

Alteración de Patrones en Medios Granulares por Medio de Vibraciones

Nicolás Celis, Diego Zavala, Alejandro Durán, Ignacio Guarda

Resumen

De forma experimental se logró alterar dos patrones que ocurren en los medios granulares. Por medio de vibraciones se pusieron en competencia dos fenómenos opuestos de ordenamiento granular, obteniendo un nuevo patrón conjugando a éstos dos. Simulamos lo que sería una vista de una duna de arena en 2D, para observar los patrones que se formaban.

Utilizamos una pecera para poder verter arena y sal de diferentes tamaños y colores con el fin de observar los patrones que se formaban. Se utilizó un motor de 5.5 HP para someter éste sistema a vibraciones. Se tomaron fotografías de lo que ocurría para compararlas y poder explicar los fenómenos que ocurrían.

Lo que ocurrió fue que los granos de menor tamaño se acomodaron en el fondo de la pecera, mientras que los de mayor tamaño se acomodaron en la superficie y la estratificación original se modificó.

Introducción

Por definición, los medios granulares son partículas pequeñas de forma irregular, ya sean granos de arena, sal, azúcar o cualquier otro tipo de grano.

En medios granulares se observan, entre otras, dos situaciones distintas. El primero se crea cuando en un contenedor casi bidimensional se le va agregando de forma constante la mezcla de dos arenas o cualquier medio granular. Los medios deben estar diferenciados por el color para poder observar el fenómeno. La segunda situación es la segregación, la cual ocurre cuando el medio granular se somete a vibración. Durante este proceso, se nota una separación de los diferentes tipos de grano, debido a su diferencia en tamaño.

Al agregarse la arena se van a ir creando dunas que después de ir creciendo conforme cae la arena, se van a ocasionar derrumbes. Estos derrumbes irán creando un patrón como se muestra en la **Fig. 1**. Se puede notar una estratificación y la segregación entre los granos de mayor tamaño (color rojo) y los de menor tamaño (color blanco). Lo que sucede con éste fenómeno es que al ocurrir derrumbes cuando (crece la duna) se van recorriendo los granos de mayor tamaño hacia la base y los de menor tamaño se quedan en la superficie.

El segundo fenómeno ocurre cuando se tiene una mezcla de dos medios granulares de diferente tamaño y densidad. Al colocar toda la mezcla en el contenedor se va a observar una mezcla sin ningún patrón: todos los granos van a

estar dispersos. A continuación, el sistema se altera por medio de vibraciones verticales, paulatinamente se observa que la segregación ocurre en dos capas, la de la base va a contener los granos de menor tamaño y la de la superficie va a ser la de los granos de mayor tamaño (Fig. 2). Este particular fenómeno ocurre en cualquier mezcla de medios granulares al ser sometidos a vibración, sin importar la diferencia en el tamaño de los granos, solamente con que exista una diferencia, la segregación va a ocurrir. Esto ocurre ya que las partículas pequeñas van a poder deslizarse por los costados de las de mayor tamaño al ser sometidas a vibración.

Se tienen dos fenómenos que ocurren al ser experimentados de manera separada. Cada uno tiene un resultado contrario. En el primero, se segregan las partículas de mayor volumen en el fondo, las de menor volumen en la superficie y se crea una estratificación de capas de los dos volúmenes de la arena. En el segundo fenómeno se observa que, contrario al primero, las partículas más grandes se concentran en la superficie mientras que las pequeñas en la base.

Teniendo en cuenta éstos dos fenómenos se genera la pregunta: ¿Cuál sería el resultado de la alteración del primer fenómeno por medio de vibración? Nuestro proyecto consistió en la unión de estos dos fenómenos que presentan características contrarias (En la segregación del primer fenómeno, los granos de mayor tamaño quedan en la base, y los de menor tamaño quedan en la superficie; mientras que en el segundo fenómeno los granos de mayor tamaño quedan en la superficie y los de menor tamaño quedan en la base). Al unir éstos dos fenómenos, crean un resultado nuevo sin que predomine ninguno de los dos fenómenos ya establecidos.

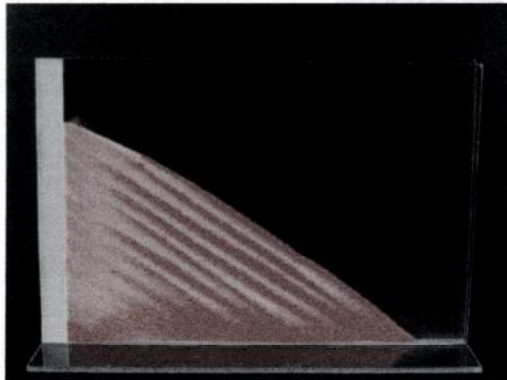


Fig. 1

Primer fenómeno en el cual los granos de mayor tamaño son los de color rojo y los de menor tamaño son los de color blanco. Se utilizó el contenedor casi bidimensional para apreciar mejor la estratificación.¹

¹ T., H. A. Makse and P. G. de Gennes, Surface Flows of Granular Mixtures: III. Canonical Model, Eur. Phys. J.-B 9, 105-115 (1999).



Fig. 2

Segundo fenómeno en el cual los granos de mayor tamaño son los de color azul y los de menor tamaño son los de color rosa. Se utilizó un contenedor diferente porque este fenómeno no presenta estratificación.

Antecedentes

Acercas de este tema se sabe poco realmente. Ha habido estudios en los que se comprueban los dos fenómenos. El primer fenómeno, en el cual se forman dunas, se ha podido explicar el porqué ocurren éstas, dependiendo de sus ángulos de inclinación, antes y después del derrumbe. También se ha podido explicar de forma teórica que, a medida que van cayendo los granos al contenedor, se van acumulando en la duna, los de mayor tamaño, deslizándose más hacia la base ya que en los derrumbes es más difícil que se detengan ya que las partículas pequeñas las dejan resbalar. Los granos de menor volumen se van a ir acumulando en la superficie ya que se van concentrando con los de su mismo tamaño, ya que no pueden bajar a la base porque los granos de mayor volumen le impiden bajar. Lo que no se ha podido explicar hasta la fecha es porqué, al haber deslaves, se van formando estratificaciones en las que se alternan capas consecutivas de los dos tipos de medios granulares.

En estas investigaciones, publicadas en la revista NATURE [2] se comprobó experimentalmente que éste efecto ocurre solamente si la mezcla de los medios granulares no tienen la misma forma. Es decir, que si se utilizan dos tipos de partículas de diferente volumen pero de forma esférica, no se van a obtener los resultados antes mencionados. El efecto sólo ocurre cuando se tienen partículas irregulares o cuando se tiene una mezcla de partículas irregulares con una forma esférica.

Por medio de vibraciones en el contenedor (oscilatorios o trepidatorios) se puede separar una mezcla de dos tipos de granos. Al ponerse a vibrar constantemente las partículas, comprobamos que las de menor tamaño se acomodan en la base y las de mayor tamaño se concentran en la superficie. Esto ocurre ya que las de menor

-
2. H. A. Makse, S. Havlin, P. R. King, and H. E. Stanley, "Spontaneous stratification in Granular Mixtures", [*Nature* 386, 379 (1997)].

volumen se pueden ir moviendo gracias a las vibraciones externas y se van moviendo por los lados de las de mayor volumen hasta llegar a la superficie y colocarse con las de su misma especie.

También observamos que, el sistema, al estar sometido a alteraciones vibratorias, va reduciendo su volumen ya que al irse moviendo y acomodando, los espacios que antes había se van reduciendo al estar mejor ordenadas.

En el CENAPRED nos explicaron que en los temblores, por la vibración las partículas grandes se van hacia arriba porque buscan acomodarse, pero las pequeñas no bajan, porque abajo hay más presión, y como esta tiene menos espacio entre grano y grano, no pueden bajar, no hay espacios libres pero si quedan las partículas mas grandes arriba. Las partículas pequeñas se quedan en su lugar pero se acomodan. No se hace una segregación muy grande por las vibraciones ya que, en los temblores, la tierra tiene mucho peso encima y el tiempo que duran las vibraciones es muy pequeño como para que se haga una segregación importante. Cuando se libera la energía en un temblor, las partículas tienden a subir a donde hay menos presión.

Hipótesis

Al poner en vibración el contenedor de 2D, al mismo tiempo que se le vierte la arena, va a haber una competencia entre los dos fenómenos (cuando existen vibraciones intermedias). Para vibraciones altas va a predominar la segregación donde los granos chicos se depositarán en la base. Para vibraciones bajas va a predominar la segregación con estratificación, donde las partículas de mayor tamaño se depositarán en la base.

Objetivo

- Alterar los patrones comprobados previamente (fenómenos 1 y 2) de medios granulares por medio de vibraciones para obtener un nuevo patrón al mezclar los dos fenómenos contrarios.
- Crear condiciones en las que ninguno de los dos fenómenos predomine y así lograr que compitan y observar nuevas características en el medio granular.

Metodología y Materiales

Se utilizó un contenedor tipo pecera que se mandó construir *ex profeso* (ver detalle en el Anexo 1), para realizar los experimentos. Este contenedor nos iba a dar una vista casi bi-dimensional de la formación de dunas. Conseguimos diferentes tipos de sal y de arena de diferentes tamaños para poder hacer combinaciones y probar nuestra hipótesis con cualquier medios granulares sin importar que tan grande sea la diferencia de tamaño de los granos.

Se pintaron los granos para poder diferenciarlos unos de los otros y poder observar las segregaciones y patrones en la pecera (ver detalles en el Anexo 1). Se

utilizaron gises de colores y se pintaron de color para que el color que se les iba adheriendo a los granos, no fuera cambiando su forma.

Con la ayuda de coladores de diferente tamaño fuimos haciendo una separación de las arenas para tener una diferencia más clara de tamaños y de manera pareja. (ver detalles en el **Anexo 1**). Gracias a eso pudimos tener diferentes muestras de arena que eran de diferente tamaño y color para una mejor distinción de los resultados.

Ya que tuvimos las muestras separadas por colores y tamaños empezamos los experimentos para comprobar los dos fenómenos de segregación que ya habíamos estudiado (**Fig. 3**). Teniendo estos dos experimentos comprobados por nosotros después de haber revisado la bibliografía empezamos a medir tiempos y velocidades en los que estos ocurrían. Cada experimento se llevó a cabo con 2 Kg. de la mezcla homogénea (ver detalles en el **Anexo 2**). Al tener los tiempos y las velocidades pudimos empezar a hacer pruebas poniendo en competencia los dos fenómenos de una forma más precisa.

Utilizamos una máquina de podar el pasto de 5.5 HP (ver detalles en el **Anexo 1**) que nos dio las suficientes vibraciones verticales necesarias para alterar el sistema. Se colocó la pecera sobre el motor de la máquina para ahí mismo realizar los experimentos.



Fig. 3

Reproducción de experimentos realizados en la bibliografía consultada³

Resultados y Discusión

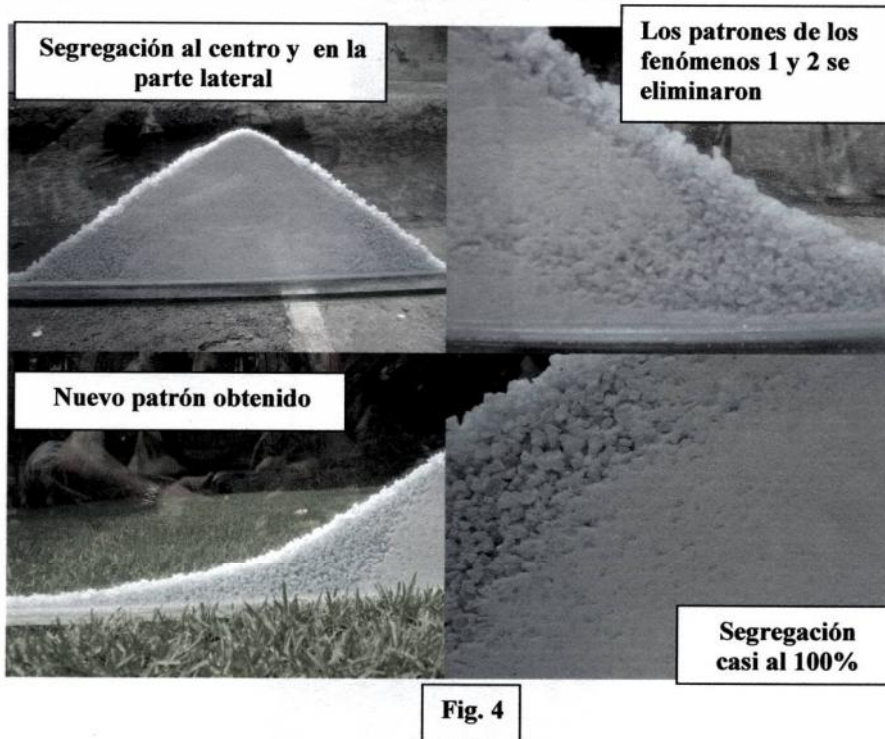
Cuando juntamos los dos fenómenos de segregación y estratificación de medios granulares con una vibración intermedia (que no fuera ni una vibración alta ni una baja para que no predominara ninguno de los dos fenómenos), formamos un nuevo patrón a los estudiados (**Fig. 4**). En este nuevo patrón se observó que la estratificación provocada por los derrumbes de arena ya no estaba presente. En las orillas de la base de la duna se concentra una pequeña parte de la mezcla en forma

³ H. A. Makse and H. J. Herrmann, Microscopic Model for Granular Stratification and Segregation, *Europhys. Lett.* 43, 1-6 (1998);

homogénea sin embargo en la parte central y lateral se observa una segregación casi al 100 % de la mezcla original.

Este nuevo fenómeno, además de eliminar la estratificación, afecta la forma en que se separan los medios. Los granos de mayor tamaño se concentran en la parte lateral de la duna y llega una pequeña capa hasta la superficie. Los granos de menor tamaño se concentran debajo de los de mayor tamaño.

Estos resultados solamente son posibles cuando se utilizan medios granulares de diferentes tamaños y formas. En este caso se utilizaron medios con diferencia de tamaños muy grandes para que así se pudiera observar más clara la segregación. Nos dimos cuenta que es irrelevante qué tan grande es la diferencia de tamaños entre los granos. Lo que es necesario es que sí exista alguna que no sea despreciable para que se pueda observar. Sin embargo, este nuevo patrón y la segregación de medios granulares funciona sin importar que tan grande es la diferencia de tamaños, tan solo con que exista una como se observa en la Fig. 3 (derecha).



El nuevo patrón obtenido donde se eliminó la segregación del primer fenómeno de estratificación. Cuando compiten los dos fenómenos se crea este nuevo patrón que no obedece a las características de estos. Los granos pequeños se concentran en el centro de la pecera, cubiertos por una capa de los granos de mayor tamaño. La mezcla está segregada casi en su totalidad.

Conclusiones

Al juntar los dos fenómenos de segregación de medios granulares que generan patrones contrarios y se someten a vibraciones intermedias para evitar la

predominancia de cualquiera de los dos, se crea un patrón nuevo que surge de la competencia que hay entre éstos dos.

Esto solamente va a suceder si los dos fenómenos ocurren de manera simultánea. Si al poner en competencia los dos fenómenos de segregación de medios granulares predomina la velocidad de vertimiento de arena o las vibraciones, no ocurrirá el nuevo patrón ya que se formará cualquiera de los dos anteriores (Segregación y estratificación). Por este hecho se necesita tener una velocidad de vertimiento y magnitud de vibraciones "balanceada", dependiendo del tipo de granos utilizados, cantidad y características del recipiente. Ya que si existe cualquier otro factor que favorezca la creación de los dos fenómenos anteriores, no permite la creación del nuevo patrón encontrado.

Este nuevo método de segregación puede ser utilizado en la industria para separar diferentes mezclas en una manera más efectiva. La separación de mezclas por medio de vibraciones solamente, es más tardada que si se utiliza el nuevo fenómeno ya que con este se realiza en menor tiempo y separa casi en su totalidad la mezcla.

Logramos comprobar nuestras hipótesis y demostrar que dos fenómenos diferentes se podían combinar y crear uno diferente.

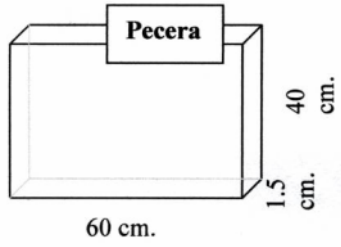
Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Luis Benet del Centro de Ciencias Físicas (CCF) de la UNAM y al Dr. Enrique Galindo del Instituto de Biotecnología (IBT) de la UNAM por su gran apoyo y asesoramiento durante la realización de este proyecto.

Bibliografía

1. H. A. Makse, S. Havlin, P. R. King, and H. E. Stanley, "Spontaneous stratification in granular mixtures" **Nature** 379-386 (1997).
2. H. A. Makse and H. J. Herrmann, Microscopic model for granular stratification and segregation, **Europhys. Lett.** 43, 1-6 (1998);
3. T. Boutreux, H. A. Makse and P. G. de Gennes, Surface flows of granular mixtures: III. Canonical Model , **Eur. Phys. J.-B** 9, 105-115 (1999).
4. H. A. Makse, Kinematic segregation of flowing grains in sandpiles , **Eur. Phys. J. B**, 7, 271-276 (1999)
5. Hutton, S. "Studies of the effects of inter- particle forces on the properties of granular matter using iron particles in a magnetic field"
http://folk.uio.no/seanh/sean_poster_kongsberg2003-07small.pdf (Consultado el 15 de Mayo del 2005.)

Anexo 1



Anexo 2

Medimos el tiempo en el que vertimos la mezcla de un kilogramo de sal de mesa y arena, utilizando diferentes embudos. las boquillas de los embudos utilizados tienen las siguientes medidas: 6 mm, 8 mm y 1cm.

Este experimento fue importante ya que con él nos fue más fácil encontrar el objeto que íbamos a utilizar para producir las vibraciones. Necesitábamos un objeto que produjera las vibraciones suficientes en el mismo tiempo en el que se vertía la arena, por eso necesitábamos saber el tiempo y encontrar el embudo adecuado para el experimento.

Diámetro del embudo	Tiempos (min)				Promedio
	1er experimento	2do experimento	3er experimento	4to experimento	
6mm	5,2	5,37	5,44	5,5	5,37
8mm	4,19	4,04	4,13	4,07	4,1
1cm	2,5	2,47	2,57	2,52	2,52

Anexo 3

En nuestra visita al CENAPRED, uno de los especialistas nos sugirió que hiciéramos un experimento que muestra cómo se alteran los patrones de medios granulares por vibración en caso de un temblor.

Metodología

1. Colocar una varilla dentro del recipiente de vidrio.
2. Verter granos rojos de un mismo tamaño a los lados de la varilla.
3. Humedecer los granos con agua.
4. Verter la mezcla de diferentes tamaños de granos.
5. Humedecer nuevamente esta mezcla con abundante agua.
6. Retirar la varilla.

Resultados esperados

Al retirar la varilla, la mezcla de granos que estaba en la superficie llenará el espacio que ocupaba la varilla y de esta manera se va a alterar el patrón de segregación que habíamos formado al principio, en el cual, los granos de menor tamaño estaban en el fondo. Esperamos que ocurra esto ya que creemos que al quitar la varilla, el líquido que está en la superficie empezará a someter presión para bajar y con ella se llevará los granos que están en la superficie en cuanto ésta se retire.

Resultados

Los resultados fueron contrarios a los esperados. Los granos de menor tamaño quedaron pegados a la varilla y al retirar ésta, los granos de menor tamaño logran subir por encima de los granos de mayor tamaño. El espacio ocupado por la varilla sólo se llenó de agua.



**Sistema original
con la barilla
clavada**

**Momento después de
quitar la varilla**

**La arena del fondo
emerge en pequeña
cantidad.**