (mayor número de estados accesibles) mayor es la entropía. En la última década del siglo XIX Ludwig Boltzmann (Halliday et al. 2001) propuso una elegante expresión matemática para determinar la entropía: $S = k_B \ln(\Omega)$, donde S es la entropía, k_B es la constante de Boltzmann y Ω es el número de estados accesibles del sistema en el espacio fase.

¿QUÉ ES LA AUTO-ORGANIZACIÓN?

Ha tomado un largo tiempo que la comunidad científica pudiese llegar a un consenso sobre qué es “auto-organización”, principalmente debido a los múltiples sistemas donde el proceso parecía estar presente, abarcando las disciplinas de física, química y biología. En la introducción se mencionó que era un fenómeno donde los componentes de un sistema pasan de un estado desordenado a uno ordenado, pero esta concepción resulta incompleta, además de que no permite distinguir, ni clasificar como es debido, lo que podría llevarnos a la incomprensión de este interesante fenómeno; por otra parte, sería una manera aparente de violar la segunda ley de la termodinámica.

Una manera correcta de entender la auto-organización es pensar en ella como la espontánea formación autónoma de

estructuras o patrones de muchos componentes discretos que interactúan unos con otros (Whitesides y Grzybowski 2002; Grzybowski et al.2009). Es importante remarcar que las estructuras deben presentar una forma espacio/temporal ordenada y bien definida, donde cada una de las componentes toma lugar en ubicaciones específicas, establecidas en el medio al que están sujetas y con el que comparten una influencia mutua (sus interacciones).

En la naturaleza podemos encontrar gran diversidad de formas geométricas y estructuras, y aunque lo parezcan, estas no siempre son ejemplos de auto-organización. Hablamos de algunos casos como los hexágonos en los panales, la forma de los ríos y de los pétalos de algunas especies de rosas; o fenómenos en medios continuos como la formación de patrones Turing (Grzybowski et al.2009). Esto se debe porque en la descripción de cada uno de estos fenómenos, se desprecian las características individuales de las componentes del sistema.

La auto-organización como área de estudio tuvo su origen en la química orgánica, permitiendo comprender estructuras importantes en biología y sintetizar estructuras de mayor tamaño que el de moléculas (Whitesides y Grzybowski 2002). Justamente nuestro cuerpo resulta ser el mejor ejemplo de un sistema auto-organizado, teniendo en su interior una gran cantidad de estos sistemas relacionados jerárquicamente, los cuales presentan características como la capacidad regenerativa o adaptabilidad, que comúnmente son observables en nuestro día a día cuando tenemos una herida o estamos en crecimiento. Por su parte, los sistemas inorgánicos también presentan estas características destacadas y de igual manera se encuentran bajo el ojo crítico de muchos investigadores.

La auto-organización es un fenómeno que se presenta en todas las escalas, desde la molecular hasta la planetaria en sistemas

climáticos (Whitesides y Grzybowski 2002). Aunque un gran interés está centrado en el estudio de aquellos sistemas cercanos al tamaño de unos cuantos micrómetros, la investigación de sistemas macroscópicos es muy importante, ya que presenta la ventaja de que sus componentes son fácilmente observables y requieren de métodos menos complejos para la experimentación; sumado a lo anterior, en algunos casos es posible extender el conocimiento obtenido para la comprensión de sistemas microscópicos. Esta es la situación de un sistema macroscópico estudiado por investigadores de la Universidad Autónoma de Yucatán, CINVESTAV–Unidad Monterrey, ambos centros en México y la Université de Bourgogne, en Francia; un sistema de esferas no-Brownianas.

ESFERAS NO-BROWNIANAS, DULCES Y BALAS DE CAÑÓN

Un excelente modelo de un sistema de esferas no-Brownianas confinadas es el de un contenedor que tiene en su interior esferas metálicas, aunque suena algo difícil de imaginar, podemos compararlo con una caja llena de dulces esféricos (Figura 1), ya que presentan las mismas características que las cuentas metálicas, usadas en experimentos que varios investigadores llevaron a cabo para comprender la evolución de estos sistemas.

Para ampliar el entendimiento sobre la anterior analogía, retornaremos varios siglos en la historia. En el año 1611, en Inglaterra, cuando un par de matemáticos, entre ellos Kepler, se cuestionaron si apilar balas de cañón a manera de pirámide era el empaquetamiento más denso, es decir, si con esta organización podían transportar la mayor cantidad en el menor espacio posible. La respuesta afirmativa fue deducida por Kepler, con una idea tan sencilla, como la de los dulces, puesto que le bastó con ver la manera en que los frutereros acomodaban sus naranjas.

Esto dio inicio al estudio de la compactación de esferas duras iguales.

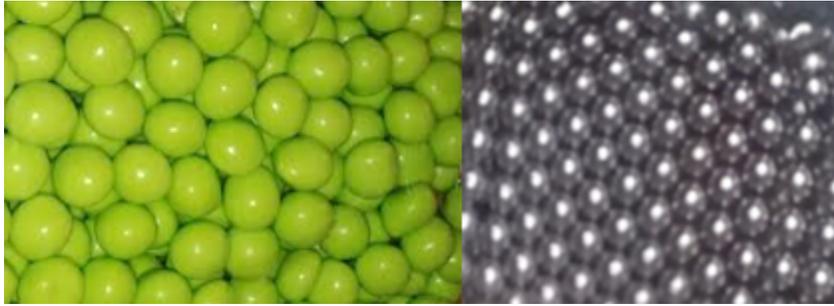


Figura 1. Una similitud fácil de visualizar, tanto las cuentas metálicas como los chocolates cubiertos de menta son esferas no-Brownianas, es decir, presentan la característica de ser partículas macroscópicas discretas y, a su vez, no cambian su estado de movimiento por fluctuaciones térmicas.

Aunque no estemos tan conscientes de ello, el estudio de la compactación es algo que todos realizamos en nuestras vidas en algún momento. Cada vez que necesitamos llevar más cosas en menor espacio, tratamos de pensar en la manera de ordenarlas que permita almacenar la mayor cantidad de determinados objetos, como lo hizo Kepler. En otros casos, inclusive cuando no conocemos el modo de ordenamiento más denso, recurrimos a hacer vibrar o agitar nuestro conjunto de objetos (sistema). Ingenieros y reposteros hacen esto con el concreto y la mezcla de pan respectivamente, para acomodar las sustancias y extraer el aire atrapado. Por su parte, los niños, cuando llenan las piñatas con dulces, al cabo de verter cierta cantidad parece llenarse cuando aún no se han metido todos, en respuesta a esto, ellos la agitan logrando aumentar la “fracción de compactación” de los dulces (Figura 2). Justamente esto último es lo que pasa con el sistema de esferas no-Brownianas cuando son sometidas a vibraciones verticales. Cuando vertemos las esferas dentro de un contenedor se encuentran en un empaquetamiento aleatorio no compacto (RLP, Random Loose Packing, con una fracción de compactación $\phi \approx 56\%$), tras ser agitadas pasan a un empaquetamiento aleatorio compacto (RCP, Random Close Packing, con una fracción de compactación $\phi \approx 64\%$), esto ya fue comprobado para esferas

duras en contenedores cilíndricos (Knight, et al. 1995).

Conscientes de lo anterior, los científicos se preguntaron si era posible inducir un sistema de esferas no-Brownianas, mediante un proceso de auto-organización, para alcanzar el mismo arreglo geométrico descrito por Kepler. La respuesta que encontraron fue afirmativa, pero para que esto sea posible, fue necesario que se cumplan tres condiciones para el sistema de esferas no-Brownianas. La primera es el confinamiento de las esferas en un contenedor que sea compatible con las dimensiones que ocupa la estructura cristalina deseada (criterio de conmensurabilidad). La segunda es el suministro controlado de energía al sistema mediante vibraciones periódicas externas, ya que las esferas no son susceptibles a fluctuaciones de energía térmica, además de que se mantienen en reposo por acción de la fuerza gravitacional. Y, por último, como en cualquier otro sistema auto-organizado es necesaria la presencia de las interacciones y fuerzas que actúan sobre los componentes: la fuerza de gravedad y colisiones inelásticas (como efecto de las vibraciones periódicas en el sistema); sumadas a las anteriores pueden ser introducidas en el sistema fuerzas cohesivas y electromagnéticas, que logran cambios significativos en las características del sistema.

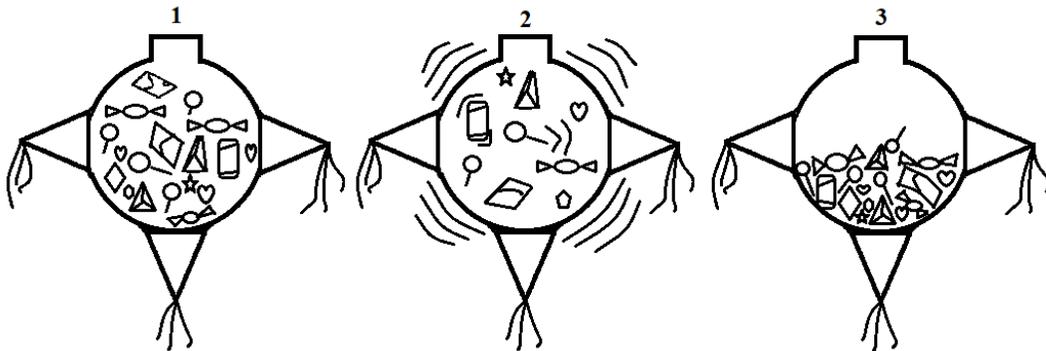


Figura 2. (1) Al introducir los dulces aleatoriamente se ocupa mayor espacio y se generan atascamientos (jamming). (2) Cuando se agita la piñata se suministra energía que logra aumentar el espacio fase de los dulces. (3) Esto les permite acceder a configuraciones más densas.

Cumpliendo dichas condiciones, en 2005, Carvente y Ruiz (2005) introdujeron el método de recocido vibracional para inducir al sistema de esferas no-Brownianas a auto-organizarse. En 1997 Pouliquen et al. (1997) propusieron un método denominado crecimiento epitaxial para inducir la cristalización de cuentas en sistemas abiertos, donde mientras el contenedor vibra las esferas son depositadas lentamente, así la

cristalización ocurre capa por capa. En cambio, en el recocido vibracional se trabaja con un sistema cerrado, donde las esferas que ya están depositadas en el contenedor son sometidas a una vibración vertical que aumenta su frecuencia y disminuye su amplitud a lo largo del tiempo (Figura 3), logrando un proceso similar al enfriamiento de un sistema térmico.

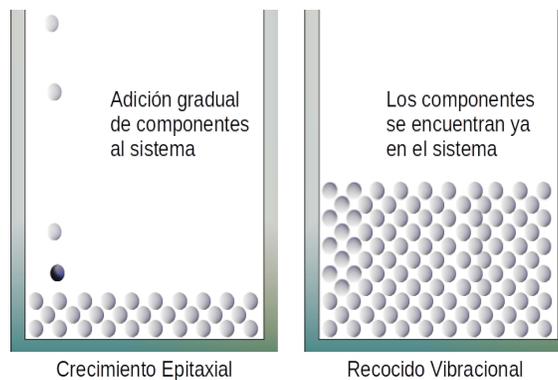


Figura 3. La diferenciación entre ambos métodos se basa meramente en el orden de adición de sus componentes.

A lo largo del recocido vibracional las esferas presentan comportamientos diferentes, que están estrechamente relacionados con las cantidades de energía suministrada mediante

las vibraciones y la capacidad disipativa del sistema. En una primera etapa, cuando la frecuencia es baja y la amplitud alta, el sistema se asemeja a un gas denso. Cuando la

frecuencia y la amplitud llegan a valores intermedios, las esferas actúan de forma análoga a las moléculas de un líquido en convección y circulan en el interior del sistema. Al final del recocido cuando la frecuencia es alta y la amplitud baja, el sistema se comporta como un sólido (Figura

4), la energía suministrada ya no es capaz de perturbar la posición de las esferas y sólo causa pequeñas oscilaciones alrededor de su posición de equilibrio, en este momento si el recocido vibracional se realizó adecuadamente el sistema se habrá cristalizado y alcanzado un estado de mínima energía.

Recocido vibracional en diferentes etapas

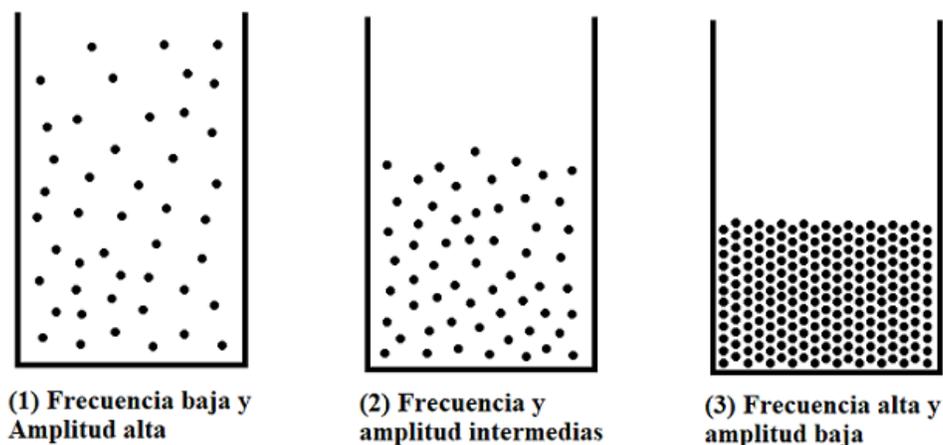


Figura 4. Analogía de las diferentes etapas del recocido vibracional: (1) gas denso, (2) líquido en convección y (3) sólido que oscila.

El sistema ha sido estudiado en contenedores de base rectangular, recipientes de base triangular y en cilindros, pero para este artículo sólo nos enfocaremos en los primeros. Curiosamente, cuando las esferas secas fueron sometidas al recocido vibracional, en las primeras ocasiones no se cristalizaron en una estructura FCC, sino en una estructura BCT, aunque mediante el crecimiento epitaxial sí se había logrado. No estaba muy claro qué es lo que había ocurrido, el recocido vibracional había conseguido superar exitosamente la fase vitrificada del sistema e inducirlo al ordenamiento. Sin embargo, un descubrimiento serendípico, identificando que si utilizaban esferas lubricadas con aceite (como originalmente están cubiertas por el fabricante) las esferas se cristalizaban en una estructura FCC al final del recocido (Carvente

y Ruiz 2005). ¿Qué ocurrió entonces? Resulta que una nueva fuerza había aparecido en el sistema con la presencia del aceite: las fuerzas cohesivas, las cuales eran las responsables de la formación de las estructuras FCC (Carvente y Ruiz 2008) (Figura 5).

Las fuerzas cohesivas fueron el resultado de la formación de puentes líquidos de aceite entre las esferas (Figura 6). Dicha fuerza consiste en dos partes: la tensión superficial en el perímetro húmedo y un término que surge de la presión capilar de un líquido. Esto da origen al polimorfismo en el sistema, que no sólo se ordena en estructuras BCT, sino también en estructuras FCC. Carvente y Ruíz (2008) argumentaron que dicho polimorfismo era debido a un mecanismo de compensación entre energías libres y vibracionales.



Figura 5. A la izquierda se aprecia una estructura BCT, caracterizada por un centro y seis vecinos; a la derecha se observa una estructura FCC, denotada por un centro y cuatro vecinos. Nótese como relucen los puentes líquidos entre las esferas (derecha).

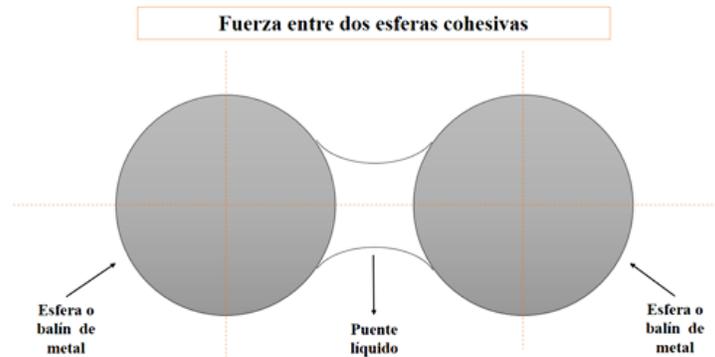


Figura 6. Fuerzas cohesivas entre dos esferas debidas a la presencia de un líquido, lubricante o activador.

Una herramienta muy útil para cualquier área experimental son las simulaciones por computadora, las cuales han servido para la comprensión y estudio de los sistemas químicos y físicos. En el 2016, Carvente, Salazar, Peñuñuri, y Ruiz realizaron una simulación computacional de dinámica molecular del sistema de esferas no-Brownianas, logrando repetir la dinámica de cristalización (auto-organización) de las esferas en sistemas no-cohesivos (con esferas secas) y cohesivos

(Carvente et al. 2016). Esta clase de método experimental permitió medir la temperatura del sistema en diferentes zonas, algo que no es posible realizar con precisión en el laboratorio, en la Figura 7 se observan capturas de la simulación realizada por Carvente et al. (2016) donde se muestra la temperatura en función del color en las diferentes zonas del sistema (zonas rojas: calientes; zonas azules: frías) a lo largo del recido vibracional.

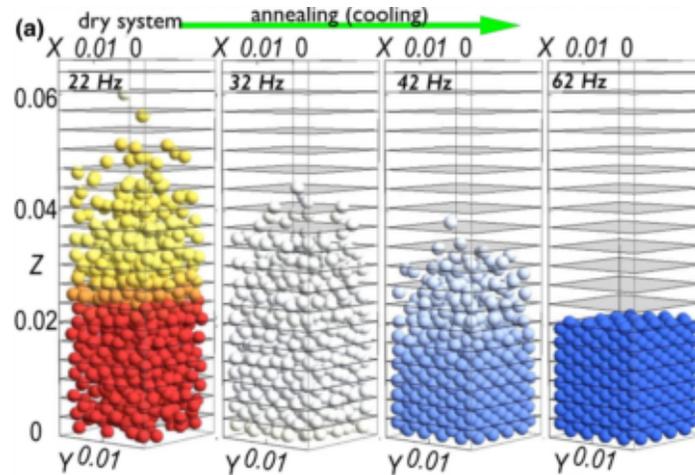


Figura 7. Captura de pantalla de las diferentes etapas del sistema no cohesivo de esferas no-Brownianas durante una simulación de dinámica molecular realizada por Carvente y Ruíz (2016).

EL CAMALEÓN, ESTADOS ORDENADOS DE LA MATERIA Y EL ORIGEN FÍSICO DE SUS COLORES.

Los estados ordenados de la materia presentan características muy especiales, el caso del carbono y sus formas alotrópicas (diamante, grafito y fullerenos) es uno de los más conocidos. Pero además de dureza y resistencia, la manera en la que se ordenan los componentes de un sistema puede dar origen a nuevas propiedades, como la transparencia, reflectividad o refracción. Este es el caso de los cristales fotónicos, los cuales interactúan con la luz mediante sus estructuras periódicas que son de la misma escala que la longitud de onda de la luz (Von Freymann et al.2013), y como resultado de esta interacción la longitud de onda cambia, lo que para nuestros ojos equivale a percibir un cambio en el color. Nuevamente, la naturaleza nos proporciona ejemplos sumamente interesantes para entender el funcionamiento de los cristales fotónicos: la iridiscencia en las alas de algunas especies de mariposas (Mika et al.2012) y el “cambio de color” del camaleón (Teyssier et al. 2015).

Desde el conocimiento de la existencia de los camaleones, la grandiosa característica de poder “cambiar de color” rápidamente y por

distintas razones, como el camuflaje, las emociones o la termorregulación, ha sido una de las principales y más curiosas preguntas sobre estos seres. Ahora que se puede echar un vistazo científico a tal habilidad, resulta sorprendente encontrarse con el hecho de que este cambio es generalmente causado por el “brillo” de la piel que más bien se debe a la manipulación de su reflectividad. Algunas especies pueden cambiar de color por medio de un proceso llamado Mimetismo o “cambio fisiológico de color”, que se basa en mecanismos que “cambian un pigmento por otro” y reorientan la superficie reflectora de los cromatóforos. Los camaleones producen estos efectos por vías de señalización celular, mientras que especies similares como el pulpo, utilizan músculos.

La piel de los camaleones *Furcifer pardalis* o pantera, está conformada por dos capas superpuestas de células opalescentes llamadas cromatóforos, que actúan como cristales fotónicos, ya que reflejan su luz según la organización que tengan (Teyssier et al. 2015).

Si se trata de la formación o estructura BCT, que se asemeja geométricamente a un hexágono, sus cromatóforos reflejarán ondas de color cortas y, por lo tanto, tonalidades

azules, obteniendo así el conocido color verde (Teyssier et al. 2015).

Pero si es alterado, generalmente por cambios de humor, como estrés o por cambios significativos en el ambiente que los rodea como la temperatura (que básicamente actúan como el activador en los experimentos con las esferas No-brownianas), reflejará ondas de color largas y por tanto tonalidades rojas, obteniendo así los colores amarillos y naranjas.

Es sorprendente la gran similitud que comparte con los sistemas experimentales auto-organizables, ya que, como se puede observar en la Figura 8, los cromatóforos resultan estar naturalmente en formaciones BCT, que reflejan tonalidades azules y verdes, y que por medio de alguna alteración (o un “activador”, como la el instinto de sorpresa o el camuflaje) evolucionan a la formación FCC, que se caracteriza por ser causante de la reflexión de las ondas más largas, reflejando tonalidades rojas y amarillas.

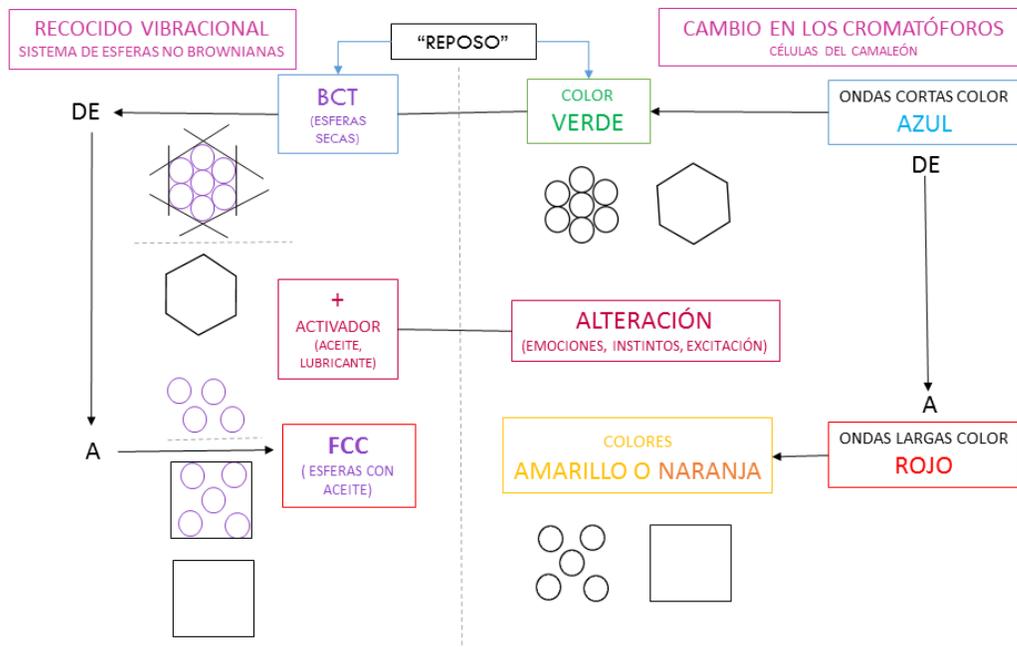


Figura 8. Analogía entre las células del camaleón (cromatóforos) y el sistema de esferas no brownianas. Relación entre el "cambio de color" (por las formaciones BCT y FCC) y la auto-organización.

Clasificación de los sistemas

Los sistemas auto-organizados se pueden clasificar de acuerdo con la descripción termodinámica de las estructuras en las que se auto-organizan, en consecuencia, se dividen en sistemas en equilibrio y sistemas fuera de equilibrio (Grzybowski et al.2009).

Los sistemas en equilibrio son también llamados “estáticos”. Las estructuras que los

conforman están caracterizadas por un máximo local o global de la entropía, en los cuales no hay flujos sistemáticos de energía (Grzybowski et al.2009).Un ejemplo de estos es la estructura cristalina del ribosoma (Ban et al.2000), cristales atómicos, iónicos, moleculares y coloidales (Whitesides y Grzybowski, 2002). En algunos de estos sistemas la auto-organización puede darse por efectos entrópicos (Grzybowski et al. 2009),

lo que da lugar a que la fase ordenada, presente mayor entropía que la desordenada. ¿Qué acaso esto no viola la segunda ley de la termodinámica? Es decir: ¿Qué no de esta manera estaríamos disminuyendo la entropía del sistema sin ningún impulso externo? La respuesta es no, aunque la entropía pueda ser asociada comúnmente con el desorden, realmente está relacionada con el estado fase. En estos casos, ocurre lo mismo que si comparamos un sistema de esferas no-Brownianas en una configuración de estructura RCP (desordenada) con el sistema cristalizado en una estructura BCT (ordenada), mientras ambos vibran a una frecuencia alta, suficiente como para hacer que las esferas oscilen en sus posiciones, obtendríamos que en el segundo estado las esferas presentan mayor entropía y estado fase, ya que, pueden oscilar con mayor libertad, en cambio en la configuración de estructura RCP las esferas verían obstruido su movimiento debido a atascamientos (Carvente y Ruíz 2008). Para los sistemas estáticos ocurre lo mismo, inclusive sus componentes son capaces de intercambiar lugares libremente en configuraciones ordenadas.

En el caso de los sistemas fuera de equilibrio o “dinámicos”, se organizan en estados meta-estables de baja entropía (Grzybowski et al. 2009), los cuales son posibles y dependen de la energía que se suministra constantemente al sistema. El sistema de esferas no-Brownianas sobre el cual se ha hablado en el desarrollo forma parte de los sistemas dinámicos, principalmente debido a que en el sistema hay un continuo flujo de energía y una fuerte disipación de ésta; este sistema también se incluye en la clasificación de los sistemas de plantilla, ya que las esferas están necesariamente confinadas en contenedores (Carvente et al. 2016).

NANO-FABRICACIÓN Y FUTURAS APLICACIONES

Un gran número de investigadores pertenecientes a disciplinas que van desde la física de partículas hasta la ingeniería bioquímica, han reconocido en la auto-organización una opción para el desarrollo de métodos que permitan crear múltiples nanoestructuras, las cuales dispongan de arquitecturas a diversas escalas y que sean capaces de llevar a cabo tareas específicas. El conjunto de estos métodos forma parte de lo que se conoce como bottom-up self-assembly (auto-organización de abajo hacia arriba), las cuales son técnicas de ensamblaje químico y de reconocimiento molecular para formar estructuras a partir de átomos, moléculas o partículas supramoleculares (Li et al. 2009).

Entre las creaciones más atractivas logradas a partir del bottom-up self-assembly, podemos encontrar la fabricación de cristales fotónicos mediante la auto-organización de cristales coloidales (Von Freymann et al. 2013), los cuales pueden ser aprovechados para crear capas de invisibilidad, funcionando como un camuflaje que imita a la piel del camaleón, o hasta de usar estos mismos para las computadoras del futuro, con información que viaje a la velocidad de la luz sin tener la pérdida que los cristales electrónicos sufren por calentamiento, convirtiéndose en un camino viable para la computación de alta velocidad (Joannopoulos et al. 2008). Por otro lado, también está el uso de filamentos de ADN (Ácido Desoxirribonucleico) como bloques de construcción de nanoestructuras (Zhang y Yan 2017), los cuales podrían tener importantes aplicaciones en la bioingeniería y la medicina, que en un futuro cambiarán nuestra forma de ver el mundo.

CONCLUSIÓN

Ya hablábamos de cómo a partir de la autoorganización surge el “orden natural”, es decir, se manifiesta la existencia de estados ordenados de la materia. Así, el estudio de

este fenómeno nos permite observar que la naturaleza prefiere y tiende a estados mínimos de energía, recordándonos que todo diamante en algún momento se convertirá en grafito. Además, la auto-organización nos muestra que la entropía no es sinónimo de desorden (geométrico), y que los estados ordenados pueden ser más entrópicos que los no ordenados.

La aplicación de los conocimientos obtenidos sobre este fenómeno permite vislumbrar muchos de los futuros avances tecnológicos, el hecho de que actualmente se utilicen filamentos de ADN como bloques de construcción para nano-arquitecturas, como si fueran los mismos bloques o ladrillos con los que se construyen las casas, ya es suficiente para sorprendernos. ¿Y quién diría? Quizá dentro de poco seamos capaces de usar el fenómeno a la inversa y así atravesar materia sólida, o tal vez descubramos que el universo,

en su constante expansión acelerada, en realidad intenta auto-organizar toda la materia y energía, tanto oscura como conocida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores principales, estudiantes de educación media superior, agradecen al proyecto Savia, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y al Doctor Osvaldo Carvente, por todos los saberes compartidos con nosotros. A nuestros padres y familiares por brindarnos apoyo en el trayecto de este proyecto y a cada uno de los compañeros, maestros y lectores que difunden el conocimiento planteado en este artículo. El presente artículo de divulgación fue escrito durante la estancia de investigación del Proyecto Savia Módulo 9 de la Secretaría de Investigación, Innovación y Educación Superior (septiembre 2017- febrero 2018), en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

REFERENCIAS

- Ban, N., Nissen, P., Hansen, J., Moore, P., y Steitz, T. (2000). The complete atomic structure of the large ribosomal subunit at 2.4 resolution. *Science* vol. 289. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.289.5481.905>
- Carvente, O. & Ruiz-Suárez, J. C. (2005). Crystallization of confined non-Brownian spheres by vibrational annealing. *Physical Review Letters* vol. 95. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.018001>
- Carvente, O. & Ruiz-Suárez, J. C. (2008). Self-assembling of dry and cohesive non-Brownian spheres. *Physical Review E* vol. 78. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.78.011302>
- Carvente, O., Salazar-Cruz, M., Peñuñuri, F. & Ruiz-Suárez, J. C. (2016). Dynamic self-assembly of non-Brownian spheres studied by molecular dynamics simulations. *Physical Review E*. vol. 93. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.020902>
- González, J. (2014). Estudio experimental de la dinámica de cristalización polimorfa en sistemas confinados de esferas no-Brownianas (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

Grzybowski, B. A., Wilmer, C. E., Kim, J., Browne, K. P. & Bishop, K. J. M. (2009). Self-assembly: from crystals to cells. *Soft Matter* vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1039/B819321P>

Halliday, D., Resnick, R., y Walker, J. (2001). *Fundamentos de física*. México, D.F.: Compañía Editorial Continental.

Joannopoulos, J., Johnson, S., Winn, J. & Meade, R. (2008). *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press.

Knight, J. B., Fandrich, C. G., Lau, C. N., Jaeger, H. M. & Nagel, S. R. (1995). Density relaxation in a vibrated granular material. *Physical Review E* vol. 51. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.3957>

Lash, M. H., Fedorchak, M. V., McCarthy, J. J. & Little, S. R. (2015). Scaling up self-assembly: bottom-up approaches to macroscopic particle organization. *Soft Matter* vol.11. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5SM00764J>

Li, H., Carter, J., & LaBean, T. (2009). Nanofabrication by DNA self-assembly. *materialstoday* vol. 5. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(09\)70157-9](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(09)70157-9)

Miana, P. y Romero, N. (2010). *La Historia de la Conjetura de Kepler*. Universidad de la Rioja. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/44960154_La_historia_de_la_conjetura_de_Kepler el día 15 de diciembre de 2017.

Mika, F., Matějková, J., Jiwajinda, S., Dechkrong, P. & Shiojiri, M. (2012). Photonic Crystal Structure and Coloration of Wing Scales of Butterflies Exhibiting Selective Wavelength Iridescence. *Materials* vol.5. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma5050754>

Ozin, G., Hou, K., Lostsch, B., Cademartiri, L., Puzzo, D., Scotognella, F., Ghadimi, A. & Thomson, J. (2009). Nanofabrication by self-assembly. *materialstoday* vol.5. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(09\)70156-7](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(09)70156-7)

Pouliquen, O., Nicolas, M. & Weidman, P. (1997). Crystallization of non-Brownian Spheres under Horizontal Shaking. *Physical Review Letters* vol. 79. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.3640>

Scott, D. G. (1960) Packing of spheres: packing of equal spheres. *Nature* vol.188. DOI: <https://doi.org/10.1038/188908a0>

Teyssier, J., Saenko, S. V., Marel, D. v. d. & Milinkovitch, M. C. (2015). Photonic crystals cause active colour change in chameleons. *Nature* vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms7368>

Von Freymann, G., Kitaev, V., Lotsch, B. V. & Ozin, G. A. (2013). Bottom-up assembly of photonic crystals. *Chem. Soc. Rev.* vol. 42. DOI: <https://doi.org/10.1039/C2CS35309A>

Walton, B. M. & Bennet, A. F. (1993) Temperature-dependent color change in keynan chameleons. *Physiological and Biochemical Zoology* vol. 66. DOI: <https://doi.org/10.1086/physzool.66.2.30163690>

Whitesides, G. M., & Grzybowski, B. (2002). Self-Assembly at All Scales. *Science* vol. 295. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1070821>

Zhang, F. & Yan, H. (2017). DNA self-assembly scaled up. *Nature news & views* vol. 552. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-017-07690-y>