

# ¿Por qué estudiar la física de gotas?

**Miguel Ángel Quetzeri Santiago**

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Circuito Exterior S. N. Ciudad Universitaria, CP 04510, CDMX, México  
[mquetzeri@materiales.unam.mx](mailto:mquetzeri@materiales.unam.mx)

## Resumen

En este artículo exploramos la intrigante ciencia detrás de las gotas de agua y otros líquidos. Desde Leonardo da Vinci, quien las estudiaba detenidamente y hacía bosquejos con papel y lápiz, hasta el desarrollo de cámaras de alta velocidad, exponemos cómo se ha estudiado la física de gotas a través de la historia. Además, mostramos cómo el estudio del impacto de gotas nos sirve para optimizar tecnologías como la impresión por inyección de tinta, la creación de ropa impermeable y el diseño de estrategias para prevenir salpicaduras no deseadas. Las gotas se encuentran a nuestro alrededor, en todo momento, y para estar presentes en todo momento sabemos poco de ellas. Espero que este artículo pueda clarificar algunos de los fenómenos y aplicaciones que tienen la basta y fascinante física de las gotas.

## Palabras clave:

gotas, salpicaduras, impresión, ropa impermeable.

Cuando me encuentro en una reunión familiar o con amigos que no están en el ámbito científico y me preguntan acerca de mi investigación tiendo a responder que:

“Me dedico a estudiar gotas, física de gotas”. Su cara siempre es de sorpresa y me preguntan: ¿Cómo que gotas?, ¿de qué?, ¿por qué y para qué sirve eso? Este artículo está diseñado precisamente para responder a esas personas que se preguntan sobre la importancia de la física de gotas. Espero que, al finalizar su lectura, no solo comprendan mejor este fascinante mundo, sino que también compartan un poco de mi interés por las gotas y su interacción con distintas superficies.

Las gotas están presentes en nuestra vida diaria, prácticamente en todo momento. Cuando abrimos el grifo para lavarnos las manos o los trastes se genera un chorro de agua, mismo que a partir de cierta distancia se romperá en gotas (figura 1a). En la ducha vemos como las gotas caen al piso y salpican. Cuando llueve, múltiples gotas caen sobre nosotros, y si no tenemos la ropa adecuada acabaremos mojados. Además, el agua de lluvia puede erosionar el suelo y facilitar la transmisión de enfermedades entre las plantas. Igualmente, si ponemos atención podemos diferenciar el sonido de la lluvia: si impacta en una superficie sólida (“splash”) o en una líquida, como una alberca o un vaso con agua (“plop”). Pero, ¿por qué debería-

mos interesarnos en la física de las gotas? En este artículo empezaré con un poco de la historia de la física de gotas y desarrollaré hasta llegar a la época actual, centrándome en su impacto en diversas superficies y ejemplificando cómo estas interacciones se traducen en aplicaciones innovadoras.

## Un poco de historia

Dado lo común que es para las personas interactuar con gotas de agua, estudiarlas con detenimiento se remonta hasta la época de Leonardo da Vinci, en el Códice de Leicester [1] (figura 1 b). Da Vinci estudió la “cohesión” de diferentes fluidos y su influencia en la generación de gotas. Lo que da Vinci describía como cohesión, hoy lo conocemos como tensión superficial, un concepto fundamental al hablar de gotas. La tensión superficial de un líquido se refiere a la fuerza por unidad de área que actúa en su superficie. Esta fuerza es la que permite a ciertos insectos mantenerse sobre el agua y a los gecos (un tipo de reptil) caminar sobre su superficie [2]. Lord Rayleigh, en el siglo XIX, demostró que entre mayor sea la tensión superficial de un líquido, es más fácil que un chorro se fragmente en gotas [3,4]. Lo anterior es porque la superficie que minimiza la energía de un líquido rodeado solo por aire es una esfera, es decir, una gota. Si un líquido se encuentra en cualquier otra configuración tratará de formar una esfera, haciéndolo más rápido entre más grande sea su tensión superficial. A finales del siglo XIX, Worthington, con la invención de la cámara fotográfica pudo estudiar con más detalle los impactos de gotas en diferentes superficies [5]. Sin embargo, estos fenómenos se desarrollan en un par de milésimas de segundo, más rápido que un parpadeo promedio (100 milésimas de segundo). Fue solo con el desarrollo de la fotografía de

alta velocidad cuando los más intrincados detalles pudieron ser capturados. Harold Edgerton, un pionero en esta técnica, creó imágenes que no solo son científicamente esclarecedoras sino también estéticamente placenteras, algunas de las cuales ahora se exhiben en galerías de arte (figura 1c).

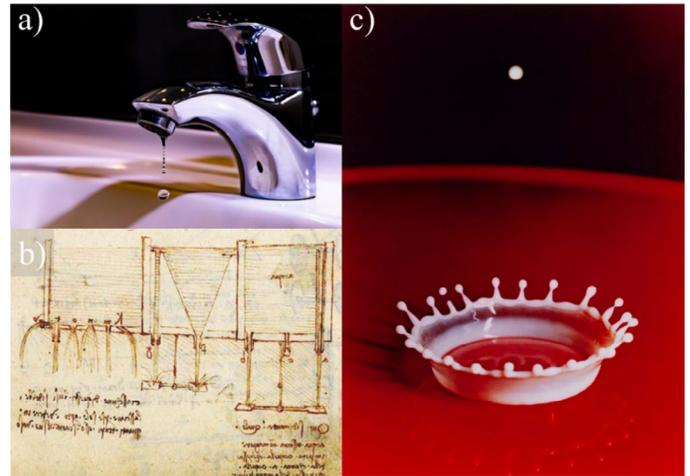


Figura 1. a) Chorro de agua saliendo de un grifo y rompiéndose en gotas (imagen tomada de Google). b) Dibujo de Leonardo Da Vinci del Código Leicester, en donde estudia la “cohesión” de líquidos (figura tomada del Códice de Leicester- Librería Nacional de España). c) Foto de Harold E. Edgerton de una gota de leche impactando un charco (Harold Eugene Edgerton, Milk Drop Coronet, 1957, dye transfer print, 50.5 cm x 40.64 cm (SFMOMA)).

## Impacto de gotas en superficies sólidas

Actualmente, el impacto de gotas ha cobrado un papel esencial en el desarrollo de tecnologías. Desde la impresión por inyección de tinta e impresión 3D hasta el rocío de fertilizantes en las plantas, pasando por la soldadura de piezas electrónicas [6,7]. En todas las aplicaciones mencionadas es crucial comprender cómo se comportan las gotas al impactar superficies. Ya sea en la impresión por inyección, donde necesitamos que las gotas se esparzan controladamente y se adhieran a la superficie, o en situaciones como la lluvia, donde queremos que las gotas no se adhieran para mantenernos secos o evitar estancamientos.

Abordar estos fenómenos puede ser un desafío, ya que, como mencionaba anteriormente, el impacto de gotas dura unas cuantas milésimas de segundo. Afortunadamente, gracias a avances como las cámaras de alta velocidad que pueden grabar hasta un millón de cuadros por segundo (las cámaras convencionales graban a sesenta), hemos podido captar con detalle y precisión estos eventos fugaces. Gracias a estos avances se han encontrado diversos resultados, después del impacto de una gota en una superficie sólida. Dependiendo de factores como el tamaño de la gota, su tensión superficial y viscosidad, la gota puede esparcirse y depositarse en la superficie, rebotar o incluso fragmentarse en gotas secundarias, generando salpicaduras [7]. Sorprendentemente, la presión atmosférica es relevante para que una gota salpique o no [8]. Por ejemplo, si una gota salpicara en la base del monte Everest, no salpicaría en la punta, solo porque la presión atmosférica es menor.

Además, las propiedades de la superficie juegan un papel importante [9]. La humectabilidad, es decir, la capacidad de una superficie para atraer o repeler un líquido, desencadena una serie de comportamientos. Por ejemplo, una superficie hidrofóbica, como las hojas de loto (figura 2a), permite que las gotas se muevan con facilidad y sean fáciles de eliminar. Por otro lado, una superficie hidrofílica, como el vidrio, hace que el agua se adhiera a ella. El ángulo que forma la gota de agua con la superficie nos indica si es hidrofóbica o hidrofílica. Si el ángulo es mayor a 90 grados, la superficie es hidrofóbica y si es menor a 90 grados es hidrofílica (figura 2b).

Cuando una gota de agua impacta una superficie hidrofílica, la gota se esparcirá

y se depositará. En contraste, cuando una gota impacta una superficie hidrofóbica la gota se esparcirá, pero intentará regresar a su forma esférica y eventualmente rebotará de la superficie. Al aumentar la velocidad de impacto la gota puede incluso salpicar. Encontrar la velocidad crítica a la cual una gota salpica o rebota es esencial para diseñar estrategias que faciliten o eviten el rebote y salpicaduras (en aplicaciones para la industria de recubrimientos y la aviación, por ejemplo). En la primera, es crucial que las gotas de pintura o se depositen eficazmente sobre las superficies para evitar el desperdicio de material y prevenir que acabe en lugares no deseados. Del mismo modo, en el diseño de aviones, es fundamental que las gotas de lluvia no se acumulen en las superficies, ya que esto podría aumentar el peso de la aeronave, resultando en un mayor consumo de combustible.

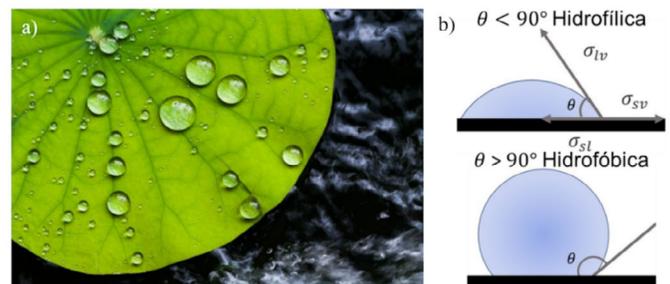


Figura 2. a) Hoja de loto con gotas en su superficie. Las gotas se mantienen considerablemente esféricas, ya que la superficie es hidrofóbica (imagen tomada de Google). b) Ángulo de contacto en una superficie hidrofílica (arriba) y una hidrofóbica (abajo).

En la búsqueda constante para fabricar superficies resistentes al agua se han desarrollado diversas estrategias innovadoras. Una de ellas es la incorporación de estructuras a nivel milimétrico, inspiradas en la evolución de las mariposas, que les permite mantenerse secas bajo la lluvia [10, 11] (figura 3d). Además, es posible modificar las superficies a nivel químico para lograr propiedades hidrofóbicas. Por otro lado, también se pue-

den alterar las propiedades de las gotas en sí mismas. Se han explorado enfoques como la adición de sustancias químicas, como sales o jabón, conocidas como surfactantes, que reducen la tensión superficial del líquido. Esta reducción en la tensión superficial conlleva a una disminución del ángulo de contacto de la gota con la superficie. Sin embargo, la eficacia de los surfactantes puede ser limitada en situaciones cuando la velocidad de impacto es muy alta [12, 13].

Para superar estas limitaciones se han desarrollado métodos más sofisticados que involucran campos eléctricos. Al aplicar un voltaje a la superficie se logra reducir el ángulo de contacto y, al retirar el voltaje, este regresa a su posición original. Estos sistemas eléctricos se han utilizado con éxito para controlar el movimiento de las gotas, desplazándolas de un lugar a otro, mezclándolas o incluso previniendo salpicaduras y rebotes no deseados [14] (figura 3 b).

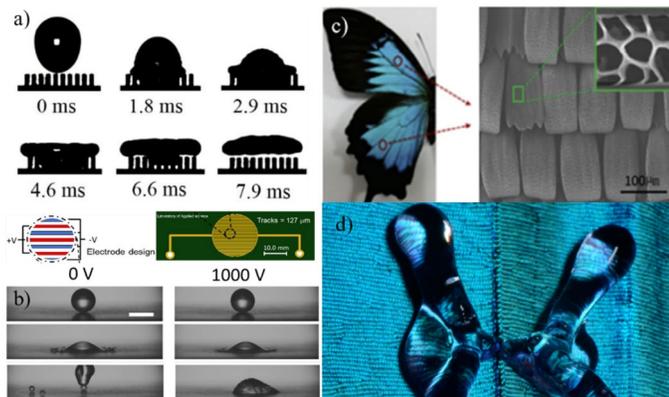


Figura 3. a) Postes micrométricos que facilitan que la gota rebote (Imagen adaptada de la referencia 8). b) Campos eléctricos en la superficie pueden controlar la adhesión de una gota. c) Microestructura en las alas de una mariposa (Imagen adaptada de la referencia 9). d) Impacto de una gota en las alas de una mariposa (Imagen tomada de <https://www.sciencenews.org/article/how-butterflies-stay-dry#:~:text=WATERPROOF%20As%20a%20water%20droplet,than%20a%20smooth%20surface%20would>).

## Impacto de gotas en textiles

Otro aspecto fundamental de la investigación en la física de las gotas se centra en su interacción con materiales textiles. Más allá de lo que hemos explorado en términos de impacto en superficies sólidas, es crucial comprender cómo las gotas pueden interactuar con los textiles. Este tipo de investigación no solo es relevante para comprender la dinámica de las manchas en prendas, sino que también tiene aplicaciones en la reconstrucción de escenas forenses. En tales estudios, la forma de las manchas de líquidos en textiles puede proporcionar pistas sobre el momento y circunstancias en que ocurrieron ciertos eventos [15].

Además, se han desarrollado tejidos especiales que pueden capturar agua de la niebla y la humedad del ambiente. Esta tecnología tiene aplicaciones prácticas, especialmente en áreas donde la lluvia es escasa. Por ejemplo, estos tejidos pueden utilizarse para recolectar agua potable en regiones áridas [16].

La investigación de impacto de gotas en textiles también tiene un impacto directo en el desarrollo de ropa resistente al agua, así como en la prevención de la propagación de enfermedades respiratorias como el Covid-19, que se transmiten a través de las gotas [17, 18]. Estudios recientes han identificado dos modos de penetración cuando una gota impacta un material textil [19]. En la penetración parcial, la gota atraviesa el tejido, pero gran parte de su volumen es absorbido por la capa superior del material, quedando retenida por este. En el caso de la penetración completa, la gota penetra en el tejido y forma filamentos en la parte inferior, que eventualmente se rompen en

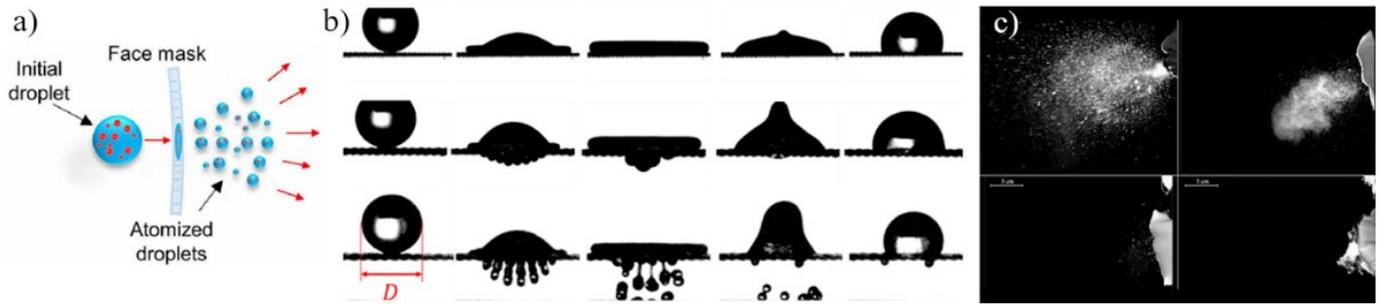


Figura 4. Ejemplos de gotas impactando textiles. a) Esquema del funcionamiento de una mascarilla (Imagen adaptada de la referencia 12). b) Gota impactando textiles, sin penetración (arriba), penetrando parcialmente (en medio) y totalmente (abajo). c) Disminución de la expulsión de gotas al estornudar mediante el uso de mascarillas (Imagen adaptada de <https://www.dailymail.co.uk/news/article-8553491/Video-reveals-homemade-masks-TWO-layers-fabric.html>).

gotas secundarias. Si una gota atraviesa (o no) completamente el tejido depende de varios factores, como la velocidad de impacto, el tamaño y la tensión superficial de la gota, el tamaño de la malla del tejido y su rigidez [19, 20]. En términos simples, es más probable que una gota atraviese un tejido estirado y rígido en comparación con uno que pueda deformarse, ya que la deformación dispersa la energía cinética del impacto de la gota. Los resultados sugieren que, para una típica gota de lluvia que impacta en un tejido rígido, se requeriría una trama de aproximadamente  $100\ \mu\text{m}$  (similar al grosor de un cabello humano) para evitar la penetración.

## Recapitulación

En resumen, la física de las gotas y su impacto en diversas superficies es un campo de investigación fascinante y relevante en nuestra vida cotidiana. Desde mentes curiosas como la de Leonardo da Vinci, hasta los avances tecnológicos de la fotografía de alta velocidad de Harold Edgerton, se ha contribuido a revelar los secretos de estas pequeñas maravillas. El estudio de cómo las gotas interactúan con superficies sólidas y textiles no solo nos ha permitido desarrollar tecnologías innovadoras, como la impresión por inyección de tinta y ropa

impermeable, sino también ha desempeñado un papel fundamental en la prevención de enfermedades y la optimización de sistemas agrícolas. En un mundo donde las gotas son tan omnipresentes, entender su comportamiento es clave para resolver desafíos y mejorar nuestra calidad de vida. Así que la próxima vez que veas una gota de lluvia caer o una impresora de inyección de tinta en acción, recuerda que detrás de ese simple acto hay un fascinante mundo de ciencia e innovación en constante evolución.

## Agradecimientos

A la DGAPA por el apoyo a través del subprograma de Incorporación de Jóvenes Académicos de Carrera (SIJA).

## Referencias

- [1] Da Vinci, L. (2012). The notebooks of Leonardo da Vinci (Vol. 1). Courier Corporation.
- [2] Nirody, Jasmine A., et al. "Geckos race across the water's surface using multiple mechanisms." *Current Biology* 28.24 (2018): 4046-4051.
- [3] Rayleigh, L. (1878). On the instability of jets. *Proceedings of the London mathematical society*, 1(1), 4-13.
- [4] Rayleigh, L. (1879). On the capillary phenomena of jets. *Proc. R. Soc. London*, 29(196-199), 71-97.
- [5] Worthington, A. M. (1881). On Impact with a Liquid Surface. *Proceedings of the Royal Society of London*, 33, 347-349.
- [6] Quetzeri-Santiago, M. A., Hedegaard, C. L., & Castrejón-Pita, J. R. (2019). Additive manufacturing with liquid latex and recycled end-of-life rubber. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(3), 149-157.

- [7] Meza-Alarcon, K. L., Quetzeri-Santiago, M. A., Neri-Flores, M. A., del Río, J. A., & Castrejón-Pita, J. R. (2023). Splashing of Sn–Bi–Ag solder droplets. *Physics of Fluids*, 35(8).
- [7] Yarin, A. L. (2006). Drop impact dynamics: Splashing, spreading, receding, bouncing.... *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 38, 159-192.
- [8] Xu, L., Zhang, W. W., & Nagel, S. R. (2005). Drop splashing on a dry smooth surface. *Physical review letters*, 94(18), 184505.
- [9] Quetzeri-Santiago, M. A., Yokoi, K., Castrejón-Pita, A. A., & Castrejón-Pita, J. R. (2019). Role of the dynamic contact angle on splashing. *Physical review letters*, 122(22), 228001.
- [10] Liu, Y., Moevius, L., Xu, X., Qian, T., Yeomans, J. M., & Wang, Z. (2014). Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces. *Nature physics*, 10(7), 515-519.
- [11] Bird, J. C., Dhiman, R., Kwon, H. M., & Varanasi, K. K. (2013). Reducing the contact time of a bouncing drop. *Nature*, 503(7476), 385-388.
- [12] Hoffman, H., Sijts, R., de Goede, T., & Bonn, D. (2021). Controlling droplet deposition with surfactants. *Physical Review Fluids*, 6(3), 033601.
- [13] Varghese N., Sykes, T. C., Quetzeri-Santiago, M. A., Castrejón-Pita, A. A., & Castrejón-Pita, J. R. (2024). Effect of surfactants on the splashing dynamics of drops impacting smooth surfaces. *Langmuir* (aceptado), doi: 10.1021/acs.langmuir.3c03248.
- [14] Quetzeri-Santiago, M. A., Castrejón-Pita, J. R., & Castrejón-Pita, A. A. (2021). Controlling droplet splashing and bouncing by dielectrowetting. *Scientific Reports*, 11(1), 21410.
- [15] Williams, E. M., Dodds, M., Taylor, M. C., Li, J., & Michielssen, S. (2016). Impact dynamics of porcine drip bloodstains on fabrics. *Forensic science international*, 262, 66-72.
- [16] Qadir, M., Jiménez, G. C., Farnum, R. L., & Trautwein, P. (2021). Research history and functional systems of fog water harvesting. *Frontiers in Water*, 3, 675269.
- [17] Sharma, S., Pinto, R., Saha, A., Chaudhuri, S., & Basu, S. (2021). On secondary atomization and blockage of surrogate cough droplets in single-and multilayer face masks. *Science advances*, 7(10), eabf0452.
- [18] Mittal, R., Breuer, K., & Seo, J. H. (2023). The Flow Physics of Face Masks. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 55, 193-211.
- [19] Zhang, G., Quetzeri-Santiago, M. A., Stone, C. A., Botto, L., & Castrejón-Pita, J. R. (2018). Droplet impact dynamics on textiles. *Soft matter*, 14(40), 8182-8190.
- [20] Kooij, S. A., Moqaddam, A. M., de Goede, T. C., Deroome, D., Carmeliet, J., Shahidzadeh, N., & Bonn, D. (2019). Sprays from droplets impacting a mesh. *Journal of Fluid Mechanics*, 871, 489-509.