



ESTUDIO DE
FORMACIÓN
DE UN CRÁTER,
PRODUCTO DEL IMPACTO
SOBRE SUPERFICIES
GRANULARES
CONTROLADAS

Nelson Sepúlveda

Doctor en Ciencias, Mención Física

Juan Fuentealba

Doctor en Ciencias, Mención Física

RESUMEN Se presenta el estudio de formación de cráteres producto de caída libre de esferas sólidas, sobre medios granulares de 1.0 mm y 2.0 mm. El objetivo principal de este estudio es identificar relaciones funcionales entre los parámetros de caída, y discutir algunas leyes de potencia encontradas en otros trabajos, bajo condiciones granulares muy controladas. En este trabajo se utilizó un medio granular real compuesto de múltiples facetas, encontrando una dependencia entre la energía y el diámetro del cráter como $D \sim E^{(1/4)}$.

INTRODUCCIÓN

Cráteres se han encontrado en todos los satélites naturales y planetas del sistema solar, con excepción de Júpiter debido al no contar con estructura sólida en su contorno, el caso general de los cuerpos celestes ha sido materia de estudio desde la aparición del Sidereus nuncijs de Galilei (1610), siendo este el primer tratado científico basado en observaciones experimentales con el uso del telescopio. Particularmente esto llamó la atención de los científicos de la época en el Siglo XVII, porque contradecía las sagradas escrituras. Galileo, buscando formas de explicarlos mencionó los cráteres como "alrededor de una especie de mancha que ocupa la región de la Luna más alta y septentrional, se levantan algunas prominencias enormes, tanto sobre ella, cuanto por debajo" ver Figura 1, quedando declarado en el primer tratado de astronomía, la existencia de montañas de origen desconocido. El desarrollo del

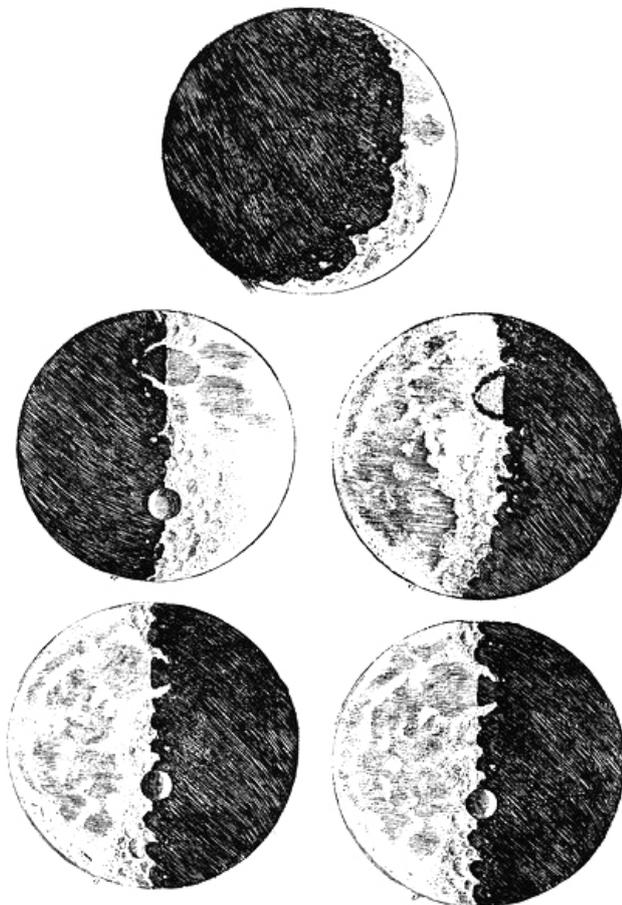


FIGURA 1

Observaciones de Galileo, correspondientes al Sidereus nuncijs, el primer tratado astronómico con observaciones por medio del telescopio.

telescopio, permitió rápidamente observar montañas en distintos cuerpos celestes, los cuales encontraron su explicación producto del impacto de otros cuerpos sobre sus superficies, y no solo fuera de la atmósfera, sino que en la superficie terrestre hay socavones que se han asignado su origen, producto de material celeste que ha logrado sobrevivir al ingresar a la atmósfera, y terminado impactando en la superficie de la Tierra. Se destacan algunos encontrados como el cráter meteorito Barringer en Arizona, Estados Unidos (diámetro y profundidad: $D=1.2\text{km}$ y $P=170\text{m}$), cráter Wolfe Creek en Australia ($D=870\text{m}$ y $P=60\text{m}$), o cráter Roter Kamm, en el desierto de Namibia en África ($D=2.5\text{km}$ y $P=130\text{m}$).

Trabajos recientes como el de De Newhall et al, (2003) o de De Vet, (2007), se han centrado en investigar relaciones entre la energía del impacto, la profundidad y diámetro que dan forma al cráter en un medio granular, Zheng et al, (2004) han observado la dependencia directa en la formación del cráter y el ángulo de impacto del proyectil, mientras Umbanhowar et al, (2010), determinó la dependencia del cráter con el empaquetamiento del sistema previo al impacto. Por otra parte Clark et al, (2014), han desarrollado modelos colisionales para el impacto en medios granulares, basados en partículas foto elásticas, estudiando la rápida atenuación de las cadenas de esfuerzo, en la propagación del material granular.

En el trabajo de Uehara et al, (2003), se reporta el estudio de penetración de proyectiles esféricos caídos desde el reposo sobre superficies secas a bajas velocidades, el proyectil responde a una ley de potencia para el diámetro del cráter (D_c), y la relación con la altura (H) de caída del proyectil (directamente proporcional a la energía potencial), con exponente 1/4.

$$D_c = 0.90 [\rho_b / (\rho_g \mu^2)]^{1/4} D_b^{3/4} H^{1/4}$$

donde ρ_b es la densidad de la esfera, ρ_g es la densidad del medio granular, μ es el coeficiente de fricción de los granos, definido como $\mu = \tan \theta_r$ donde θ_r es el ángulo de avalancha del material, y D_b es el diámetro de la bola.

En el caso de la profundidad de penetración, Uehara et al, (2003), encuentran una dependencia con exponente 1/3 de la altura H de impacto.

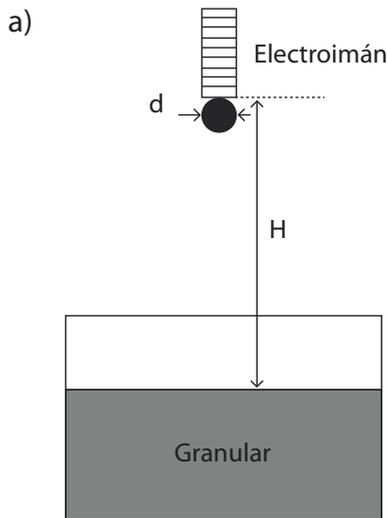
$$d = 0.14 [\rho_b / (\rho_g \mu^2)]^{1/2} D_b^{2/3} H^{1/3}$$

El objetivo del experimento planteado en este documento sobre impacto en medios granulares, es identificar la validez de trabajos en condiciones ideales, realizando las experiencias en materiales reales, en este caso particular ripio; lavado y tamizado para 1 y 2 milímetros, el material granular deja de ser esférico y se deben considerar múltiples facetas entre los granos.

Instrumentos y materiales

Al interior de una caja de acrílico de 30cm x 30cm de base, se depositó 12 kg de material granular correspondiente a ripio previamente tamizado, lavado y secado de 2.0 ± 0.2 mm y 1.0 ± 0.2 mm de diámetro respectivamente. Sobre este material se dejó caer verticalmente y desde el reposo, cuatro bolas de acero de diferentes diámetros; 15mm, 20mm, 26mm y 36mm, para diez alturas entre 0.25 a 0.70 metros cada una, ver Figura 2.

El sistema de soporte de las esferas de acero, se diseñó basado en el principio de un electroimán, controlado por medio de botoneras que permitieron la sujeción y soltura de la esfera en posiciones controladas, para cuidar la reproducibilidad del experimento.



$$E(y) = (\rho_b V_b) g \Delta y = 1/6 \rho_b \pi d^3 g \Delta y$$

siendo ρ_b la densidad de la bola, V_b el volumen de la esfera, g la aceleración de gravedad, d el diámetro de la bola, y Δy la altura entre la posición inicial de la esfera y la superficie granular.

RESULTADOS

De acuerdo a Clark et al, (2014), el impacto sobre superficies granulares es altamente disipativo, al trabajar con polímeros fotoelásticos y observarlos a través de polarizadores cruzados, permite la visualización directa de cadenas de esfuerzo, las cuales por medio de ramificaciones se disipan un rango pequeño de penetración, y cuyo trabajo permitió encontrar un modelo colisional para la dinámica del impacto sobre medios granulares.

En la *Figura 4*, se observa que a medida que se incrementa la Energía potencial del proyectil (aumenta la altura de lanzamiento), el cráter asociado al impacto también aumenta de tamaño, mismo comportamiento se observa al aumentar la masa del proyectil. Al mismo tiempo se aprecia un aparente comportamiento asintótico relacionado con un valor crítico del tamaño máximo de un cráter debido probablemente al desplazamiento de granos donde se produce el impacto. Otro aspecto importante es que a pesar de usar 2 diferentes agregados (1 mm y 2 mm) el tamaño del cráter para niveles similares de energía no varía significativamente, salvo para el caso particular del proyectil más pequeño de 15 mm en donde el tamaño de los cráteres disminuye para un agregado mayor de 2 mm. La causa de este comportamiento posiblemente esté dada porque mientras más pequeño sea el proyectil, ocurre un posible fenómeno no estudiado en este trabajo, y estaría dado por la dependencia de la razón entre, el diámetro del proyectil en caída libre a bajas energías y el diámetro promedio de las partículas que conforman el medio granular.

La *Figura 5* corresponde a la representación logarítmica de los datos de la *Figura 4*, la figura muestra que, a pesar de que las energías involucradas en cada uno de los experimentos con diferentes proyectiles son distintas, las cuatro curvas satisfacen la ley de potencia entre el diámetro del cráter y la energía asociada a cada esfera como $D \sim E^{(1/4)}$. Actualmente se trabaja en determinar si otros parámetros interfieren en la relación de diámetros del cráter Vs la energía a bajas velocidades.

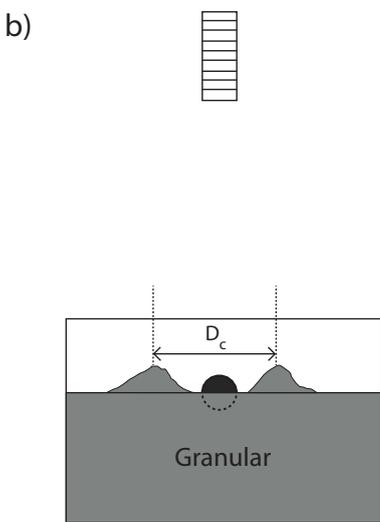


FIGURA 2

Montaje Experimental. a) Sistema inicial, medio granular dilatado y esfera de acero sostenida por medio de un electroimán. b) Medio granular, con cráter de diámetro D_c .

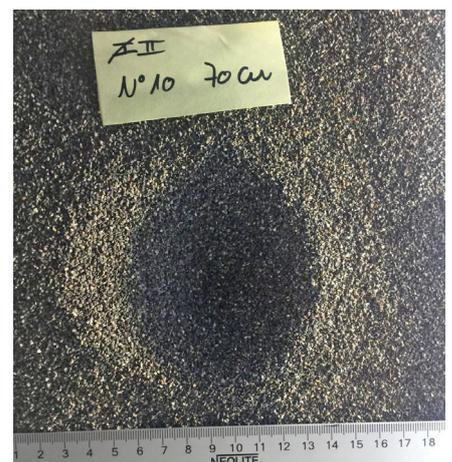
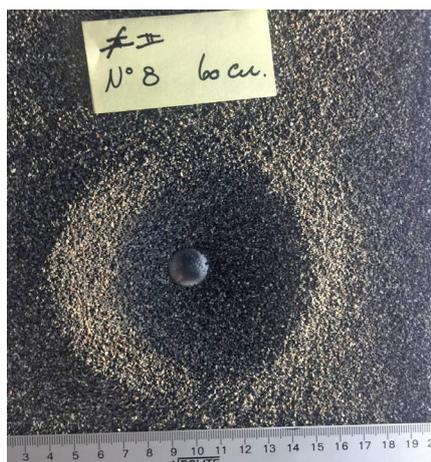
Al caer la bola sobre el medio granular, ver *Figura 3*, se registró el diámetro D del orificio dejado por el cráter, en función del desplazamiento de partículas alrededor del proyectil.

Metodología

Cada bola de igual densidad ρ , y distinto diámetro d , se dejó caer desde una altura controlada. El experimento se realizó diez veces por cada altura, desde el electroimán hasta la superficie granular. Para cada nuevo evento, se dispersó la arena para evitar la compactación del sistema, se consideró el promedio de 10 repeticiones para cada altura, pudiendo determinar la energía potencial en cada caso, como:

FIGURA 3

Cráter producto de impacto de bola de acero $d=36\text{mm}$, sobre medios granulares de 2.0mm . a) $H=40\text{cm}$, b) $H=50\text{cm}$, c) $H=60\text{cm}$ y d) $H=70\text{cm}$.



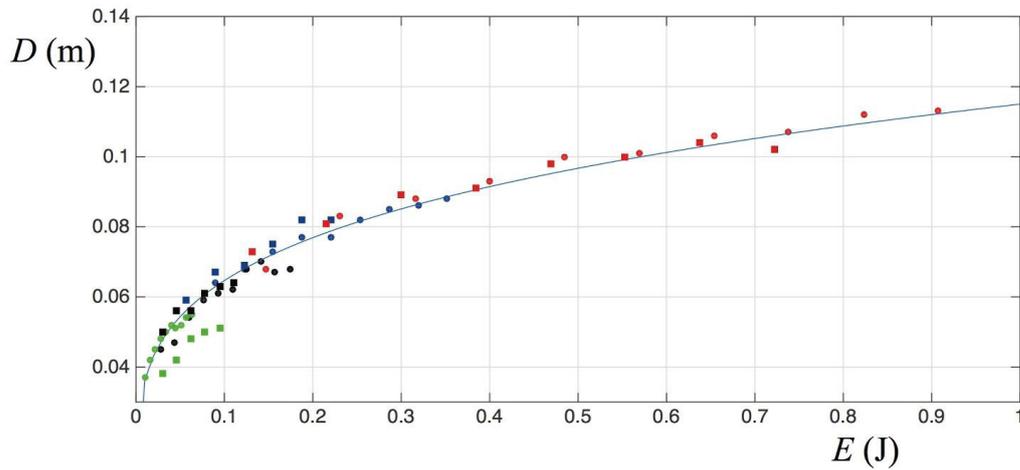


FIGURA 4

Gráfico Energía asociada al impacto vs Diámetro promedio de cráteres para granos de 1.0mm (círculos) y de 2.0 mm (cuadrados), para cada diámetro de proyectil (verde = 15 mm, negro = 20 mm, azul = 26 mm y rojo = 36 mm).

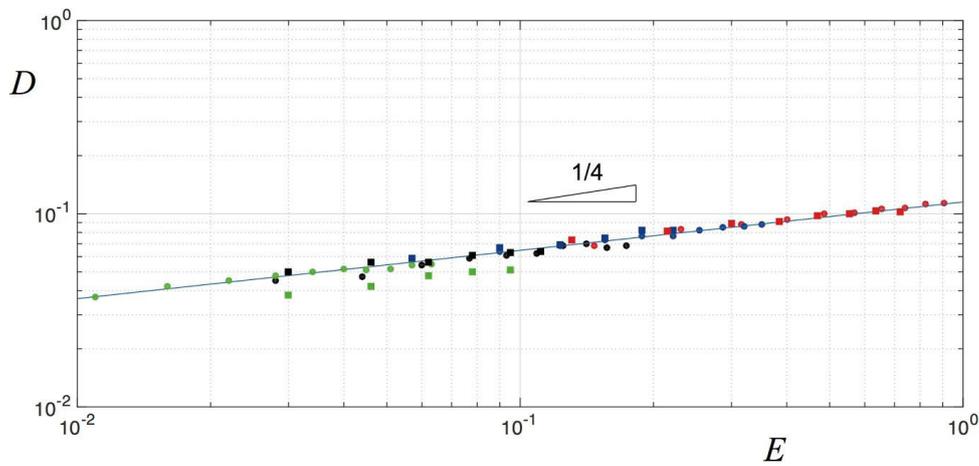


FIGURA 5

Representación log-log de gráfico Energía vs Diámetro de cráteres para granos de 1.0mm (círculos) y de 2.0 mm (cuadrados), para cada diámetro de proyectil (verde = 15 mm, negro = 20 mm, azul = 26 mm y rojo = 36 mm).

CONCLUSIONES

En síntesis podemos concluir dos puntos importantes; el primero está relacionado con que a pesar de usar proyectiles de diferentes tamaños la ley de potencia que relaciona el tamaño del cráter en función de la energía liberada en el impacto, según nuestros experimentos con partículas reales, es concordante con el exponente $\frac{1}{4}$. Un segundo punto aún más interesante es que a pesar de modificar el tamaño de grano del agregado, el exponente continúa siendo el mismo. Esto quiere decir, o confirma que el impacto de proyectiles a baja velocidad en condiciones de laboratorio sigue siendo dominado solo por la altura desde la cual se arroja el proyectil por sobre la geometría o facetas del granular.

BIBLIOGRAFÍA

- Clark A. H., Petersen A. J. and Behringer R. P. 2014. Collisional model for granular impact dynamics. *PHYSICAL REVIEW E* 89, 012201. DOI 10.1103/PhysRevE.89.012201.
- De Vet S. J. and De Bruyn J. R. 2007. Shape of impact craters in granular media. *PHYSICAL REVIEW E* 76, 041306. DOI 10.1103/PhysRevE.76.041306.
- Galilei G. 1610. *Sidereus nuncius*. Tomás Baglioni, Venecia.
- Uehara J. S., Ambroso M. A., Ojha R. P. and Durian D. J. 2003. Low-Speed Impact Craters in Loose Granular Media. *PHYSICAL REVIEW L* 90, 194301.
- Erratum *Phys. Rev. Lett.* 91, 149902 (2003)
- Umbanhowar P., Goldman D. I. 2010. Granular impact and the critical packing state. *PHYSICAL REVIEW E* 82, 010301R. DOI 10.1103/PhysRevE.82.010301.
- Zheng X. J., Wanga Z. T. and Qiu Z. G. 2004. Impact craters in loose granular media. *Eur. Phys. J. E* 13, 321–324. DOI 10.1140/epje/i2004-10002-8.