

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Coordinación de Programas Educativos

Posgrado en Ciencias

### DR. VICTOR BARBA LÓPEZ COORDINADOR DEL POSGRADO EN CIENCIAS PRESENTE

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "Análisis Tridimensional de Flujos Internos en una Gota de Agua Sésil en Evaporación" que presenta el alumno Javier Andrés Bribiesca Sánchez (10019224) para obtener el título de Maestro en Ciencias.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
Dr. Eduardo Ramos Mora IER-UNAM	APROBADO	
Dr. Juan Manuel Rendón Mancha CInC-UAEM	APROBADO	
Dr. Jorge Hermosillo Valadez CInC-UAEM	APROBADO	
Dr. Jorge Alberto Fuentes Pacheco Cátedra CONACYT CInC-UAEM	APROBADO	
Dr. Gabriel Isaac Corkidi Blanco IBT-UNAM	APROBADO	

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209 Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6011 posgradoenciencias@uaem.mx dvsl\*

Una universidad de excelencia





Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

#### Sello electrónico

#### JUAN MANUEL RENDON MANCHA | Fecha: 2020-09-24 16:18:56 | Firmante

waltGR7+rxF+xQEX6+CgcGxT0mjYEsog74OaosjuKAHZc5qopdmn2n8zt41mJSfFi07YlWsUMRYzzCcUM6h3qBzRuke+4WBglzV+WQrLFq/e92QsOtfYXWF+e2Mni65EGNfBfFw f+G3L+EBC1IgzdxLePIFAL2E/PrDWEDUDpyYgTPEI0wmtFkcDleU9pHaibAexIRHKh6Bs+98tRrJOaLFW+SVMTYpiK2ZIV/o9XTIzbh/yZO8YarLyoEb+mX1vQYmeTsYBKTjD3OjJ +/yhrbo75MDkNBQZ8EDTEBy9cEh4XHM2ItLsf6/OOoPnhx0vWvo4iD/C9thBhEdG8uf+uA==

#### GABRIEL ISAAC CORKIDI BLANCO | Fecha: 2020-09-24 16:54:29 | Firmante

ap0fCeFs+EfPUgeuH31bHdl+h4Wr21LtELuOdcdNoWUVbA3TuqvUnN2Kfnv+35Oz/ebgqbAxqGD16aDq9tZoTUzholWTBiABZRfYjQzop5Vkfi6xiLRlsPiSsRblpazZ93z6l0eZmX8o CM2Nk9qPfJ7P+Qlo5SUKwGfNQT3Bm8j+YUPRF0ynf5laot/oX+RPPePaFsbloWk9pN2e704muJeuFym79a0YfEHquEmh52mno3keyQcqUrenEzIx5NUHrUhiy+B6SHH4d9UYGU djVZ74JgDDwJh1xlxyB88Lrf4BnSkuYY/59HremZqZex8T0alio0RE1xB6wgJJR8pqVQ==

#### JORGE HERMOSILLO VALADEZ | Fecha: 2020-09-24 18:13:05 | Firmante

aP8ypICa79V8J6xygNaj5KUAMtdEevuSM9AA9d8MMt0EWUqF/AIKEVIr8rHii6vKkpPeDSW4Uos3/8GUEpkoTzj78bERo/9x/TVSUAinVcArPDWEh4p5pHt50NDm3TqWw0PUMB Y3YdV8KlwPBTEk3D6Xfn4bEoFoZT10EnsoExZfpVCj0BnZD2d3QbnXuiZ8XVd/fw/o2kiYSZmTgtgdH3bjj2ygpTzbNAxgg9+u2ZDCxq+ZXxRL0vGjx/aea16hX3R5E7dWxbV4e7Xj JQN1gRajp9hN24ohPLkE26UC5DwtseNFMF042YjmmWNWxavlwZx/rv8NpAQRQDfRrTLLpA==

#### JORGE ALBERTO FUENTES PACHECO | Fecha: 2020-09-24 18:51:52 | Firmante

TastrgB950DkjbyFn3UFuFoJEMMYiHtfDUnXJ5rv+j7Xr4FL48Bz+PzF5BzEFonzQYEzI+ETwcNUkwbjHMzWxqjfw6lwj2bIP5qAdiFLmPVhCJXOsR4GbVSNj3kKd9oXkbGam/lXDIj mKZ+q4TGdRax6aJjBe4/Jj83avPuv3A84aui9obR0LSvo2Nj1aUEgIVKNVAuaWfV2kyA/X5d9Rk6Cs/TyW96OwA9rR22c5A7OYM7SNz8bSF05jKW2hLETsG/6LPv4DfE6sql0SQP ESLEkyIXAhjBwH0pFxNWcWOgdIUe+Bm10V4YUCg226nFdk0GH6xNqeIj0Vt8oXuKmgQ==

#### EDUARDO RAMOS MORA | Fecha: 2020-09-24 19:04:37 | Firmante

CWu//9/oBx7N2cZnU60FgGbF+YaeQdvlmLLxxKCDken9dUba134wJFtVT0yYqrVWBrylKRPcfELZrP5NwfSIPtfoQr/v9AZMxFQ/mfb4tSISTxmQ5G8/xbSrSv0Fal6EJ8v5j5Nq5tpRk a2Wdt/tfVlzEhDUxD9KRc0Jnz412Na9IcVQkc155gNrQhHjFA5afw9ynvYFYM10PUcv5EbQmCxxIZPx+/EveYfpOaJVFB2R4vP/4qjF4THnCoLEbHVhID8qNXm4YIlvfkNZ5KOFMB XUbpiA03X7sNrmMFZrcu2SToCjV2soZd+Be89BJI26TcggRJUNs06S9TpjuEt1FQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



Ljk5oe

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ZxJ0Z0zNYdDHsMUwnhaATD8HkzONZUKt



Una universidad de excelencia



### UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

### UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

"Análisis Tridimensional de Flujos Internos en una Gota de Agua Sésil en Evaporación"

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

# JAVIER ANDRÉS BRIBIESCA SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Gabriel Isaac Corkidi Blanco

CUERNAVACA, MORELOS

SEPTIEMBRE, 2020.

## Jurado

- Dr. Eduardo Ramos Mora
- Dr. Juan Manuel Rendón Mancha
- Dr. Jorge Hermosillo Valadez
- Dr. Gabriel Isaac Corkidi Blanco
- Dr. Jorge Alberto Fuentes Pacheco

### Publicaciones del proyecto

### Artículos en revistas arbitradas:

Bribiesca, A., Montoya, F., Hernández, P., Ramos, E., & Corkidi, G. (2020).
Device for experimental characterization of the 4D flow inside an evaporating sessile water droplet. Review of Scientific Instruments, 91(1), 16101.

### Presentaciones en congresos internacionales:

- Corkidi, G., Bribiesca, A., Montoya, F., Hernandez, P., Piedra, S., & Ramos, E. (2019). 3D Particle Tracking in Sessile Evaporating Water Droplets. In Droplets 2019. Durham, UK.
- Corkidi, G., Montoya, F., Piedra, S., Bribiesca, A., Hernández, P., & Ramos, E. (2018). Observations of three-dimensional flow inside an evaporating drop. In 19th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal.

### Presentaciones en congresos nacionales:

- Corkidi, G., Montoya, F., Bribiesca, A., Hernández-Herrera, P., Piedra, S., & Ramos, E. (2019). Particle tracking in an evaporating water droplet. En Congreso de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Mexicana de Física.
- Bribiesca, A., Montoya, F., Hernández, P., Ramos, E., & Corkidi, G. (2019). Metodología para el análisis 3D de la dinámica de evaporación y sedimentación de una gota sésil. En SOMI XXXIV Congreso de Instrumentación. Morelia, Mich.
- Corkidi, G., Montoya, J., Bribiesca, A., Hernández-Herrera, P., Monroy, R., Piedra, S., & Ramos, E. (2018). Fluid dynamics inside an evaporating sessile drop. En Congreso Nacional de Física.
- Bribiesca, A., Montoya, F., Hernandez-Herrera, P., Ramos, E., & Corkidi, G. (2018). Sistema de microscopía tridimensional para muestreo rápido y 'time-lapse' simultáneamente. En SOMI XXXIII Congreso de Instrumentación. Torreón, Coah.

### Resumen

Presentamos una metodología en hardware y software para analizar la estructura del flujo tridimensional (3D) dependiente del tiempo de gotas de agua sésiles, monitoreando el movimiento 4D (3D+t) de partículas fluorescentes suspendidas en el fluido. Para adquirir la información desarrollamos un sistema experimental basado en microscopía óptica que permite el análisis de la estructura de cuatro dimensiones (3D+t) del flujo dentro de las gotas sésiles en evaporación mediante el monitoreo del movimiento de los trazadores en planos horizontales localizados a diferentes alturas. La observación de múltiples planos se logra utilizando un dispositivo piezoeléctrico para hacer que el objetivo del microscopio oscile verticalmente, mientras que una cámara de alta velocidad captura imágenes. El proceso de evaporación de gotas dura varios minutos y acelera de forma importante a medida que el fluido avanza hacia la evaporación completa. Para capturar la dinámica durante el proceso completo se utilizan secuencialmente dos cámaras con la misma salida óptica pero diferente resolución temporal. Usando algoritmos de procesamiento de imágenes, obtenemos las trayectorias completas de múltiples trazadores, velocidades de partículas en la superficie libre de las gotas y campos de velocidad. La información disponible puede usarse para comprender la geometría del patrón de sedimentación y su correlación con la dinámica 3D de las partículas.

# Índice general

Ju	irado	I
Ρı	ublic	aciones del proyecto II
R	esum	en IV
Si	glas	VIII
G	losar	io X
1	INT	RODUCCIÓN 1
	1.1	Descripción del trabajo
	1.2	Objetivo General
<b>2</b>	AN	TECEDENTES 6
	2.1	Primeros estudios
	2.2	Análisis bidimensional (2D) 8
		2.2.1 Flujo vertical
	2.3	Métodos tridimensionales

	2.4	Estado del arte	18
	2.5	Tabla comparativa	22
3	ME	TODOLOGÍA	<b>24</b>
	3.1	Adquisición de imágenes	25
		3.1.1 Cámaras de alta velocidad	26
	3.2	Control del sistema experimental	28
	3.3	Reconstrucción 4D	32
	3.4	Procesamiento de imágenes	33
		3.4.1 Distribución de partículas	34
		3.4.2 Obtención de trayectorias 3D	34
		3.4.3 Proyección ' $rz$ ' y obtención de campos de velocidad	36
4	RES	SULTADOS	37
	4.1	Distribución volumétrica de las partículas	37
	4.2	Flujo general	40
		4.2.1 Ejemplos de trayectorias en el plano ' $rz'$	40
		4.2.2 Vista plana	41
		4.2.3 Flujo cerca del substrato	42
	4.3	Redistribución de partículas	43
	4.4	Flujo superficial	45
	4.5	Campos de velocidad	46
5	CO	NCLUSIONES	47
	5.1	Distribución 4D de partículas	47
	5.2	Trayectorias	47
	5.3	Campos de velocidad	48
	5.4	Flujo superficial	48

### 6 PERSPECTIVAS

**49** 

# Siglas

$\mu \mathrm{PIV}$	Velocimetría	de	Partículas	Microscópicas	en
	Imágenes 11				

- 3D-PTV Velocimetría de Seguimiento de Partículas tridimensional 16–18
- APTV PTV astigmático 20–23
- CCD Dispositivo de carga acoplada 10, 15, 25
- DoG Diferencia de Gaussianas 33
- GDPT Seguimiento de Partículas con Desenfoque General 20–23
- LAP Linear Assignment Problem 19, 34

### Siglas

LDV	Velocimetría Doppler con Láser 10
MART	técnica de reconstrucción multiplicativa algebraica 16
PIV	Velocimetría de Partículas en Imágenes 10–13, 15, 16, 49
PTV	Velocimetría de Seguimiento de Partículas 16

Tomo-PIV PIV Tomográfico 16–18

# Glosario

campo de velocidades	Distribución de la velocidad instantánea en un
	fluido. 5, 10–12, 15–18, 20, 22, 36, 46
casquete esférico	Esfera cortada por un plano 6
gota sésil	Gota colocada sobre una superficie sólida 1,
	5-8, 13, 22, 27, 41
hyperstack	Imagen multidimensional 32, 33, 35
interfaz líquido/aire	Parte de la gota que está en contacto con el
	aire 6, 21
interfaz líquido/sólido	Parte de la gota que está en contacto con la
	superficie sólida 6
linea de contacto	Borde de la gota. 8, 10, 14

Glosario

piezoeléctrico	Dispositivo que hace oscilar la lente 4, 18, 19,
	25–30, 32
plano focal	Plano enfocado por la lente 3, 5, 8, 9, 11, 12,
	14-17, 20, 21, 23, 25, 32
radio de contacto	Radio de la zona de contacto 6, 7
trazador	Partículas fluorescentes que permiten visuali-
	zar localmente el flujo interno de la gota. $5, 8,$
	9, 11, 13, 14, 16, 19 - 21, 23 - 25, 27, 34, 35, 37,
	38, 40, 43, 44, 47, 49
ángulo de contacto	Ángulo formado entre el sólido y la superficie
	de la esfera 6-13-22

# Índice de figuras

1.1	Características morfológicas de las gotas secas de suero sanguíneo de per-	
	sonas sanas, enfermas y con diferentes estados fisiológicos (tres pacientes	
	por cada estado)Christy et al. (2010): (a) control; (b) cáncer de mama;	
	(c) cáncer de pulmón; (d) paraproteinemia; (e) parto a tiempo; (f) par-	
	to prematuro; (g) amenaza de aborto (parto prematuro) en diferentes	
	períodos de gestación; (h) hepatitis	2
1.2	Sedimento de gotas de sangre	3
1.3	Peinado de cadenas de ADN del Liu et al. (2004)	4
2.1	Gota sésil (Figura tomada de Bribiesca (2018))	7
2.2	Comportamientos de una gota sésil al evaporarse (Figura tomada de	
	Bribiesca (2018))	7
2.3	Sedimento de gota de Deegan et al. (1997). El arco que se forma en el	
	borde se llama 'coffee-ring'	8
2.4	Una lente hemisférica, su distorsión de imagen y el resultado al aplicarle	
	el algoritmo de Kang et al. (2004) para corregir la distorsión	10
2.5	Obtención de campo de velocidades con PIV	11

Ultimas etapas de la evaporación de una gota de agua (Corkidi et al.,	
2016)	12
Técnica de sombras utilizada por Gatapova et al. $\left(2018\right)$ para analizar la	
dinámica de evaporación de una gota sésil	13
Trantum et al. (2013) obtuvieron los campos de velocidad de la gota	
(flechas blancas) en un plano $rz'$	14
Visualización de partículas fluorescentes en una gota de isopropanol (Raj-	
neesh et al., 2009). (a) Una partícula es rastreada en las posiciones 1, 2,	
3 y 4. (b) Posición correspondiente de la partícula en el plano rz. $\ .$ .	15
Sistema experimental para 3D-PTV y TOMO-PIV desarrollado por Kim	
et al. (2013)	17
Campos de velocidad tridimensionales obtenidos por Kim et al. $\left(2013\right)$ .	17
Campos de velocidad 3D obtenidos por Kim et al. (2013)	18
Representación de una adquisición realizada por el sistema experimental	
en dos tiempos diferentes (Bribiesca et al., 2017).	19
Trayectorias más largas localizadas (Bribiesca et al., 2017)	20
Métodos de medición para el rastreo tridimensional de partículas con	
una sola cámara de Rossi and Marin (2020)	21
Medición APTV del campo de velocidades del flujo dentro de una gota	
de agua salada (Rossi and Marin, 2020).	22
Medición GDPT del campo de velocidades del flujo dentro de una gota	
de agua ultrapura con diferentes ángulos de contacto	22
Diagrama de bloques del sistema experimental	27
Sincronización de señales del sistema experimental.	30
Diagrama de flujo del software desarrollado para controlar el sistema	
experimental.	31
	Ultimas etapas de la evaporación de una gota de agua (Corkidi et al.,     2016).

3.4	Interfaz gráfica de usuario del programa desarrollado para controlar el	
	sistema experimental	32
3.5	Hyperstack obtenido con la segunda cámara en $t=0, z=0$	33
4.1	Distribución volumétrica de trazadores (Azul=0, rojo=20 partículas). El	
	eje horizontal representa el tiempo. El eje vertical representa la altura.	
	El tiempo total de evaporación es de 256 s	39
4.2	Trayectorias tridimensionales de (a) todas las partículas detectadas y	
	(b) algunos ejemplos. El código de color representa el tiempo (t=0 azul,	
	t=260 rojo)	40
4.3	Ejemplos de trayectorias proyectadas en 'rz'. El código de clores repre-	
	senta el tiempo (s) y las curvas representan la superficie libre de la gota	
	en el tiempo correspondiente. a) Trayectorias que comienzan en la super-	
	ficie. b) Trayectorias que comienzan cerca del substrato. c) Trayectorias	
	que comienzan lejos de la superficie y el substrato	41
4.4	Vista plana de las trayectorias de las 1500 partículas en diferentes tiem-	
	pos de evaporación. Tiempo inicial $(t\!=0)$ es el inicio del proceso de	
	evaporación. a) 0 s, b) 90 s, c) 180 s; El código de color representa el	
	tiempo	42
4.5	Trayectorias de partículas (a) con z<10 $\mu m$ y (b) z<20 $\mu m.$ El código	
	de colores representa el tiempo	43
4.6	Redistribución de partículas en el volumen de gota de acuerdo con su	
	posición inicial en la dirección radial y la altura inicial paramétrica para el	
	intervalo de tiempo desde el inicio hasta el momento en que las partículas	
	tocan por primera vez el substrato. El código de colores indica la altura	
	inicial del trazador.	44

4.7	Flujo superficial. El código de colores representa el tiempo. Las curvas	
	grises representan la superficie en los tiempos correspondientes. (a) Mo-	
	vimiento de partículas localizadas inicialmente en las superficie libre. (b)	
	Velocidad radial de la superficie libre en un tiempo fijo	45
4.8	Campo de velocidades (a) 120 y (b) 60 segundos antes de la evaporación	
	total	46

### **INTRODUCCIÓN**

El flujo interno de una gota en evaporación es complicado, tridimensional y varía dependiendo de las propiedades físicas y químicas del líquido y su entorno. El volumen y la composición del líquido, así como la temperatura y humedad del ambiente cerca de la gota son las principales características que influyen este proceso. En el caso de una gota sésil, es decir, colocada sobre un objeto sólido, también la composición y temperatura del substrato afectan la dinámica de evaporación.

Analizar y caracterizar los flujos de gotas sésiles en evaporación es esencial para desarrollar aplicaciones que requieren controlar el flujo de una gota o predecir la forma de la mancha de sedimento que deja la gota al secarse. Por ejemplo, la Figura 1.1 muestra las características del sedimento de gotas de sangre secas de personas con diferentes enfermedades y estados fisiológicos obtenidas por Christy et al. (2010). Más recientemente, Brutin et al. (2011) analizaron la formación del sedimento de gotas de sangre de pacientes sanos, anémicos e hiperlipidémicos, con lo cual desarrollaron una técnica que permite diagnosticar estas enfermedades. La Figura 1.2 muestra cómo las gotas de sangre de personas sanas (1.2a y 1.2b) forman fragmentos de sedimento grandes y claros cerca del borde, mientras que las muestras de personas con anemia (1.2c) o hiperlipidemia (1.2d) forman fragmentos pequeños.

Las aplicaciones médicas del proceso de evaporación no están limitadas al análisis

de gotas de sangre. Shabalin (1996) descubrieron que al secarse una gota de orina de un paciente con litiasis urinaria en un medio de proteínas, las sales se cristalizan. A partir de esta observación ellos patentaron un sistema ampliamente utilizado para diagnosticar esta enfermedad en una etapa pre-clínica.



Figura 1.1: Características morfológicas de las gotas secas de suero sanguíneo de personas sanas, enfermas y con diferentes estados fisiológicos (tres pacientes por cada estado)Christy et al. (2010): (a) control; (b) cáncer de mama; (c) cáncer de pulmón; (d) paraproteinemia; (e) parto a tiempo; (f) parto prematuro; (g) amenaza de aborto (parto prematuro) en diferentes períodos de gestación; (h) hepatitis

El proceso de evaporación de gotas también tiene aplicaciones científicas e industriales. Por ejemplo, las cadenas de ADN usualmente se encuentran enrolladas, lo cual complica su análisis, sin embargo Bensimon et al. (1995) determinaron que al colocarlas en una gota y dejarla evaporar, el flujo interno hace que las cadenas se estiren o se '*peinen*' hacia el centro de la gota, como se muestra en la Figura 1.3, lo cual facilita su estudio. De igual manera, la evaporación de gotas tiene aplicaciones útiles para la construcción auto-organizada de nano-tubos de carbono (Li et al., 2006), que se utilizan para hacer paneles solares y desarrollar tintas para impresión (Galliker et al., 2012).

La dinámica tridimensional (3D) de evaporación de una gota determina el patrón final del sedimento. Las aplicaciones del proceso de evaporación de gotas están hechas



**Figura 1.2:** Técnica desarrollada por Brutin et al. (2011) para el diagnóstico de enfermedades de la sangre. Muestra de sangre de: (1.2a) una mujer sana, (1.2b) un hombre sano, (1.2c) una persona con anemia, (1.2d) una persona con hiperlipidemia.

a partir de observaciones bidimensionales (2D); ya sea en una imagen de la forma final del sedimento o en un video del flujo en el plano adyacente al portaobjetos. La falta de información del flujo fuera del plano focal hace que se desconozca la estructura del flujo 3D que ocasiona el patrón de sedimento. Por ejemplo, en el caso de gotas de sangre, se sabe cuál es la diferencia entre la forma del sedimento de una muestra de una persona sana, una anémica y una hiperlipidémica (Fig. 1.2), sin embargo se desconocen las características en la dinámica 3D de evaporación que ocasionan que estos patrones sean diferentes. La información del flujo 3D de una gota de sangre podría permitir mejorar la precisión del diagnóstico. En general, el uso de herramientas para obtener información del flujo 3D de gotas en evaporación podría permitir desarrollar aplicaciones que no funcionen con información exclusivamente 2D.

Actualmente no existe un sistema experimental capaz de seguir de principio a fin el flujo de una gota, debido a que su estructura inherentemente tridimensional y su aceleración durante el proceso rebasan las capacidades de incluso los sistemas de mi-



**Figura 1.3:** Liu et al. (2004) utilizaron el proceso de evaporación de una gota para desenrollar cadenas de ADN, lo cuál facilita su estudio.

croscopía más recientes, cómo se describe en el Capítulo 2. Además, para analizar el flujo interno de una gota se requiere algoritmos que puedan procesar la información del movimiento 3D de miles de partículas trazadoras contenidas dentro de ella. La falta de instrumentos y algoritmos para analizar la dinámica 4D (3D+t) de evaporación de una gota ha ocasionado que los modelos matemáticos actuales estén basados en observaciones planas del flujo (Marín et al., 2011). El desarrollo de instrumentos y algoritmos para analizar la dinámica 4D de forma más precisa y verificar la validez de los modelos propuestos anteriormente. Por estas razones es necesario desarrollar herramientas más sofisticadas que permitan la reconstrucción de una muestra tridimensional con tasas de muestreo adecuadas.

### 1.1. Descripción del trabajo

En este trabajo desarrollamos una metodología en *hardware* y *software* para analizar la dinámica 3D de evaporación de una gota de agua. El *hardware* está formado por un sistema experimental, basado en microscopía óptica, con un dispositivo piezoeléctrico colocado entre el revolver y la lente del microscopio que hace que la lente oscile verticalmente mientras dos cámaras de alta velocidad capturan imágenes secuencialmente. La evolución temporal del flujo interno de la gota se graba rastreando la posición x, y, z, tde trazadores en las imágenes.

Durante el las últimas etapas del proceso de evaporación el flujo puede acelerar hasta alcanzar una velocidad 10 veces mayor que la inicial (Hamamoto et al., 2011). Debido a la duración de varios minutos del proceso y la alta frecuencia temporal que se requiere para grabar las últimas etapas, es necesario utilizar dos cámaras de alta velocidad para grabar las imágenes: la primer cámara graba los primeros minutos cuando el flujo es lento y la segunda graba la última etapa, cuando el flujo es rápido con una resolución temporal mayor.

Este sistema nos permite monitorear cuantitativamente el movimiento de los trazadores en cada plano focal. Utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes 4D y análisis de datos obtenemos por primera vez las trayectorias 4D completas de miles de trazadores, reconstruyendo así la dinámica 4D de evaporación de la gota.

### 1.2. Objetivo General

Desarrollar un sistema experimental para resolver el movimiento tridimensional de trazadores dentro de una gotas sésiles en evaporación en función del tiempo. A partir de estas observaciones inferir el campo de velocidades dentro y en la superficie de la gota y resolver la posición inicial y final de los trazadores.

# ANTECEDENTES

### 2.1. Primeros estudios

En 1870, James Clerk Maxwell propuso el primer modelo de evaporación de una gota, basándose en las ecuaciones de conservación de masa y calor. En este modelo la gota es una esfera inerte suspendida en el vacío, donde inicialmente la concentración de vapor es alta en la superficie de la esfera y baja lejos de la gota. Conforme avanza el tiempo, la masa y el calor se van distribuyendo uniformemente en el espacio.

El modelo de Maxwell todavía es utilizado con frecuencia como base para otros modelos, sin embargo, no funciona completamente para el caso de gotas sésiles porque la interacción física y química con el substrato modifica la dinámica de evaporación. Picknett and Bexon (1977) determinaron que en este caso la gota tiene la forma de un casquete esférico, es decir una esfera cortada por un plano, como se muestra en la Figura 2.1. Se denomina radio de contacto a la distancia entre el centro y el borde de la gota. El ángulo formado en la intersección entre la base y el casquete esférico se llama ángulo de contacto. Llamamos interfaz líquido/sólido a la región en la que el líquido está en contacto con el sólido e interfaz líquido/aire a la región de la gota en contacto con el aire.

Picknett and Bexon (1977) observaron que las gotas sésiles pueden exhibir dos com-



Figura 2.1: Gota sésil (figura tomada de Bribiesca (2018))

portamientos diferentes al evaporarse: que el radio de contacto se mantenga constante mientras el ángulo disminuye o que el radio de contacto disminuya mientras el ángulo se mantiene. La Figura 2.2 muestra esquemáticamente estos comportamientos. Conforme el volumen del casquete de una gota con radio de contacto constante disminuye, el flujo interno de la gota acelera.



(a) Radio de contacto constante: El radio de contacto se mantiene constante mientras el ángulo disminuye.



(b) Ángulo de contacto constante: El radio de contacto disminuye mientras el ángulo permanece constante.

Figura 2.2: Comportamientos de una gota sésil al evaporarse.

### 2.2. Análisis bidimensional (2D)

La dinámica de evaporación y formación de sedimento de gotas ha sido frecuentemente estudiada en la literatura, principalmente en solo dos dimensiones debido a las limitaciones del *hardware* y *software* para adquirir información experimental tridimensional de micro-flujos. Los trabajos realizados además tienen en común el uso de trazadores, micro-esferas que se le añaden al líquido y siguen de forma fiel el flujo. Estas partículas se iluminan con una luz o láser para micro-esferas de tal modo que se puedan seguir a simple vista para obtener información local del flujo.

Deegan et al. (1997, 2000) son los pioneros del análisis experimental de la dinámica de evaporación de gotas sésiles. Ellos observaron el flujo en un plano focal cercano al substrato y a partir de esa información propusieron un modelo que describe la velocidad con la que los trazadores se apilan en la linea de contacto formando un anillo (Fig. 2.3). Ellos nombraron esta estructura de sedimento como 'coffee-ring', porque se observa a simple vista después de que se derrama y se seca una gota de café.



Figura 2.3: Sedimento de gota de Deegan et al. (1997). El arco que se forma en el borde se llama 'coffee-ring'

En su trabajo, Deegan et al. (1997, 2000) describieron el proceso de evaporación en cuatro etapas. En cada etapa la velocidad de los trazadores es mayor que en la anterior. La primera etapa comprende la mayor parte del proceso, donde la gota es un casquete esférico y los trazadores se mueven de una forma lenta y compleja. Además, en esta etapa, muchas partículas se desplazan hacia la linea de contacto y se apilan comenzando a formar el *coffee ring*. La descripción de estos primeros minutos del proceso de evaporación por parte de (Deegan et al., 1997, 2000) es poco específica debido a que la gota es alta y ellos solo observan un plano horizontal, perdiendo la información del flujo en el resto del volumen. Además, la tecnología de ese tiempo no les permitió el uso de algoritmos para procesar el movimiento de las partículas y hacer observaciones más complejas de la dinámica. La segunda etapa comienza varios minutos después, cerca del final del proceso, cuando la gota es casi plana. En esta etapa el flujo es radial y su velocidad puede ser hasta un orden de magnitud mayor que en la etapa anterior (Hamamoto et al., 2011). La velocidad radial de las partículas incrementa de forma  $\frac{1}{\Delta t}$ , donde  $\Delta t$  es el tiempo que resta del proceso de evaporación. La tercer etapa comienza cuando la capa líquida de la gota se vuelve tan delgada que se desprende del anillo. En esta etapa, la gota está compuesta por una región gruesa y una capa delgada de líquido. La tensión superficial jala el líquido hacia el centro, reduciendo el área. La

interacción entre la tensión superficial y la evaporación, determina el flujo interno. En la última etapa la capa fina se suaviza por la tensión superficial. Dicha tensión genera flujos radiales rápidos hacia adentro formando finos segmentos de sedimento.

Es interesante mencionar que en los primeros trabajos experimentales la gota era grabada desde arriba. Esto ocasionaba que el plano focal se distorsionara debido a que la curvatura de la superficie de la gota hace que ésta funcione como una lente hemisférica, como se muestra en la Fig. 2.4a y 2.4b. Inicialmente, resolvieron este problema desarrollando algoritmos geométricos para corregir la distorsión (Kang et al., 2004; Minor et al., 2007). El resultado de la corrección de Kang et al. (2004) se muestra en la Figura 2.4c. Los sistemas experimentales más recientes, incluyendo el que presentamos en este trabajo, utilizan un microscopio invertido para grabar la muestra desde abajo,



donde la gota es plana, con lo cual se evita la deformación.

**Figura 2.4:** Una lente hemisférica, su distorsión de imagen y el resultado al aplicarle el algoritmo de Kang et al. (2004) para corregir la distorsión. (a) lente hemisférica; (b) imagen original; (c) imagen con corrección de distorsión. El algoritmo recupera correctamente la información cerca del centro de la lente, sin embargo no es posible recuperar el flujo cerca de la linea de contacto.

(c)

En los últimos, años se han desarrollado diferentes herramientas para el análisis 2D de micro-flujos asistido por computadora. Muchas de estas herramientas, como Velocimetría Doppler con Láser (Czarske and Büttner, 2008), sólo permiten calcular la velocidad y dirección del flujo en un punto. La dinámica de evaporación es diferente en las distintas regiones de una gota incluso en un plano, por lo tanto es necesario calcular un campo de velocidades a partir de las imágenes (Fig. 2.5a, 2.5b y 2.5c). El método más común para calcular campos de velocidad en micro-flujos se llama Velocimetría de Partículas en Imágenes (PIV) y requiere un sistema equipado con una cámara CCD sincronizada con una luz o láser adecuado para iluminar los trazadores de forma óptima. Una vez que se obtuvieron las imágenes, se utiliza un *software* PIV para procesarlas. Este *software* compara las parejas de fotogramas consecutivos de los trazadores moviéndose en el plano focal, dividiéndolos en pequeñas ventanas y calculando la correlación cruzada. Los valores de mayor correlación indican la dirección en la que más probablemente se desplazó el grupo de trazadores contenido en la ventana original y con esta información se puede trazar el campo vectorial. La figura 2.5d muestra un esquema de PIV.



**Figura 2.5:** Obtención campo de velocidades con Velocimetría de Partículas Microscópicas en Imágenes ( $\mu$ PIV) (figuras tomadas de Christy et al. (2010)). a) Imagen de la gota en un tiempo t. b) Campo de velocidades obtenido para la gota en el tiempo t. c) Campo vectorial sobrepuesto en la imagen de la gota. El código de colores representa la velocidad o magnitud del vector. d) Representación esquematizada de PIV.

El flujo interno de una gota es intrínsecamente tridimensional. Al hacer un análisis

2D de la dinámica de evaporación de una gota, se omite completamente la información de las partículas fuera del plano focal y se desprecia la componente z de las partículas enfocadas. Para evitar esta pérdida de información Corkidi et al. (2016) analizaron los últimos segundos de la evaporación de una gota utilizando PIV. Es ventajoso estudiar una gota en estas etapas porque, a pesar de que el flujo es más rápido, la gota es prácticamente plana y se alcanza a analizar todo el flujo en un solo plano focal. Sin embargo, estas etapas constituyen tan solo alrededor de 1.5 % de la duración del proceso completo, es necesaria la información 3D de las etapas anteriores para obtener la historia completa de la formación del sedimento. Los resultados que obtuvieron se muestran en la Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Últimas etapas de la evaporación de una gota de agua (Corkidi et al., 2016). La fila superior muestra algunas de las imágenes obtenidas por el microscopio. La fila inferior muestra sus campos de velocidad calculados por PIV. En estas etapas la gota se rompe rápidamente, separando el sedimento en dos partes: el *coffee-ring* y una gota cuyo diámetro va disminuyendo dejando finos fragmentos de sedimento.

#### 2.2.1. Flujo vertical

Otra alternativa utilizada frecuentemente para realizar un análisis 2D sobre la dinámica de evaporación de una gota es grabándola desde un lado, enfocando un plano vertical. Gatapova et al. (2018) utilizaron esta perspectiva para obtener información sobre el intercambio de masa durante el proceso, midiendo cómo disminuye el ángulo de contacto en función del tiempo por medio de una técnica de sombras que consiste en grabar la muestra desde un lado e iluminarla desde el otro, de modo que el líquido obstruye la luz en las regiones de la gota que no se han evaporado, como se muestra en la Figura 2.7a.



**Figura 2.7:** Técnica de sombras utilizada por Gatapova et al. (2018) para analizar la dinámica de evaporación de una gota sésil. (a) Sistema experimental (Kabov et al., 2014). (b) Gota de agua evaporándose sobre un substrato de aluminio anodizado a una temperatura de 64°C, obtenida por técnica de sombras (Gatapova et al., 2018).

También es posible añadir trazadores y utilizar un sistema PIV para analizar el flujo interno de la gota en un plano vertical. Con esta técnica y bajo la suposición de que el flujo es axisimétrico, Trantum et al. (2013) observaron que el flujo interno de una gota es toroidal, donde las partículas cerca de la superficie libre de la gota se dirigen hacia el centro, mientras que las partículas contenidas dentro del volumen se dirigen radialmente hacia afuera (Fig. 2.8). Cambiando algunas condiciones del experimento, por ejemplo, aumentando la temperatura o añadiendo sal, es posible invertir la dirección de este flujo.



**Figura 2.8:** Trantum et al. (2013) obtuvieron los campos de velocidad de la gota (flechas blancas) en un plano 'rz'

Si bien esta perspectiva aporta información interesante del flujo vertical, se preserva el problema de que sólo se analiza un plano focal, por lo cual no se obtiene información del resto del volumen ni la componente angular de las partículas enfocadas. Además cuando la gota se graba desde un lado, ésta inevitablemente funciona como una lente hemisférica y aún aplicando un algoritmo de corrección (Kang et al., 2004; Minor et al., 2007) se pierde la información cerca de la linea de contacto (Fig. 2.4). Es evidente la necesidad de instrumentos que permitan adquirir información tridimensional del flujo para obtener una descripción completa de él.

### 2.3. Métodos tridimensionales

Una forma intuitiva de obtener información sobre la dinámica tridimensional de evaporación de una gota consiste en combinar las dos perspectivas mencionadas en la Sección 2.2, grabando la gota cargada de trazadores simultáneamente con dos cámaras CCD sincronizadas: una desde abajo y la otra desde un lado. Con este método, la información de ambas perspectivas se complementa de manera importante, pues la dinámica en el plano vertical (rz) ayuda a justificar el flujo en el plano horizontal (xy). Utilizando un sistema experimental de este tipo, Rajneesh et al. (2009) identificaron las partículas más grandes y sobresalientes de la gota en ambos planos focales y las rastrearon manualmente para obtener sus trayectorias 3D, como se muestra en la Figura 2.9. Además, es posible utilizar técnicas PIV en ambas cámaras para extrapolar información 3D del campo de velocidades de la gota (Rajneesh et al., 2009; Rossi and Marin, 2020).



**Figura 2.9:** Visualización de partículas fluorescentes en una gota de isopropanol (Rajneesh et al., 2009). (a) Una partícula es rastreada en las posiciones 1, 2, 3 y 4. (b) Posición correspondiente de la partícula en el plano rz.

Las limitaciones de este método se deben a la dificultad para determinar que una partícula es la misma en ambas cámaras y sobre todo a la profundidad de campo, ya que hace falta la información de las partículas fuera de los planos focales. Sin embargo, la información obtenida a través de este método ha sido útil para validar algunos modelos numéricos (Rajneesh et al., 2009).

Kim et al. (2013) propusieron dos métodos para obtener el campo de velocidades de una gota utilizando un sistema experimental con cuatro cámaras que graban simultáneamente la muestra desde diferentes ángulos (Fig. 2.10). El primer método utiliza una versión tridimensional de una variante de PIV que se utiliza cuando la concentración de los trazadores en el líquido es baja, llamada Velocimetría de Seguimiento de Partículas tridimensional (3D-PTV). Este algoritmo segmenta las partículas grabadas en cada cámara y triangula su información para obtener la posición 3D. La ventaja de que la densidad sea baja es que se puede contar el número de trazadores en las imágenes. Si la reconstrucción 3D se hizo adecuadamente, el número de partículas en el volumen debe coincidir con el número de partículas en las imágenes. Los parámetros de la segmentación y triangulación se ajustan hasta que estos números coincidan. Una vez que se tiene una reconstrucción fiel del volumen en cada tiempo, se buscan parejas tridimensionales de trazadores en tiempos consecutivos y se calcula el PTV para obtener los campos de velocidad.

Para los casos en que la densidad es más alta, Kim et al. (2013) desarrollaron un método PIV Tomográfico (Tomo-PIV). Este algoritmo hace una reconstrucción tomográfica del volumen utilizando la técnica de reconstrucción multiplicativa algebraica (MART) y luego calcula la correlación cruzada 3D entre cubos del volumen para obtener los vectores locales de velocidad 3D. Estas técnicas han sido importantes para la obtención de los campos de velocidad 3D del fluido, como se muestra en la Figura 2.11. La Figura 2.12 muestra una comparación entre los campos de velocidad obtenidos con ambos métodos. En general los campos de velocidad obtenidos por Tomo-PIV (Fig. 2.12 a y b) son más suaves y homogéneos que los obtenidos por Velocimetría de Seguimiento de Partículas tridimensional (3D-PTV) (Fig. 2.12 c y d). La desventaja de estos métodos es que pierden precisión fuera de la intersección de los planos focales debido a la proyección y también cerca de la superficie de la gota por la deformación descrita por Kang et al. (2004) (ver Sección 2.2). Además, carecen de la habilidad de rastrear partículas individuales, lo cual es sumamente importante para comprender la formación del sedimento. En esta tesis proponemos un sistema capaz de obtener las trayectorias completas 4D de los trazadores así como los campos de velocidad incluso en las regiones dónde los sistemas tomográficos están limitados.



Figura 2.10: Sistema experimental para 3D-PTV y Tomo-PIV desarrollado por Kim et al. (2013)



Figura 2.11: Campos de velocidad tridimensionales obtenidos por Kim et al. (2013)



Figura 2.12: campos de velocidad 3D obtenidos por Kim et al. (2013). a) campo de velocidades obtenido por Tomo-PIV visto desde un lado, b) campo de velocidades obtenido por Tomo-PIV visto desde un arriba, c) campo de velocidades obtenido por 3D-PTV visto desde un lado, d) campo de velocidades obtenido por 3D-PTV visto desde un arriba.

### 2.4. Estado del arte

En trabajos anteriores (Bribiesca et al., 2017; Bribiesca, 2018) presentamos un sistema experimental basado en microscopía óptica que permite adquirir información 4D de la dinámica de evaporación de una gota utilizando un dispositivo piezoeléctrico para hacer que la lente del microscopio oscile mientras una cámara de alta velocidad captura imágenes de la muestra. De este modo se obtienen imágenes a diferentes alturas que se pueden utilizar para reconstruir la muestra 4D. La Figura 2.13 muestra una


representación de una adquisición con este sistema.

Figura 2.13: Representación de una adquisición realizada por el sistema experimental en dos tiempos diferentes (Bribiesca et al., 2017).

Para reconstruir la muestra 4D desarrollamos un programa que utiliza la información de las señales de la cámara, que indican en qué momento se adquirió cada imagen y la señal de la posición del piezoeléctrico, para obtener la altura a la que corresponde cada imagen y gestionarlas para construir un *hyper-stack TIF* 4D (3D+t). Una vez que se obtuvo el *hyper-stack*, se hace la detección y seguimiento de las partículas utilizando respectivamente el algoritmo de Diferencia de Gaussianas y el rastreador de tipo LAP de Trackmate (Tinevez et al., 2017). De este modo se obtuvieron las trayectorias 4D de los trazadores durante los últimos minutos del proceso de evaporación. Algunos ejemplos de estas trayectorias se muestran en la Figura 2.14.

Una limitante de este sistema experimental es que una cámara de alta velocidad graba las imágenes en su memoria RAM interna durante la adquisición. A pesar de que la memoria es de 8 GB, la frecuencia de muestreo hace que se llene minutos antes de que termine el proceso. Además, la tasa de muestreo alta es adecuada durante las últimas etapas del proceso, sin embargo ocasiona que se obtenga información redundante en la parte lenta del proceso, donde la velocidad puede ser hasta un orden de magnitud menor (Hamamoto et al., 2011). El objetivo del trabajo actual implica modificaciones a este sistema para poder analizar el proceso completo de evaporación y hacer un análisis más profundo de la dinámica de evaporación.

Rossi and Marin (2020) desarrollaron un sistema experimental con una sola cámara



**Figura 2.14:** Trayectorias más largas localizadas (Bribiesca et al., 2017). El código de colores representa el tiempo. Las esferas moradas representan la posición de los trazadores localizados en el tiempo inicial. La flecha blanca representa el eje de simetría de la gota. La curva blanca representa la superficie de la gota.

para analizar la dinámica tridimensional de evaporación de una gota con baja concentración de trazadores. La diferencia con los métodos 2D es que la cámara tiene una lente cilíndrica que distorsiona las partículas de acuerdo a su desenfoque, es decir, la altura a la que se encuentra respecto al plano focal, como se muestra en la Figura 2.15. En esta figura se muestran los esquemas de los dos métodos diferentes propuestos por Rossi and Marin (2020) para obtener los campos de velocidad 3D de la gota. El primer método (Fig. 2.15a) se llama PTV astigmático (APTV) y consiste en segmentar las partículas distorsionadas y medirlas. Como todos los trazadores tienen el mismo diámetro, su alargamiento en el eje 'x' determina qué tan arriba del plano focal está. En el caso contrario, su alargamiento en el eje 'y' determina qué tan abajo está. La otra alternativa (Fig. 2.15b) se llama Seguimiento de Partículas con Desenfoque General (GDPT) y consiste en crear una tabla de búsqueda con imágenes de las partículas a diferentes alturas y usar un algoritmo de reconocimiento de patrones para calcular la correlación cruzada y obtener la altura. Las Figuras 2.16 y 2.17 muestra los campos de velocidad obtenidos utilizando APTV y GDPT respectivamente.



**Figura 2.15:** Métodos de medición para el rastreo tridimensional de partículas con una sola cámara de Rossi and Marin (2020). a) PTV astigmático (APTV) b) Seguimiento de Partículas con Desenfoque General (GDPT)

Este método funciona sólo con densidades extremadamente bajas, porque si las partículas distorsionadas se cruzan, la segmentación y la estimación de la altura fallan. Poder analizar varios planos focales horizontales en lugar de uno, como hacemos en este trabajo, permite estudiar un volumen en varias rebanadas ópticas, obteniendo como resultado una reconstrucción 3D más fiel incluso con una densidad mayor.

Es importante recalcar que hasta donde sabemos, actualmente no existe ningún método capaz de reconstruir trayectorias 4D completas de los trazadores, lo cual es crucial para comprender la formación del sedimento. Asimismo, ningún sistema permite analizar con precisión la dinámica en la interfaz líquido/aire, únicamente dentro de la gota. Las herramientas que presentamos en esta tesis nos permiten por primera vez obtener las trayectorias 4D completas de miles de trazadores, así como analizar la dinámica de evaporación en la superficie de la gota.



**Figura 2.16:** APTV del campo de velocidades del flujo dentro de una gota de agua salada (Rossi and Marin, 2020). a) Trayectorias obtenidas. b) Perfiles de velocidad.



**Figura 2.17:** Medición GDPT del campo de velocidades del flujo dentro de una gota de agua ultrapura con diferentes ángulo de contactos (Rossi and Marin, 2020).

## 2.5. Tabla comparativa

La Tabla 2.1 muestra las ventajas y desventajas de las principales metodologías que se han empleado para analizar la dinámica de evaporación de gotas sésiles.

#### 2.5. TABLA COMPARATIVA

Autor	Metodología	Ventajas	Desventajas
Rajneesh et al. (2009)	Seguimiento ma- nual de partícu- las y PIV en plano horizontal y vertical.	La perspectiva vertical com- plementa la horizontal.	Pérdida de información fuera de rebanadas ópti- cas.
$\begin{array}{c} \text{Christy} \\ \text{et} & \text{al.} \\ (2010) \\ \text{Corkidi} \\ \text{et} & \text{al.} \\ (2016) \end{array}$	PIV en plano ho- rizontal	Instrumentación sencilla. Aporta información crítica sobre los últimos segundos del proceso de evaporación. Efectivo para analizar la formación de sedimento	2D, pérdida de informa- ción fuera de rebanada óptica
Trantum et al. (2013)	PIV en plano Vertical	Instrumentación sencilla. Aporta información del flu- jo en rebanadas radiales.	2D, pérdida de informa- ción fuera de rebanada óptica. El casquete fun- ciona como una lente he- misférica que distorsiona el volumen.
Kim et al. (2013)	Tomo-PIV y 3DPTV	Reconstrucción 3D del campo de velocidades.	Distorsión óptica del vo- lumen debido a que el casquete funciona como una lente hemisférica. No permite la obtención de trayectorias 4D debi- do a la densidad alta.
Bribiesca et al. (2017)	Seguimiento de trazadores en planos focales horizontales con una cámara.	Obtención de trayectorias 4D durante las últimas etapas y campos de velocidad a partir ellas.	La memoria no alcanza para grabar el proceso completo debido a su du- ración y aceleración.
Rossi and Marin (2020)	APTV y GDPT	Obtención de campo de ve- locidades 3D con una sola cámara con lente cilíndrica	Densidad extremada- mente baja No obtiene trayectorias 4D
Tesis actual	Seguimiento de trazado- res en planos focales horizon- tales con dos cámaras	Obtención de trayectorias completas 4D. Ajuste de re- solución temporal cuando la velocidad incrementa. Permite analizar el flujo su- perficial	Depende de la precisión de los algoritmos utiliza- dos para obtener las tra- yectorias con precisión

**Tabla 2.1:** Ventajas y desventajas de trabajos principales realizados anteriormente comparados con el trabajo presentado en esta tesis

# **METODOLOGÍA**

Para cada experimento colocamos una gota de agua destilada con volumen entre  $0.06 \text{ y} 0.12 \ \mu l$  sobre un substrato de vidrio de boro-silicato (VWR). La temperatura del ambiente se mantuvo a 20 °C con un controlador térmico de plataforma Peltier SC-20 (Warner Instruments, EE. UU.) y la humedad relativa se mantuvo al 50% con un humidificador. Como se mencionó en los Capítulos 1 y 2 las propiedades físicas del entorno influyen de forma importante en el proceso de evaporación. Por esta razón aislamos la gota, colocándola dentro de una caja acrílico de 20x20x20 cm. Añadimos dentro la caja dos sensores de temperatura y humedad DHT22 conectados a un microcontrolador Nodemcu esp8266. Programamos el microcontrolador utilizando el lenguaje Arduino (Evans, 2008) para transmitir la información de la temperatura y humedad relativa de los dos sensores a una computadora que coordina el experimento cada 2 segundos. La computadora utiliza un programa que desarrollamos en Java (Arnold et al., 2005) para almacenar las series de tiempos de la temperatura y humedad. De este modo se verificó que la humedad y temperatura se mantuvieron constantes cerca de la gota durante cada experimento. El tiempo total de evaporación se mantuvo entre 158 s y 544 s. Se realizaron experimentos con la temperatura del substrato a  $20^{\circ}C$ ,  $25^{\circ}C$  y  $30^{\circ}C$ .

Para visualizar el flujo interno se añadieron micro-esferas de látex Thermoscientific de 1  $\mu$ m de diámetro, cubiertas con fluoresceína como trazadores. Es crucial que las partículas tengan este diámetro debido a que si fueran más grandes se hundirían, sedimentándose antes de completar el proceso de evaporación y, análogamente, si las partículas fueran más pequeñas, el movimiento Browniano las afectaría fuertemente, convirtiendo sus trayectorias en caminatas aleatorias que no siguen de forma fiel el flujo interno de la gota. La concentración de las partículas en el líquido es de 1/13,000.

Las partículas son iluminadas con un sistema de epi-fluorescencia cuya fuente de luz es un LED Thorlabs M470L que emite luz a una longitud de onda de 470 *n*m (azul), reflejada por un espejo dicroico hacia el objetivo para excitar las moléculas de fluoresceína en la superficie de las esferas. La luz de longitud de onda máxima de 525 nm (verde) reemitida por los trazadores de fluoresceína se filtra con un cubo de fluorescencia 49011 (Chroma Technology Corporation, EE. UU.) y se redirige a las cámaras CCD a través del espejo dicroico.

### 3.1. Adquisición de imágenes

Para realizar el seguimiento 4D de las partículas desarrollamos un sistema experimental basado en microscopía óptica que graba el movimiento los trazadores en planos focales horizontales localizados a diferentes alturas, aumentando la resolución temporal durante los últimos minutos del proceso, cuando el flujo es más rápido. El sistema está formado por un microscopio invertido (Olympus IX71) equipado para observaciones de epi-fluorescencia, un dispositivo piezoeléctrico P-725 (Physik Instruments, MA, EUA) montado entre el objetivo (UplanFl N 10x) y el revólver del microscopio y dos cámaras de alta velocidad conectadas a puertos separados. Con un espejo que redirige la salida óptica a la cámara que está grabando. En el momento que el *software* controlador del sistema comienza dispara la segunda cámara cambiamos manualmente la posición del espejo para redirigir la salida óptica a esta. Mientras las cámaras graban imágenes de la muestra, un servo-controlador E-501 hace que la lente del microscopio oscile en el eje vertical a través de un amplificador de alta corriente E-505 (Physik Instruments, MA, EE. UU.). De este modo, las imágenes se graban a diferentes alturas. El servo-controlador alimenta al piezoeléctrico con una señal de rampa con distinta frecuencia durante el tiempo de grabación con cada cámara, de modo que los dos intervalos se graban con escalas de tiempo diferentes (como se describe en la siguiente Sección). Estas rampas se generaron con un módulo pantalla/interfaz E-517 (Physik Instruments, MA, EE. UU.).

#### 3.1.1. Cámaras de alta velocidad

El sistema activa secuencialmente dos cámaras de alta velocidad configuradas a diferentes velocidades de adquisición para registrar el proceso completo de evaporación. Se utilizó una cámara Optronis 5000 que almacena hasta 16000 imágenes para registrar la primera etapa de la evaporación, que se caracteriza por ser lenta y durar varios minutos. Mientras que el dispositivo de objetivo piezoeléctrico oscilaba a 0.25 Hz con una amplitud de 250  $\mu$  m, esta cámara de alta velocidad adquirió 60 fps por hasta 4.4 min. Esto corresponde a 120 cuadros mientras la lente se mueve hacia arriba o hacia abajo, y una resolución vertical de 2.1  $\mu$ m. Para la última etapa de evaporación, utilizamos una cámara de alta velocidad NAC MEMRECAM Q1v que graba hasta 27,000 imágenes. Un intensificador de imagen C9016-04 con una unidad de refuerzo de imagen C4412-01 (Hamamatsu, Japón) se acopló a esta cámara para intensificar la luz de fluorescencia ya que a una mayor frecuencia de muestreo, la cantidad de luz capturada es crítica. Mientras que el dispositivo piezo-objetivo oscilaba a 2.5 Hz con una amplitud de 90  $\mu$ m, la cámara de alta velocidad adquirió 100 fps por hasta 4.64 min. Esto corresponde a 40 cuadros mientras la lente se mueve hacia arriba o hacia abajo, y una resolución vertical de 4.5  $\mu$ m. La Figura 3.1 muestra el diagrama del sistema



experimental.

**Figura 3.1:** Diagrama de bloques del sistema experimental. a) microscopio, b) Dispositivo piezoeléctrico, c) gota sésil. El dispositivo piezoeléctrico conduce el objetivo a la frecuencia y amplitud deseadas a lo largo del eje vertical mientras las cámaras de alta velocidad capturan imágenes (Figura tomada de Bribiesca et al. (2020)).

El uso de las dos cámaras se debe a la duración y aceleración del proceso. Nuestro sistema requiere cámaras de alta velocidad para poder grabar la cantidad necesaria de cuadros por segundo. Estas cámaras almacenan las imágenes en su propia memoria RAM mientras graban. La resolución temporal que se requiere para grabar los últimos segundos del proceso es tan alta que hace que la memoria de una sola cámara no sea capaz de almacenar las imágenes de todo el proceso. Por lo tanto, una mejor forma de obtener las trayectorias completas de miles de trazadores y por lo tanto de reconstruir la dinámica 4D de evaporación de la gota es utilizando dos cámaras secuencialmente para grabar las diferentes etapas del proceso a diferentes escalas de tiempo.

## 3.2. Control del sistema experimental

El sistema experimental es controlado a través de un programa que desarrollamos en C# (Hejlsberg and Torgersen, 2008) para gestionar y sincronizar los componentes del sistema. Antes de comenzar un experimento, el programa verifica que la oscilación del piezoeléctrico pueda alcanzar la amplitud deseada en las dos etapas. Esto se debe a que el peso del objetivo del microscopio y la frecuencia de oscilación del piezoeléctrico limitan la amplitud máxima de oscilación. Para esto, el *software* hace que el piezoeléctrico oscile con los parámetros deseados a través del módulo de interfaz/pantalla E-517 (como se describe en la sección anterior) y simultáneamente digitaliza la señal de salida de voltaje analógico del piezoeléctrico, correspondiente al verdadero movimiento en el eje vertical del conjunto piezo-objetivo, a través de un convertidor A/D NI USB-621 (National Instruments, EE. UU.). El programa analiza la señal obtenida y si la amplitud máxima alcanzada es menor que la deseada con alguna de las cámaras, el programa avisa al usuario que debe modificar los parámetros y repetir la evaluación.

Una vez que los parámetros fueron aceptados por el programa, el usuario puede comenzar los experimentos. Cuando un experimento inicia, el programa hace que el piezoeléctrico comience a oscilar con los parámetros de frecuencia y amplitud especificados para la primera cámara  $(f_1 y a_1)$ . Simultáneamente, el programa le envía dos señales a la primer cámara a través del convertidor analógico/digital: el pulso disparador o trigger, que le indica que comience a grabar y la señal de sincronía, un tren de pulsos con la frecuencia de muestreo de la cámara que le indica en qué momento capturar cada imagen. Después de que se adquirió el número de imágenes deseado por el usuario, el programa deja de emitir la señal de sincronía de la primer cámara, cambia la frecuencia y amplitud de oscilación del piezoeléctrico a los deseados para la segunda parte y activa la segunda cámara enviándole el trigger y la señal de sincronía con la nueva frecuencia de muestreo. Tras grabar el número de imágenes especificado para la segunda cámara, el programa termina la adquisición, deteniendo la señal de sincronía de la cámara y la oscilación del piezoeléctrico. Durante cada experimento el convertidor A/D se utiliza también para digitalizar simultáneamente las señales de las cámaras y piezoeléctrico, y sincronizarlas para obtener la altura a la se grabó cada imagen, como se muestra en la Figura 3.2. Las imágenes adquiridas con la primer cámara se guardan en una pila de imágenes stack1.tif y sus alturas correspondientes en un archivo  $Z_1.txt$ . Asimismo, las imágenes adquiridas con la segunda cámara se guardan en una pila de imágenes stack2.tif y sus alturas correspondientes en un archivo  $Z_2.txt$ . La Figura 3.3 muestra el diagrama de bloques del software controlador del sistema experimental.

La Figura 3.4 muestra la interfaz gráfica del programa para controlar el sistema.



**Figura 3.2:** Sincronización de señales del sistema experimental. La señal azul corresponde a la posición real del piezoeléctrico, la rosa a la señal sincronía de primer cámara, la gris al disparador de primer cámara, la roja a la señal de sincronía de segunda cámara y la negra al disparador de segunda cámara. La primer línea punteada vertical (dorada) representa el momento en el que se disparó la primer cámara y las líneas color verde claro representan el momento en el que se grabó cada imagen. La segunda línea punteada vertical (naranja) representa el momento en el que se disparó la segunda cámara y las líneas color verde oscuro representan el momento en el que se disparó la segunda cámara y las líneas color verde oscuro representan el momento en el que se grabó cada imagen. La altura de cada imagen corresponde a la posición del piezoeléctrico cada que sube la señal de sincronía después de que la cámara fue activada.



Figura 3.3: Diagrama de flujo del software desarrollado para controlar el sistema experimental.

Control / Piezo / AD					
		Cámara 1	Cámara 2 📝 Habilitar		
Pos. del Piezo (micras):	Exp1-16-1-2020 Exp2-16-1-2020	Frame Rate	Frame Rate		
		60	100		
Mover		Frec. del Piezo	Frec. del Piezo		
Compensar offset (micras):		0.25	2.5		
		Amplitud piezo	Amplitud piezo		
Test		250 -	90 -		
		Stop automático	Stop automático		
180 imagenes obtenidas con la		Num. de Imágenes	Num. de Imágenes		
cámara 1 400 imagenes obtenidas con la		28000	28000		
cámara 2		Offset			
Offset: -2 + 0	Biminar	RUN STOP	STOP		
z = 167					

**Figura 3.4:** Interfaz gráfica de usuario del programa desarrollado para controlar el sistema experimental.

## 3.3. Reconstrucción 4D

Para reconstruir el volumen grabado usamos un programa desarrollado por Bribiesca et al. (2017) que utiliza los archivos de alturas para convertir las dos series de imágenes en hyperstacks 4D. El programa primero agrupa todas las imágenes que se tomaron a la misma altura en cada subida y bajada del piezoeléctrico para reconstruir los planos focales obtenidos. Cada fotograma del hyperstack es una imagen tridimensional formada por las imágenes correspondientes a ese tiempo en todos los planos focales. De este modo se obtienen dos hyperstacks TIF, uno con la primera etapa grabada y otro con la segunda. La Figura 3.5 muestra un hyperstacks obtenido con a partir de los datos de la segunda cámara.



Figura 3.5: Hyperstack obtenido con la segunda cámara en t = 0, z = 0

## 3.4. Procesamiento de imágenes

Una vez que se generaron los hyperstacks con las imágenes de las dos cámaras las procesamos utilizando TrackMate (Tinevez et al., 2017), un plug-in de ImageJ (Rueden et al., 2017) dedicado a la detección y rastreo de partículas y células en imágenes. Las partículas en cada imagen fueron segmentadas utilizando el algoritmo de detección por Diferencia de Gaussianas (DoG), el cual es ideal para este problema debido a que el diámetro de las partículas es pequeño ( $\approx 3$  px). La posición 4D de las partículas se obtiene directamente de la posición x, y segmentada, y la altura y fotograma de la detección en el hyperstack.

#### 3.4.1. Distribución de partículas

La distribución de las partículas en el volumen fue calculada por medio de un programa hecho en Python (Van Rossum and Drake, 2009). Este programa utiliza un mayado 3D formado por cubos traslapados con lado de 30  $\mu$ m y cuenta los trazadores detectados dentro de cada cubo en cada fotograma.

#### 3.4.2. Obtención de trayectorias 3D

Una vez que se obtuvo la posición 3D de los trazadores en cada tiempo, se necesita obtener sus trayectorias 3D enlazando la posición de cada partícula en un tiempo  $(t_i)$ con su posición en el tiempo siguiente  $(t_{i+1})$ . Esto no es trivial, ya que para obtener el flujo interno de una gota es necesario analizar miles de partículas en movimiento. Por esta razón se requiere un algoritmo rastreador que sea eficiente para realizar los cálculos necesarios para el enlazar las parejas de trazadores y preciso a pesar de la alta concentración de partículas en algunas áreas. Esto último complica el rastreo porque no hay garantía en las regiones densas de que las dos partículas más cercanas en tiempos consecutivos pertenezcan a la misma travectoria.

Obtuvimos las trayectorias 3D de los trazadores utilizando el rastreador tipo Linear Assignment Problem (LAP) de TrackMate (Tinevez et al., 2017). Este es uno de los rastreadores más robustos que existen para aplicaciones donde hay varios candidatos para el enlazamiento y el movimiento no es lineal, debido a que trata el problema del rastreo de partículas en tiempos consecutivos como un Linear Assignment Problem, donde el objetivo es relacionar la posición de cada partícula en un instante con la posición de una partícula en el tiempo siguiente, minimizando la suma total de las distancias asignadas. TrackMate obtiene las trayectorias de los trazadores aplicando el Algoritmo Húngaro (Munkres, 1957) a la posición de las partículas localizadas en cada pareja de tiempos consecutivos.

Al finalizar el procesamiento, se genera un archivo xml con las coordenadas (x, y, z, t) de las trayectorias para cada *hyperstack*. Unimos las trayectorias de los dos intervalos grabados desarrollando un programa en Java (Arnold et al., 2005) que carga los archivos de trayectorias de cada cámara y aplica el Algoritmo Húngaro (Munkres, 1957) para mapear la posición de los trazadores en el último tiempo de la primer cámara con las posición de los trazadores en el primer tiempo de la segunda. De este modo obtenemos la historia completa 4D de los trazadores, desde el momento en que se depositó la gota sobre el substrato, hasta el final del proceso de evaporación.

#### Validación de seguimiento de partículas

Validamos la metodología de seguimiento de partículas (identificación de partículas y concatenación de camino de partículas) con la estrategia descrita por Bribiesca et al. (2020). Primero, generamos un conjunto de verdad fundamental o 'ground-truth' seleccionando partículas aleatoriamente y siguiéndolas visualmente en los hyperstacks y grabando sus coordenadas 3D+t. Después corremos el método automatizado de rastreo descrito en la Sección 3.4 para obtener las caminatas correspondientes. Finalmente, comparamos los datos grabados con los rastreados automáticamente por el sistema.

Seguimos 81 partículas manualmente durante el proceso de evaporación desde la parte más alta de la gota hasta el final, cuando la evaporación termina. Encontramos que la longitud total de trayectorias 'ground-truth' fue detectada y rastreada correctamente con una precisión mediana de 94 % (primer y tercer cuartil 89 % y 98 % respectivamente).

#### 3.4.3. Proyección 'rz' y obtención de campos de velocidad

La estructura tetra-dimensional de la información obtenida presenta inherentemente un desafío para visualización del flujo interno. En la Sección 4.2 se muestra que el flujo interno de una gota es radial y axisimétrico respecto al centro de la gota. Esto permite analizar los campos de velocidad en el plano rz en lugar del volumen.

Los campos de velocidad se obtienen de la siguiente manera. El vector velocidad de las partículas en cada tiempo se obtiene a partir de la diferencia entre su posición en el tiempo actual y siguiente. Una vez que se obtuvo el vector 3D de velocidades, la posición 3D de las partículas se proyecta al plano rz, donde r es la magnitud de su vector de posición  $\vec{XY}$  y z se mantiene igual. La velocidad radial se obtiene calculando la proyección del vector de velocidad sobre el plano vertical tangente al vector  $\vec{XY}$ , usando una matriz de rotación y la velocidad vertical, de nuevo se mantiene igual.

Una vez que se obtuvieron las coordenadas rz y componentes de velocidad de todas las partículas se hace un mayado y se promedia la velocidad en cada rectángulo para obtener los campos de velocidad. Promediamos velocidad en cada cubo en un intervalo de 3 s para obtener el flujo local.

# RESULTADOS

## 4.1. Distribución volumétrica de las partículas

La Figura 4.1 muestra la distribución de los trazadores a diferentes alturas cada 64 segundos durante el proceso de evaporación de una gota de agua sésil, calculada por el método descrito en la sección 3.4.1. Inicialmente (t = 0 s), las partículas se encuentran repartidas de forma escasa y homogénea en el volumen. Conforme el proceso avanza (t = 64 s), se empieza a observar una mayor concentración de partículas en las partes más altas de la gota ( $z = 120 \ \mu m$  y  $z = 180 \ \mu m$ ), debido a que la superficie baja ligeramente más rápido que las partículas y las va atrapando. También incrementa la densidad de partículas cerca del substrato ( $z = 0 \ \mu m$ ), debido a que las partículas que se encontraban inicialmente lejos de la superficie libre y del substrato, van descendiendo. Después (t = 128 s), la altura de la gota ha disminuido tanto que ya no hay partículas en la maya localizada a 180  $\mu$ m. La superficie sigue descendiendo y atrapando partículas, incrementando la densidad en  $z = 120 \ \mu m$  y formando un anillo en  $z = 60 \ \mu m$  que en realidad es una sección del casquete esférico. Con  $z = 0 \ \mu m$  comienza a distinguirse el coffee ring en la línea de contacto, como lo describieron Deegan et al. (1997, 2000). Finalmente (t = 192 s), la altura de la gota es de alrededor de 90  $\mu$ m, por lo cual, no hay partículas arriba de 120  $\mu$ m de altura. La cantidad de partículas en la superficie de la gota sigue aumentando y el *coffee ring* también se vuelve más denso. El tiempo total de evaporación de la gota fue de 256 s. Es interesante recalcar que todos los métodos asistidos por computadora que se han utilizado anteriormente para analizar la dinámica de evaporación de gotas dependen de la capacidad de un programa para inferir los obtener los campos de velocidad infiriendo el movimiento de partículas en tiempos consecutivos (ver Capítulos 2.3). El análisis de la densidad de los trazadores depende exclusivamente de la segmentación de las partículas y no hace inferencias sobre el movimiento de éstas, por lo cual es una forma altamente precisa de analizar la dinámica de evaporación y formación de sedimento de forma visual y cuantitativa.



**Figura 4.1:** Distribución volumétrica de trazadores (Azul=0, rojo=20 partículas). El eje horizontal representa el tiempo. El eje vertical representa la altura. El tiempo total de evaporación es de 256 s.

## 4.2. Flujo general

Se analizó el flujo interno de la gota a partir de la información obtenida de las trayectorias 4D obtenida. La Figura 4.2 muestra las trayectorias tridimensionales obtenidas. La Figura 4.2a muestra las trayectorias obtenidas de los 1,500 trazadores contenidos en la gota. La Figura 4.2b muestra ejemplos escogidos aleatoriamente de trayectorias de partículas. Esta figura demuestra cómo las partículas que se localizan inicialmente cerca de la superficie se desplazan de forma vertical conformen avanza el proceso, mientras que las partículas que comienzan dentro de la gota se desplazan hacia afuera.



**Figura 4.2:** Trayectorias tridimensionales de (a) todas las partículas detectadas y (b) algunos ejemplos. El código de color representa el tiempo (t=0 azul, t=260 rojo)

#### 4.2.1. Ejemplos de trayectorias en el plano 'rz'

Se identifican tres tipos de trayectorias diferentes, que dependen de la altura inicial de las partículas. Las partículas que comienzan cerca de la superficie libre de la gota bajan junto con el casquete esférico y su movimiento es predominantemente vertical hasta que la gota se rompe, como se muestra en la Figura 4.3a. Las trayectorias que comienzan abajo, cerca del substrato se desplazan radialmente hacia afuera, como se muestra en la Figura 4.3b. Finalmente, las trayectorias que no comienzan cerca de la superficie ni el substrato, se desplazan radialmente hacia afuera hasta que la superficie las alcanza, haciendo que su comportamiento cambie y comiencen a desplazarse

verticalmente (Fig. 4.3c).



**Figura 4.3:** Ejemplos de trayectorias proyectadas en 'rz'. El código de clores representa el tiempo (s) y las curvas representan la superficie libre de la gota en el tiempo correspondiente. a) Trayectorias que comienzan en la superficie. b) Trayectorias que comienzan cerca del substrato. c) Trayectorias que comienzan lejos de la superficie y el substrato.

#### 4.2.2. Vista plana

La Figura 4.4 muestra la evaporación de una gota sésil vista desde arriba. El código de colores describe el tiempo y (t=0 s) es el inicio del proceso de evaporación. En esta

perspectiva se muestra que el flujo es radial y axisimétrico durante todo el proceso. Conforme el proceso avanza la velocidad de las partículas aumenta y, por lo tanto las partículas en la Figura 4.4c se desplazan mucho más rápido que las partículas en la Figura 4.4a. Fue posible grabar ambas etapas del proceso debido al uso secuencial de las dos cámaras para aumentar la resolución temporal.



**Figura 4.4:** Vista plana de las trayectorias de las 1500 partículas en diferentes tiempos de evaporación. Tiempo inicial (t=0) es el inicio del proceso de evaporación. a) 0 s, b) 90 s, c) 180 s; El código de color representa el tiempo.

#### 4.2.3. Flujo cerca del substrato

El programa desarrollado permite limitar la altura máxima de los segmentos de trayectorias desplegados para analizar solamente el flujo cercano al substrato. La Figura 4.5a muestra el flujo contenido en una rebanada que va de 0 a 10  $\mu$ m. Analizando estas trayectorias observamos que la mayoría de las partículas que inician cerca del substrato permanecen fijas durante todo el proceso. Hay una pequeña velocidad azimutal cuando el proceso de evaporación está cerca de terminar. Tomando una rebanada más gruesa, de 20  $\mu$ m de altura, observamos que las partículas que no inician pegadas al substrato se dirigen radialmente hacia afuera (Fig. 4.5b).



**Figura 4.5:** Trayectorias de partículas (a) con z < 10  $\mu m$  y (b) z < 20  $\mu m$ . El código de colores representa el tiempo

## 4.3. Redistribución de partículas

Para simplificar la información 4D de las trayectorias y analizar la formación del sedimento desarrollamos una herramienta de visualización en Python (Van Rossum and Drake, 2009) que permite graficar la posición radial inicial contra la final de los trazadores, como se muestra en la Figura 4.6. De este modo, los puntos trazados en la diagonal (x = y) representan a las partículas que terminaron a la misma distancia que comenzaron, los puntos trazados por arriba de la diagonal (y > x) representan partículas que se alejaron del centro durante el proceso y, finalmente, los puntos trazados debajo de la diagonal (y < x) representan a las partículas que se desplazaron hacia el centro. La mayoría de las partículas que se mantienen fijas o se alejan del centro, son trazadores que comienzan a pequeñas alturas, mientras que las partículas que se acercan al centro son predominantemente trazadores que se localizaron inicialmente cerca de la superficie de la gota. Las partículas inicialmente cercanas al centro se desplazan poco, igual que las más lejanas. Las partículas inicialmente entre 100 y 350  $\mu$ m del centro son las que más se desplazan durante el proceso de evaporación.



**Figura 4.6:** Redistribución de partículas en el volumen de gota de acuerdo con su posición inicial en la dirección radial y la altura inicial paramétrica para el intervalo de tiempo desde el inicio hasta el momento en que las partículas tocan por primera vez el substrato. El código de colores indica la altura inicial del trazador.

## 4.4. Flujo superficial

La Figura 4.7a muestra las trayectorias promediadas de las partículas localizadas inicialmente sobre la superficie libre de la gota. Las partículas que comienzan cerca de la parte más alta ( $r < 100 \mu m$ ) se separan 23 % de su distancia original. Lo opuesto se observa en el resto de las trayectorias ( $150 < r < 320 \mu m$ ), donde hay una compresión de 9 %.

La Figura 4.7b muestra la velocidad radial de la superficie libre en diferentes tiempos. Con  $r < 100 \mu m$  se observa que el flujo superficial es lento, mientras que con  $150 < r < 320 \mu m$  es más flujo rápido y se dirige hacia el centro de la gota.



**Figura 4.7:** Flujo superficial. El código de colores representa el tiempo. Las curvas grises representan la superficie en los tiempos correspondientes. (a) Movimiento de partículas localizadas inicialmente en las superficie libre. (b) Velocidad radial de la superficie libre en un tiempo fijo.

## 4.5. Campos de velocidad

Se obtuvieron los campos de velocidad instantáneos como se describió en la Sección 3.4.3. La Figura 4.8 muestra los campos de velocidad obtenidos (a) 120 y (b) 60 segundos antes de la evaporación total. El eje horizontal representa la componente r y el eje vertical la z. La linea gris representa la superficie libre de la gota en el tiempo correspondiente.



**Figura 4.8:** Campo de velocidades (a) 120 y (b) 60 segundos antes de la evaporación total. El eje horizontal representa la componente r y el eje vertical la z. La linea gris representa las superficie libre de la gota en el tiempo correspondiente.

# CONCLUSIONES

Se diseñó y se construyó un dispositivo experimental para explorar el flujo 3D de una gota en evaporación en función del tiempo. Este sistema, junto con algoritmos de procesamiento de imágenes nos permitió obtener las trayectorias 4D de más de 1500 trazadores contenidos en gotas de agua.

## 5.1. Distribución 4D de partículas

El análisis de la distribución de partículas demostró que durante el proceso de evaporación los trazadores se agrupan principalmente en la superficie de la gota. Además, nos permitió analizar la formación del *coffee ring* cerca del substrato.

## 5.2. Trayectorias

Obtuvimos por primera vez las trayectorias 4D completas de miles de trazadores. A partir de la información obtenida del flujo general se observó que éste es axisimétrico. Inicialmente las trayectorias son principalmente verticales y después horizontales.

## 5.3. Campos de velocidad

Se obtuvo el campo de velocidades a partir de las trayectorias. Se determinó que en la superficie el flujo se dirige ligeramente hacia el centro de la gota y el movimiento es predominantemente vertical. Dentro de la gota, el flujo es principalmente horizontal y se dirige hacia afuera. Conforme el proceso se acerca al final, la velocidad en algunas regiones puede aumentar hasta un orden de magnitud.

## 5.4. Flujo superficial

El sistema experimental nos permitió por primera vez separar el flujo superficial del flujo dentro de la gota. Se obtuvo la dinámica en la superficie y se determinó que la velocidad radial de la superficie en función de la posición es máxima cerca de la línea de contacto y disminuye en la parte más alta de la gota.

## PERSPECTIVAS

Es importante evaluar el desempeño de nuestro algoritmo para calcular los campos de velocidad y compararlo con el estado del arte. Para esto se propone generar flujos artificiales utilizando Python (Van Rossum and Drake, 2009), analizarlos a través de PIV y el método descrito en esta tesis (Sección 3.4.3) y determinar qué tanto se apegan al flujo real y en qué caso tiene mejor desempeño el método presentado.

El rastreo de los trazadores podría hacerse de forma más precisa creando un rastreador nuevo basado en filtros de Kalman (1960) o aprendizaje profundo. Esta podría ser una aportación útil no sólo para el análisis de flujos sino también para el rastreo automático de células en biología.

Por el lado físico, esta metodología abre posibilidades para hacer experimentos con diferentes condiciones experimentales, cambiando desde la temperatura y humedad hasta la composición de la gota. Por ejemplo, las sales caotrópicas, como la sal de mesa, al disolverse en líquidos polares como el agua incrementan la tensión superficial (Rossi and Marin, 2020). En una gota salada en evaporación, la sal se concentra en la superficie de la gota, donde la tasa de evaporación es más alta. Esto puede invertir la dirección del flujo de Marangoni y la circulación del flujo interno. Es importante analizar el flujo de gotas con sal en evaporación utilizando nuestra metodología, debido a que podría permitirnos desarrollar un modelo 4D de gotas con diferentes condiciones experimentales.

El sistema experimental desarrollado es una herramienta útil para obtener información volumétrica de muestras, incluso cuando presentan una aceleración que ocasiona que se requiera grabar la muestra a diferentes escalas de tiempos. Este sistema podría permitirnos analizar no solo fenómenos físicos sino biológicos en 4D, como es el caso de algunos cultivos de células (Berdeu et al., 2017).

## Bibliografía

- Arnold, K., Gosling, J., and Holmes, D. (2005). The Java programming language. Addison Wesley Professional.
- Bensimon, D., Simon, A. J., Croquette, V., and Bensimon, A. (1995). Stretching DNA with a receding meniscus: Experiments and models. *Phys. Rev. Lett.*, 74.
- Berdeu, A., Momey, F., Laperrousaz, B., Bordy, T., Gidrol, X., Dinten, J. M., Picollet-D'hahan, N., and Allier, C. (2017). 3D lens-free time-lapse microscopy for 3D cell culture. In *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, volume Part F61-E, page 104140C. OSA - The Optical Society.
- Bribiesca, A. (2018). Análisis de la dinámica tridimensional de evaporación de gotas de agua: Instrumentación y algoritmos. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Bribiesca, A., Montoya, F., Hernández, P., Ramos, E., and Corkidi, G. (2020). Device for experimental characterization of the 4D flow inside an evaporating sessile water droplet. *Rev. Sci. Instrum.*, 91(1):16101.
- Bribiesca, A., Montoya, F., Hernandez-Herrera, P., Ramos, E., and Corkidi, G. (2017).

Instrumentación y Algoritmos para el Análisis de la Dinámica Tridimensional de Evaporación de Gotas Sésiles de Agua. In *SOMI XXXII Congr. Instrumentación*, number October.

- Brutin, D., Sobac, B., Loquet, B., and Sampol, J. (2011). Pattern formation in drying drops of blood. J. Fluid Mech., 667:85–95.
- Christy, J. R., Sefiane, K., and Munro, E. (2010). A Study of the Velocity Field during Evaporation of Sessile Water and Water/Ethanol Drops. J. Bionic Eng., 7(4):321– 328.
- Corkidi, G., Montoya, F., Hernández-Cruz, G., Vargas, M., Luviano-Ortíz, J. L., and Ramos, E. (2016). Evaporation dynamics and sedimentation pattern of a sessile particle laden water droplet. *Exp. Fluids*, 57(6):99.
- Czarske, J. and Büttner, L. (2008). Micro Laser Doppler Velocimetry (μ-LDV). In Encycl. Microfluid. Nanofluidics, pages 1253–1255. Springer US.
- Deegan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S. R., and Witten, T. A. (1997). Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops. *Nature*, 389(6653):827–829.
- Deegan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S. R., and Witten, T. A. (2000). Contact line deposits in an evaporating drop. *Phys. Rev. E - Stat. Physics*, *Plasmas, Fluids, Relat. Interdiscip. Top.*, 62(1 B):756–765.
- Evans, B. W. (2008). Arduino Programming Notebook. Digit. PDF.
- Galliker, P., Schneider, J., Eghlidi, H., Kress, S., Sandoghdar, V., and Poulikakos, D. (2012). Direct printing of nanostructures by electrostatic autofocussing of ink nanodroplets. *Nat. Commun.*

- Gatapova, E. Y., Shonina, A. M., Safonov, A. I., Sulyaeva, V. S., and Kabov, O. A. (2018). Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: Focusing on the final stage of thin droplet evaporation. *Soft Matter*, 14(10):1811–1821.
- Hamamoto, Y., Christy, J. R., and Sefiane, K. (2011). Order-of-magnitude increase in flow velocity driven by mass conservation during the evaporation of sessile drops. *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, 83(5).
- Hejlsberg, A. and Torgersen, M. (2008). The C# Programming Language. Addison-Wesley Professional.
- Kabov, O., Zaitsev, D., Gatapova, E., Semenov, A., Bykovskaya, E., Karnauhova, E., Ajaev, V., Feoktistov, D., and Kuznetsov, G. (2014). Drop spreading and evaporation on a heated substrate under variable gravity conditions. In *Proc. 15th Int. Heat Transf. Conf. IHTC 2014.*
- Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Trans. ASME–Journal Basic Eng., 82:35–45.
- Kang, K. H., Lee, S. J., Lee, C. M., and Kang, I. S. (2004). Quantitative visualization of flow inside an evaporating droplet using the ray tracing method. *Meas. Sci. Technol.*, 15(6):1104–1112.
- Kim, H., Westerweel, J., and Elsinga, G. E. (2013). Comparison of Tomo-PIV and 3D-PTV for microfluidic flows. *Meas. Sci. Technol.*, 24(2).
- Li, Q., Zhu, Y. T., Kinloch, I. A., and Windle, A. H. (2006). Self-organization of carbon nanotubes in evaporating droplets. J. Phys. Chem. B, 110(28):13926–13930.

- Liu, Y. Y., Wang, P. Y., Dou, S. X., Wang, W. C., Xie, P., Yin, H. W., Zhang, X. D., and Xi, X. G. (2004). Ionic effect on combing of single DNA molecules and observation of their force-induced melting by fluorescence microscopy. J. Chem. Phys., 121(9):4302– 4309.
- Marín, Á. G., Gelderblom, H., Lohse, D., and Snoeijer, J. H. (2011). Order-to-disorder transition in ring-shaped colloidal stains. *Phys. Rev. Lett.*, 107(8).
- Maxwell, J. (1921). Scientific papers.
- Minor, G., Oshkai, P., and Djilali, N. (2007). Optical distortion correction for liquid droplet visualization using the ray tracing method: Further considerations. *Meas. Sci. Technol.*, 18(11):L23.
- Munkres, J. (1957). Algorithms for the Assignment and Transportation Problems. J. Soc. Ind. Appl. Math., 5(1):32–38.
- Picknett, R. G. and Bexon, R. (1977). The evaporation of sessile or pendant drops in still air. J. Colloid Interface Sci.
- Rajneesh, B., Xiaohua, F., and Daniel, A. (2009). Pattern formation during the evaporation of a colloidal nanoliter drop: a numerical and experimental study. New J. Phys., 11(7):75020.
- Rossi, M. and Marin, A. (2020). Single-Camera 3D PTV Methods for Evaporation-Driven Liquid Flows in Sessile Droplets. In Lamanna, G., Tonini, S., Cossali, G.E., Weigand, B., editor, *Droplet Interact. Spray Process.*, pages 225–236. Springer, 1 edition.
- Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., DeZonia, B. E., Walter, A. E., Arena, E. T.,
and Eliceiri, K. W. (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 18(1):529.

- Shabalin, V. N. (1996). Methods of diagnosing complicated urolithiasis and predicting urolithiasis.
- Tinevez, J. Y., Perry, N., Schindelin, J., Hoopes, G. M., Reynolds, G. D., Laplantine, E., Bednarek, S. Y., Shorte, S. L., and Eliceiri, K. W. (2017). TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking. *Methods*, 115:80–90.
- Trantum, J. R., Eagleton, Z. E., Patil, C. A., Tucker-Schwartz, J. M., Baglia, M. L., Skala, M. C., and Haselton, F. R. (2013). Cross-sectional tracking of particle motion in evaporating drops: Flow fields and interfacial accumulation. *Langmuir*, 29(21):6221– 6231.
- Van Rossum, G. and Drake, F. L. (2009). Python 3 Reference Manual. CreateSpace, Scotts Valley, CA.