

## 15. Ciencias e Ingeniería de Materiales

### **Efecto de vibraciones verticales en la mojabilidad de una superficie sólida**

Candia, Nicolas; Josue, Meneses; Gaete, Luis; Vargas, Yolanda;  
nicolas.candia@usach.cl; josue.meneses@usach.cl; luis.gaete@usach.cl;  
yolanda.vargas@usach.cl

Laboratorio de Ultrasonidos, Departamento de Física,  
Universidad de Santiago de Chile

#### **Resumen**

Una gota de líquido en contacto con una superficie sólida adquiere una forma de equilibrio que depende de su mojabilidad, es decir, la interacción entre las tres interfaces involucradas; sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-vapor. En una superficie vibrante; una gota de agua ha mostrado un aumento de su mojabilidad, cambiando su forma de equilibrio y manteniendo su volumen constante. El aumento de la mojabilidad es estudiada mediante análisis de imágenes, midiendo la evolución temporal del radio y el ángulo de contacto de una gota de agua colocada sobre una superficie sólida que vibra verticalmente. Las imágenes se han capturado con una cámara rápida. Los resultados experimentales muestran que la expansión de la gota aumenta a medida que aumenta la amplitud de vibración de la superficie. Nosotros pensamos que esto se debe a un balance positivo de la fuerza capilar entre las sucesivas expansiones y contracciones de la gota de agua que favorece la expansión de ésta sobre la superficie sólida.

**Palabras clave:** Mojabilidad, tensión superficial, ángulo de contacto, expansión, gota.

#### **Introducción**

Si una gota de agua es depositada sobre una superficie sólida, la forma que adopte dependerá de la afinidad que exista entre las moléculas de las interfaces presentes: sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-vapor. La línea donde se encuentran las tres fases se

denomina línea de contacto (Chen et al. 2013; Fries and Dreyes 2008; Gennes 1985; Marmur 1983; Yildirim Erbil 2014) y corresponde a la circunferencia que describe una gota de agua sobre un sólido y a la mitad de la longitud de la interface sólido-líquido se denomina radio de contacto (Gennes 1985; Dussan 1979). Por otro lado, la gota de agua puede

experimentar diferentes grados de expansión. Cuando la expansión es alta se dice que la superficie es hidrofílica; hay afinidad entre la superficie y la gota de líquido. El caso contrario describe un comportamiento hidrofóbico. Un criterio para definir si la superficie es más o menos hidrofílica consiste en determinar el ángulo de contacto y puede ser relacionada con las energías de superficie asociadas a las interfaces por medio de la ecuación de Young  $\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$  (Young 1805). Si el ángulo de contacto es menor a  $90^\circ$  entonces la mojabilidad es favorecida y se puede pensar en una superficie hidrofílica. Por otro lado, si el ángulo de contacto es mayor a  $90^\circ$ , la mojabilidad es desfavorecida y se puede clasificar la superficie como hidrofóbica (Gennes 1985; Yildirim Erbil 2014). Por lo tanto, mientras menor sea el ángulo de contacto, mayor mojabilidad presenta el líquido sobre una superficie sólida. Esto es de gran interés cuando se desea que el menor volumen de un líquido cubra la mayor superficie posible de un sólido, y el interés crece si el líquido es de alto costo o de difícil obtención. Aplicaciones industriales y tecnológicas, tales como, lubricación de piezas, impresión, pintado, teñido, recubrimiento con adhesivos o análisis químico tienen mucho interés en el aumento de la mojabilidad. Hay algunas técnicas químicas para aumentar la mojabilidad de un líquido como, por ejemplo, agregar surfactantes, esto

disminuye la energía superficial asociada a la interface líquido-vapor, produciendo que el líquido que está en equilibrio pierda este estado debido a un desbalance en las tensiones en la línea de contacto de las tres fases, la gota se expande hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio, teniendo como resultado un menor ángulo de contacto y un aumento en el radio de contacto. Otra forma de aumentar la mojabilidad de un líquido, sin la necesidad de usar surfactantes, es depositar el líquido sobre la superficie sólida que se desea mojar desde cierta altura, utilizando la energía potencial de la gota para obtener una mayor expansión sobre una superficie sólida (Bonn et al. 2009; Chen and Bonaccorso 2014; Laan et al. 2014). Estas técnicas presentan inconvenientes, tales como, la modificación química del fluido al adicionar surfactantes o la separación de gotas por impacto.

Por otro lado, la forma de la gota de líquido también dependerá tanto de la gravedad como de la tensión superficial. Si la gota es de gran tamaño, por efecto de la gravedad sobre la masa, ésta tenderá a aplanarse, pero si la gota es pequeña, el efecto predominante en su forma estará regido por la tensión superficial del líquido. Existe un criterio para discriminar cuando la gravedad o la tensión superficial predominan en la forma de una gota. Este criterio emplea un parámetro llamado "longitud capilar"  $\kappa$  ( $\kappa = \sqrt{\gamma/\rho g}$ ) (Hoffman 1983). En el caso

del agua, cuando  $\kappa < 2,7$  [mm] la forma de la gota está determinada principalmente por la tensión superficial.

## Objetivos

Determinar la dinámica de una gota de agua sobre una superficie sólida que vibra verticalmente para 2 frecuencias de 5 y 38 [kHz].

## Materiales y Métodos

Para determinar el cambio del radio y ángulo de contacto de una gota de agua des ionizada de 1 y 2 [ $\mu$ l] sujeta a vibraciones verticales en un rango de frecuencias entre 5 y 60 [kHz], generadas por un transductor piezoeléctrico que es alimentado con una señal sinusoidal generada por un generador de onda arbitraria (Agilent 4294A). La señal de

alimentación es amplificada por un amplificador (AE Techron 7224). La gota es depositada sobre una superficie de titanio acoplada a la punta del amplificador mecánico del transductor. Esto se logra utilizando una micro-pipeta acoplada a un posicionador micrométrico, de tal forma de colocar la gota en el mismo lugar en cada ensayo con el fin de reproducir las mismas condiciones iniciales; mismo radio y ángulo de contacto. Se emplearán las imágenes adquiridas por una cámara rápida (Phantom M310) para determinar la evolución temporal del radio y ángulo de contacto, mediante un algoritmo desarrollado en MATLAB. En la figura 1 se muestra un esquema del sistema experimental con el que se adquieren las imágenes usando la cámara rápida.

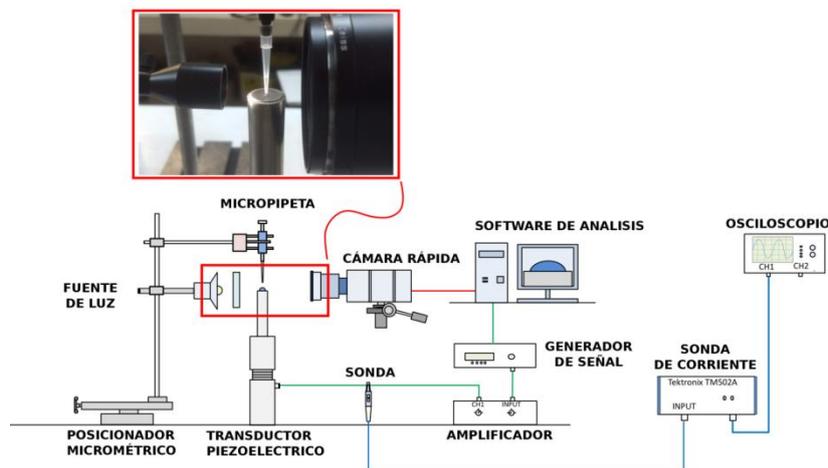


Figura 1. Esquema del montaje experimental para la adquisición de imágenes de una gota de agua sometida a vibraciones verticales.

La determinación del radio de contacto, ángulo de contacto, altura y radio de curvatura de una gota de agua es

realizada utilizando análisis de imágenes. Para el ángulo de contacto fue necesario desarrollar diferentes algoritmos en

MATLAB. La primera acción sobre las imágenes consiste en poner las figuras en formato binario. Para las determinaciones más específicas se utilizan dos enfoques distintos. El primero, consiste en calcular el ángulo de contacto suponiendo que la gota, a medida que se expande, mantiene su forma de cascarn esférico. Además, se supone que la superficie de la gota es lisa, despreciando la amplitud de las ondas superficiales en la interface líquido-vapor. En esta situación el algoritmo traza la mejor circunferencia a partir de los pixeles detectados en la interface líquido-vapor (figura 2). A partir de esta circunferencia se determina el radio de curvatura de la gota. Por otra parte, el algoritmo es capaz de calcular el radio de contacto y la altura de la gota, donde el radio de contacto corresponde a la mitad de la longitud de la interface sólido-líquido y la altura a la máxima distancia entre la interface sólido-líquido y líquido-vapor. Una vez conocida la altura, radio de contacto y radio de curvatura, se calcula el ángulo de contacto utilizando la función arco coseno (figura 2).

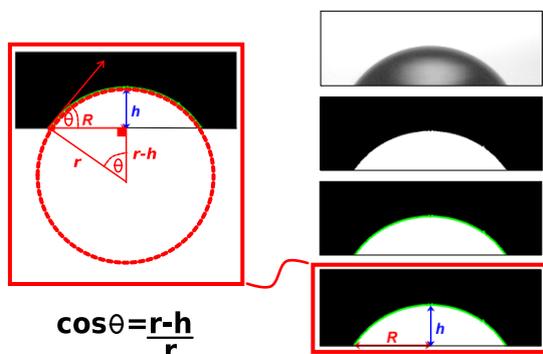


Figura 2. Esquema del método de detección del ángulo de contacto, radio de

contacto y altura de una gota de agua de 1 [μl].

El segundo enfoque utilizado para calcular el ángulo de contacto, es suponer que, debido a las vibraciones verticales del sustrato sólido, cambia continuamente por la existencia de ondas capilares producidas en la interface líquido-vapor. Para ello se selecciona una región alrededor del punto de contacto de las tres fases y se supone que el ángulo de contacto se puede modelar como un triángulo rectángulo donde el cateto opuesto e hipotenusa van cambiando a medida que la gota se expande, mientras que el cateto adyacente es fijo (figura 3).

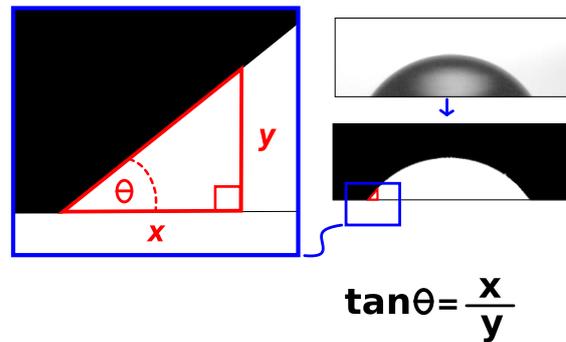


Figura 3. Presentación esquemática del método de detección del ángulo de contacto de una gota de agua de 1 [μl] modelado como un triángulo rectángulo.

Para expresar el radio de contacto, altura y radio de curvatura de una gota al aplicar los algoritmos previamente expuestos en unidades físicas correctas (longitud), es necesario determinar la resolución espacial, debido a que las imágenes están expresadas en pixeles. Para esto se utiliza una regla patrón. La resolución espacial se calcula determinando el número de pixeles

necesarios para cubrir la distancia de un milímetro, distancia entre los centros de dos ranuras sucesivas (figura 4). La resolución que se utilizará en este trabajo es de 4 [ $\mu\text{m}/\text{px}$ ] y corresponde a la máxima resolución posible de obtener con el montaje utilizado.

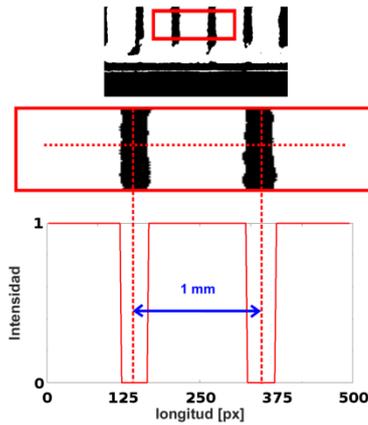


Figura 4. Determinación de la resolución espacial utilizada en la

adquisición de imágenes correspondiente a 4 [ $\mu\text{m}/\text{px}$ ].

## Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados para la evolución del radio y ángulo de contacto para una gota de agua de 1.0 y 2.0 [ $\mu\text{l}$ ], para diferentes amplitudes de vibración y 2 frecuencias, (4655 y 37423 Hz).

En la figura 5 observamos la evolución temporal del radio y ángulo de contacto ( $\theta$ ) de una gota de agua de 1.0 y 2.0 [ $\mu\text{l}$ ] sobre un sustrato sólido al aplicar 5 diferentes amplitudes de vibración durante 1 [s].

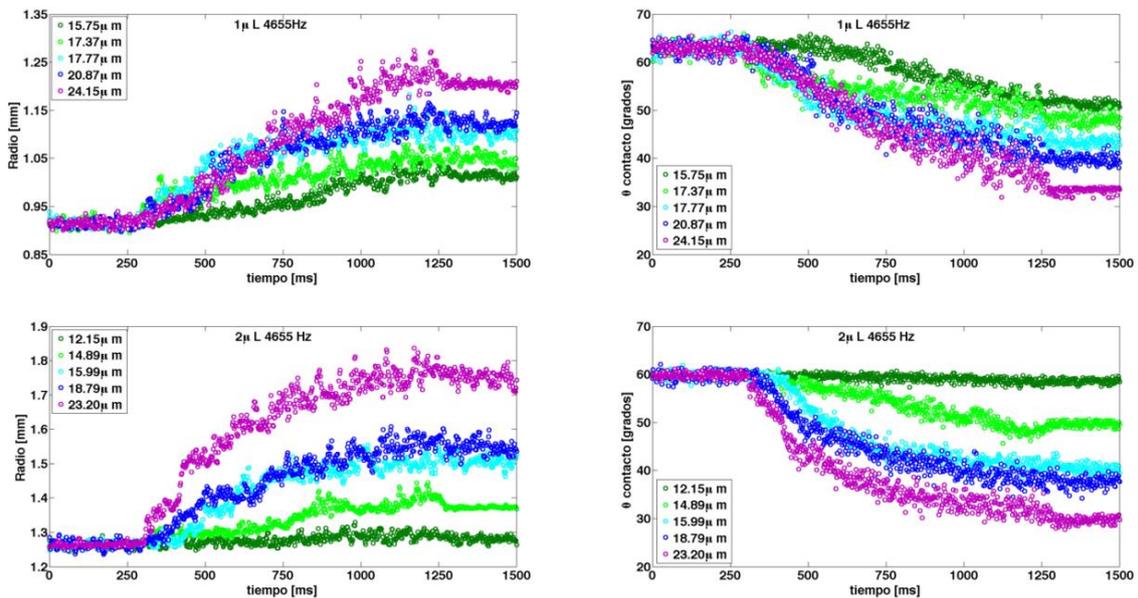


Figura 5. Evolución temporal del radio y ángulo de contacto de una gota de agua de 1.0 y 2.0 [ $\mu\text{l}$ ] depositada sobre un sustrato sólido al aplicar vibraciones verticales a 4655 [Hz].

Podemos observar que el radio y ángulo de contacto cambian entre los 250 y 1250 [ms]. Para el radio de contacto, se observa que la expansión aumenta a medida que aumenta la amplitud de vibración, mientras que, el ángulo de contacto disminuye. Otro aspecto interesante es que después de dejar de aplicar vibraciones, alrededor de los 1250

[ms], la gota experimenta una pequeña contracción, es decir, existe una pequeña reducción en el valor del radio de contacto. El comportamiento antes descrito es observado nuevamente para una gota de agua de 2.0 [μl] como se muestra en la figura 5.

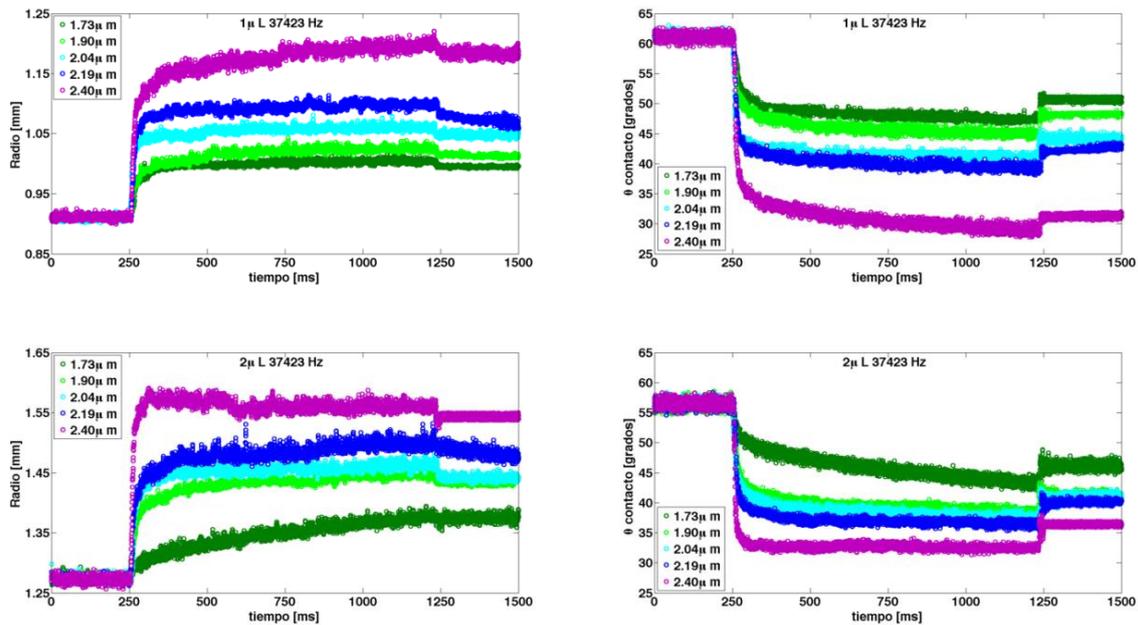


Figura 6. Evolución temporal del radio y ángulo de contacto de una gota de agua de 1.0 y 2.0 [μl] depositada sobre un sustrato sólido al aplicar vibraciones verticales a 37423 [Hz].

En la figura 6 observamos la evolución del radio y ángulo de contacto ( $\theta$ ) para una gota de agua de 1.0 y 2.0 [μl] al aplicar diferentes amplitudes de vibración. En este caso la frecuencia de vibración corresponde a 37423 [Hz]. Podemos observar, tanto para 1.0 y 2.0 [μl], un aumento del radio de contacto y una disminución del ángulo de contacto a medida que aumenta la amplitud de vibración. Además, una vez que dejamos

de aplicar las vibraciones, la gota experimenta una pequeña contracción, es decir, una disminución del radio de contacto y un aumento del ángulo de contacto hasta alcanzar un nuevo equilibrio, comportamiento que también ha sido observado como se muestra en la figura 5.

Los resultados antes expuestos (figura 5 y 6) nos dan una idea de cómo se expande una gota de agua sobre un

sustrato sólido al aplicar vibraciones verticales. Podemos suponer en primera instancia que la expansión es proporcional a la amplitud de vibración, en cambio el ángulo de contacto es inversamente

proporcional a la amplitud de vibración. La gota a medida que se expande, aumenta su radio de contacto y disminuye su ángulo de contacto, manteniendo un volumen constante.

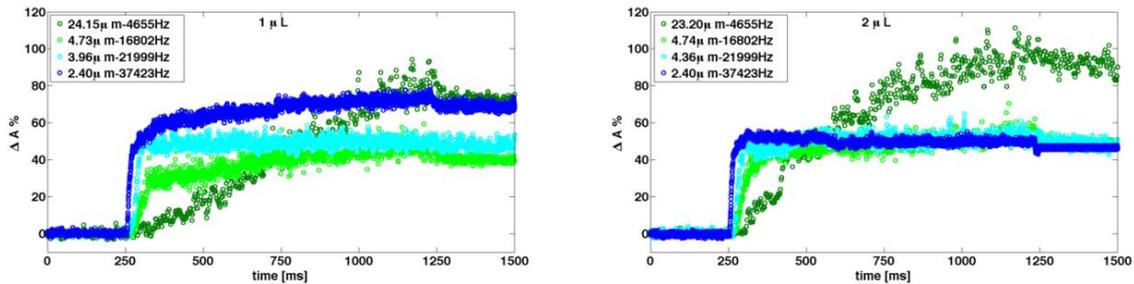


Figura 7. Cambio porcentual del área mojada por una gota de agua de 1.0 y 2.0 [ $\mu\text{L}$ ] al aplicar vibraciones verticales a diferentes frecuencias.

En términos de la mojabilidad de un líquido respecto a una superficie, se dice que mientras menor sea el ángulo de contacto, mejor moja el líquido a la superficie del sustrato sólido. Una forma de aumentar la mojabilidad es usar surfactantes, disminuyendo la tensión superficial de un líquido, pero muchas veces no se desea agregar una sustancia que cambie la composición química del líquido. Los resultados obtenidos para el ángulo de contacto muestran que éste ha disminuido al aplicar vibraciones, siendo posible aumentar la mojabilidad de un líquido respecto a una superficie. Este resultado tiene potenciales aplicaciones industriales, entre éstas se puede considerar el mejoramiento del recubrimiento de superficies por una sustancia líquida, donde se busca cubrir la mayor área usando el menor volumen posible u optimizar el uso de un líquido de

alto costo o de difícil fabricación. Este proceso está involucrado en pintado, impresión, inyección, lubricación, entre otros. Para tener una idea de cuánto podemos aumentar el área mojada por una gota de agua en las condiciones estudiadas, se presenta en la figura 7 un gráfico con el porcentaje del aumento de área mojada para la máxima expansión obtenida para 4 frecuencias y 2 volúmenes en función del tiempo.

En la tabla 1 se presenta un resumen de los resultados presentados en la figura 7. Podemos observar que el aumento del área mojada lograda está entre un 40 y 90%. En la condición que se obtuvo el mayor aumento es para 2.0 [ $\mu\text{L}$ ], 4655 [Hz] y 23.20 [ $\mu\text{m}$ ].

Tabla 1. Cambio porcentual del área mojada por una gota de agua de 1.0 y 2.0 [ $\mu$ l] para la máxima expansión obtenida según las condiciones en estudio.

Volumen [ $\mu$ l]	Frecuencia [Hz]	Amplitud [ $\mu$ m]	Ri [mm]	Rf [mm]	$\Delta A\%$
1.0	4655	24.15	0.914	1.218	73.3
	16802	4.73	0.935	1.079	39.8
	21999	3.96	0.931	1.134	48.3
	37423	2.40	0.910	1.150	69.1
2.0	4655	23.20	1.264	1.767	91.9
	16802	4.74	1.251	1.511	48.9
	21999	4.36	1.265	1.548	47.9
	37423	2.40	1.275	1.573	46.6

Un resultado de la expansión, es el aumento del área mojada por la gota. Esta área puede ser modelada como el área de un círculo con un radio equivalente al radio de contacto de la gota. Además, el área de la superficie de la gota, interface líquido-vapor, también ha aumentado debido a la expansión, la que puede ser modelada como la superficie de una porción de altura  $h$  de una esfera con un radio equivalente al radio de curvatura  $r$ , como se puede apreciar en la figura 2. En ambas situaciones podemos determinar el cambio del área. Es interesante tener una explicación para las diferentes

expansiones encontradas durante la experimentación. Si pensamos en que la gota de agua optimizará el uso de la energía durante la expansión, la interface que más cambie será la que menos resistencia al cambio presente. Para determinar cuál de las interfaces involucradas en el proceso es determinante del grado de expansión de la gota, compararemos el cociente entre el área final e inicial de la interface líquido-vapor con la del cociente entre el área final e inicial de la interface sólido-líquido. Los resultados de esta comparación se presentan en la figura 8.

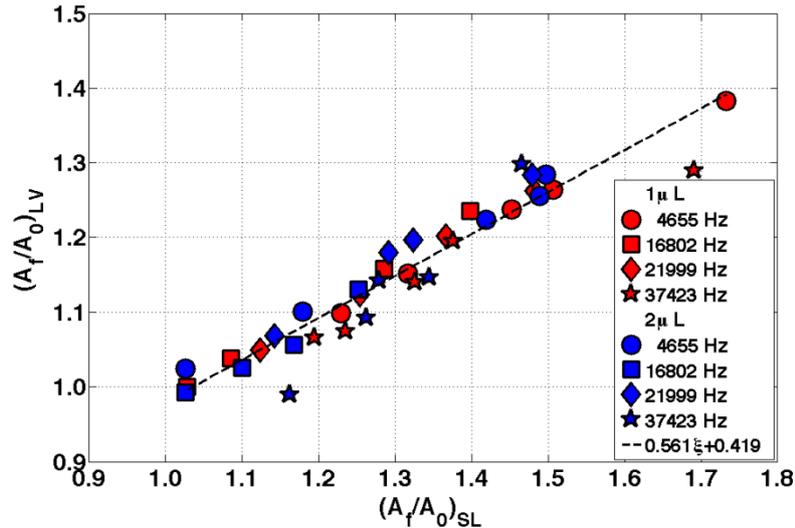


Figura 8. Cociente entre el área final e inicial de la interface líquido-vapor como función del cociente entre el área final e inicial de la interface sólido-líquido de una gota de agua de 1.0 y 2.0 [μl] para 4 diferentes frecuencias.

En la figura 8 hemos encontrado que los datos se ajustan a una relación lineal con un valor de  $R=0.959$

$$\left(\frac{A_f}{A_0}\right)_{LV} = 0.561 \left(\frac{A_f}{A_0}\right)_{SL} + 0.419 \quad (1)$$

La pendiente de la expresión 1 es menor que 1 indicando que la interface sólido-líquido tiene una menor energía superficial en relación a la interface líquido-vapor. La energía superficial  $\gamma_{SL}$  debe ser determinada para cada configuración sólido-líquido debido a que dependerá de la forma en que ha sido tratada mecánica y químicamente la superficie del sustrato sólido.

## Conclusiones

Hemos podido medir la evolución temporal del radio y ángulo de contacto de

una gota de agua de 1.0 y 2.0 [μl] para diferentes amplitudes y frecuencias de vibración utilizando los algoritmos y sistemas experimentales desarrollados.

Hemos podido determinar el cambio de área de la interface sólido-líquido y líquido-vapor en el proceso de expansión. Hemos detectado que, en el proceso de expansión la interface que más cambia es la interface sólido-líquido, por lo tanto, esta interface posee una energía superficial menor comparada con la energía superficial de la interface líquido-vapor.

El aumento del área mojada de un sustrato sólido alcanza valores comprendidos entre un 39.8 y 91.9 % al aplicar vibraciones verticales en un rango de frecuencias de 4655 y 37423 [Hz].

## Agradecimientos

Este trabajo es soportado por CONICYT – PFCHA / Doctorado Nacional / 2016-21160731 y Universidad de Santiago de Chile.

## Bibliografía

Bonn, D., Eggers, J., Indekeu, J., Meunier, J. and Rolley, E. (2009). Wetting and spreading. *Rev. Mod. Phys.*, 81, 739-805

Chen, L. and Bonaccorso, L. (2014). Effects of surface wettability and liquid viscosity on the dynamic wetting of individual drop. *Physica Review E*, 90, 022401,1-9

Chen, L., Bonaccorso, E., Shanahan, M. E. R. (2013). Inertial to viscoelastic transition in early drop spreading on soft surfaces. *Langmuir*, 29, 1893-1898

Dussan, E. B. (1979). On the spreading of liquids on solid surfaces: static and dynamic contact lines. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 11, 371-400

Fries, B. and Dreyer, M. (2008). The transition from inertial to viscous flow in capillary rise. *Journal of Colloid and Interface science*, 327, 125-128

Gennes, P. G. (1985). Wetting: statics and dynamics. *Rev. Mod. Phys.*, 57, 827-863

Hoffman, R. L. (1983). A study of the advancing interface II. Theoretical prediction of the dynamic contact angle in liquid-gas systems. *J. Colloid Interface Sci.*, 94 (2), 470

Laan, N., De Bruin, K. G., Bartolo, D., Josserand, C. and Bonn, D. (2014). Maximum diameter of impacting liquid droplets. *Phys. Review Applied*, 2, 044018

Marmur, A. (1983). Equilibrium and spreading of liquid on solid surfaces. *Adv. Colloids Interface Sci.*, 19, 75-102

Yildirim Erbil, H. (2014). The debate on the dependence of apparent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: A review. *Surface Science Reports*, 69, 325-365

Young, (1805). T. An essay on the cohesion of fluids. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 95, 65-87