

METODOLOGÍA DE RÁPIDA MEDICIÓN Y CONTEO DE MICROGOTAS DE AGUA USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.**METHODOLOGY FOR RAPID MEASUREMENT AND COUNTING OF WATER MICRODROPLETS USING DIGITAL IMAGE PROCESSING.**

PhD. Luis Gonzalo Vargas Q.*; MSc. Jose Pablo Montoya*; Ing. Mario Alejandro Muñoz León*; Ing. David Alejandro Salazar P.*; PhD. Alcides Montoya C.* ,

* **Universidad Nacional de Colombia**, Facultad de ciencias, Grupo de investigación en instrumentación científica e industrial.

Carrera 65 Nro. 59A - 110, Medellín, Antioquia, Colombia.

Teléfono: [57 + 604] 430 95 75

E-mail: {gvargas, jpmontoyav, mamunozl, daasalazarpa, [amontoya](mailto:amontoya@unal.edu.co)}@unal.edu.co.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2343-8852>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5255-4975>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0548-8087>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-1838-1546>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9624-6133>

Resumen: Este artículo sintetiza un procedimiento realizado para el recuento y medición del área y diámetro de gotas individuales procedentes de un generador de niebla piezoeléctrico. Se construyó un conjunto óptico basado en una cámara para capturar imágenes de las gotas de agua a contraluz. Utilizando el software ImageJ, se aplicó la técnica de umbralización auto localizada Sauvola, binarizando simultáneamente las gotas enfocadas y descartando las desenfocadas. Posteriormente, se calculó el área y el diámetro de las gotas; datos que fueron procesados usando MATLAB. Los resultados muestran que el método se comporta adecuadamente tanto en la binarización de las gotas enfocadas como en el descarte de las gotas desenfocadas en un solo paso, lo que resultó en un recuento fiable de gotas con una medición de 5 micrómetros de precisión.

Palabras clave: Procesamiento Digital de Imágenes, Medición de Tamaño de Gotas, Caracterización de Pulverizadores.

Abstract: This paper synthesizes a procedure performed for counting and measuring the area and diameter of individual droplets generated by a piezoelectric fog generator. A camera-based optical array was constructed to capture images of the water droplets against backlight. Using ImageJ software, the Sauvola Auto-Local Thresholding technique was applied, simultaneously binarizing the focused droplets and discarding the out-of-focus ones. Subsequently, the area and diameter of the droplets were calculated and processed using MATLAB. The results show that the method performs adequately in both binarizing the focused droplets and discarding the out-of-focus droplets in a single step, which resulted in a reliable droplet count with a measurement accuracy of 5 micrometers.

Keywords: Digital Image Processing, Droplet Size Measurement, Spray Characterization.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación sobre entornos controlados y nutrición vegetal gestionada en invernaderos está cobrando importancia a medida que las peores previsiones de cambio climático apuntan a la escasez tanto de agua como de tierra fértil. Las estructuras de entornos protegidos brindan a los agricultores la posibilidad de cultivar una gran variedad de productos en regiones donde tradicionalmente no podían cultivarse. Un factor especialmente importante en el crecimiento de las plantas en invernadero es la temperatura, que puede controlarse limitando la entrada de radiación infrarroja mediante la dispersión de Mie llevada a cabo por gotas de agua con valores de diámetro próximos a las longitudes de onda de la radiación dispersada. Sin embargo, esta aplicación requiere la medición del tamaño de las gotas para tener un control preciso (Wang *et al.*, 2015).

Las gotas de agua se miden más comúnmente a través de métodos ópticos (Fritz & Hoffmann, 2016), ya que ofrecen una estrategia directa para adquirir los tamaños e incluso su composición química sin alterarlos de ninguna manera, lo que permite su caracterización en condiciones normales de funcionamiento de aspersores, rociadores, salidas de chorro y sistemas de nebulización (Knop *et al.*, 2021). Los numerosos montajes utilizados para la medida óptica y recuento de gotas pueden clasificarse en general por el esquema de detección óptica utilizado, ya sea basado en cámaras o mediante fotodetectores como es el caso de las medidas interferométricas. En este trabajo desarrollamos un enfoque basado en cámaras debido a su simplicidad, coste relativamente bajo y rápido procedimiento de calibración.

Los métodos que se suelen utilizar en la obtención de imágenes de gotas en la agricultura son, por lo general, para aspersores y boquillas de suministro de pesticidas: Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) (Gollin *et al.*, 2017), interferometría doppler láser / dispersión láser [1], (Fritz & Hoffmann, 2016; Huber *et al.*, 2016), sondas de fibra óptica (Maaß *et al.*, 2011), imágenes de sombras con cámara ultrarrápida (Hijazi, 2012; Damsohn & Prasser, 2011) e imágenes de sombras con cámara iluminada por estroboscopia (Minov *et al.*, 2015). Se optó por esta última por su bajo costo y facilidad de implementación en comparación con las demás.

Para el posterior procesamiento de las imágenes se encuentran diferentes técnicas de análisis de

imágenes que permitían la medición automática de gotas, incluso en generadores de niebla que producen una alta densidad de gotas en áreas pequeñas. Estas técnicas incluían una Red Adversarial Generativa Atentiva (Li *et al.*, 2020), redes neuronales convolucionales (Soldati *et al.*, 2018), enfoques de aprendizaje profundo (Wang *et al.*, 2018) y un método de refractometría de arco iris notablemente interesante (Shin & Lee, 2010; Porav *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019) o una combinación de estos métodos (Bissell *et al.*, 2014). Otros enfoques más tradicionales incluían el uso de la transformada de Hough para la clasificación de gotas en tiempo real (Ramakrishnan *et al.*, 2015) y estadísticas de distribución de niveles de gris u otros análisis de perfiles de niveles de gris por líneas (Minov *et al.*, 2015; Sudheer & Panda, 2000).

El algoritmo final obtenido se basó en los pasos para la optimización de imágenes utilizados en (Zhao *et al.*, 2018) y (Chong *et al.*, 2016), pero en lugar de la extracción de características se optó por la umbralización autolocal de Sauvola (Sauvola & Pietikäinen, 2000) y el análisis binario de manchas con el software imageJ/Fiji.

2. EXPERIMENTACIÓN

2.1 Montaje experimental.

El montaje consistió en una cámara FLIR Flea 3.0 USB, un conjunto de lentes de microscopio con un zoom de 140X y una retroiluminación difusa desenfocada procedente de un LED blanco, como se muestra en la figura 1. De este modo se obtenía un fondo uniforme y no era necesario utilizar la luz estroboscópica, ya que con los ajustes seleccionados de la cámara se obtenían imágenes de alta calidad de las gotas. La cámara tomó imágenes de sombra retroiluminadas de las gotas a una velocidad de 60 FPS y un tiempo de obturación de 0,015 ms. Además, tomó imágenes de sombra retroiluminadas de las gotas a 60 FPS y 0,016 ms de tiempo de obturación. Se tomaron 600 fotogramas para cada configuración para un total de 10 segundos de captura de gotas. Algunos de los resultados se presentan en la figura 2. Se puede observar cómo un mayor tiempo de obturación afecta al movimiento aparente de las gotas, al enfoque individual de las gotas y a la profundidad del nivel de gris. Otros ajustes de la cámara utilizados incluyen una ganancia de 24 dB y el uso de la corrección automática del brillo. Las gotas se produjeron a partir de agua destilada mediante un

generador de niebla piezoeléctrico poroso de funcionamiento continuo.

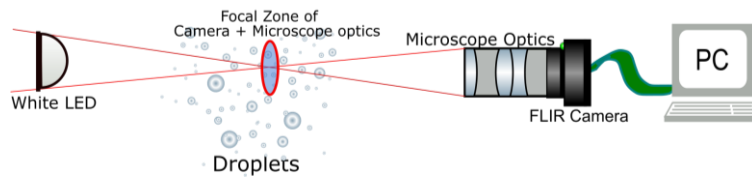


Fig. 1. Configuración óptica, la zona focal tiene una anchura medida de 5 mm.



Fig. 2. Comparación de imágenes de sombras de gotas obtenidas de la misma fuente con diferentes tiempos de obturación: 1,6 ms (izquierda) 0,16 ms (centro) y 0,016 ms (derecha)

Antes de capturar imágenes de las gotas, se realizó la calibración del sistema tomando imágenes de una regla de calibración C1 (de 1 milímetro de longitud) con marcas espaciadas $10\mu\text{m}$, antes de capturar cada conjunto de imágenes. La distancia entre las marcas se midió en píxeles con el software Fiji/ImageJ y a partir de ahí se obtuvo un factor de conversión de micrómetros a píxeles. Como el objetivo del microscopio tiene una pequeña profundidad focal de 3 mm, se asumió que cualquier gota que esté enfocada puede medirse en píxeles y convertirse a unidades de micrómetros utilizando la relación fija de píxeles a micrómetros. En el proceso de calibración se identificó una equivalencia de 4px (resolución de la cámara) por unidad de patrón de calibración, estimando la incertidumbre del sistema óptico como 1px equivalente a $2.5\mu\text{m}$.

2.2 Análisis de imágenes.

El proceso de análisis de las imágenes se realizó en el software Fiji/ImageJ. Cada toma fue cargada en el software para aplicar tres procesos con el fin de identificar la cantidad de gotas medibles por foto. El primer problema de recuento de gotas aparece cuando su definición de borde no es clara, en este caso tenemos gotas registradas por la cámara que

no estaban situadas en el rango del plano focal. Por esto, en primer lugar, se realizó una sustracción de fondo para cada una de las tomas, seguida de una optimización del contraste. Después de este proceso hubo ruido remanente. La solución consistió en aplicar un filtro de desenfoque llamado Median Filter en ImageJ, tal y como se utiliza en (Wu *et al.*, 2004). Por último, se aplicó la técnica de umbralización local automática de Sauvola para binarizar las gotas y poder realizar un recuento fiable. En la Fig. 3 se muestra un conjunto de imágenes de muestra de cada paso.

Tras la umbralización y binarización, Fiji/ImageJ permite al usuario extraer información sobre el conteo de un conjunto de píxeles blancos que forman un área (cada una de las gotas) y la información de dicha área. Las características de esta área se ajustan a los de una elipse, representada en la Fig. 4. Estos parámetros, todos en unidades de píxel, son sus coordenadas XY de la longitud de sus ejes mayor y menor y el ángulo entre ellos junto con el plano de referencia. El software proporciona un archivo .csv con toda la información en forma de columnas para cada gota blanca sólida o "partícula" encontrada en la imagen.

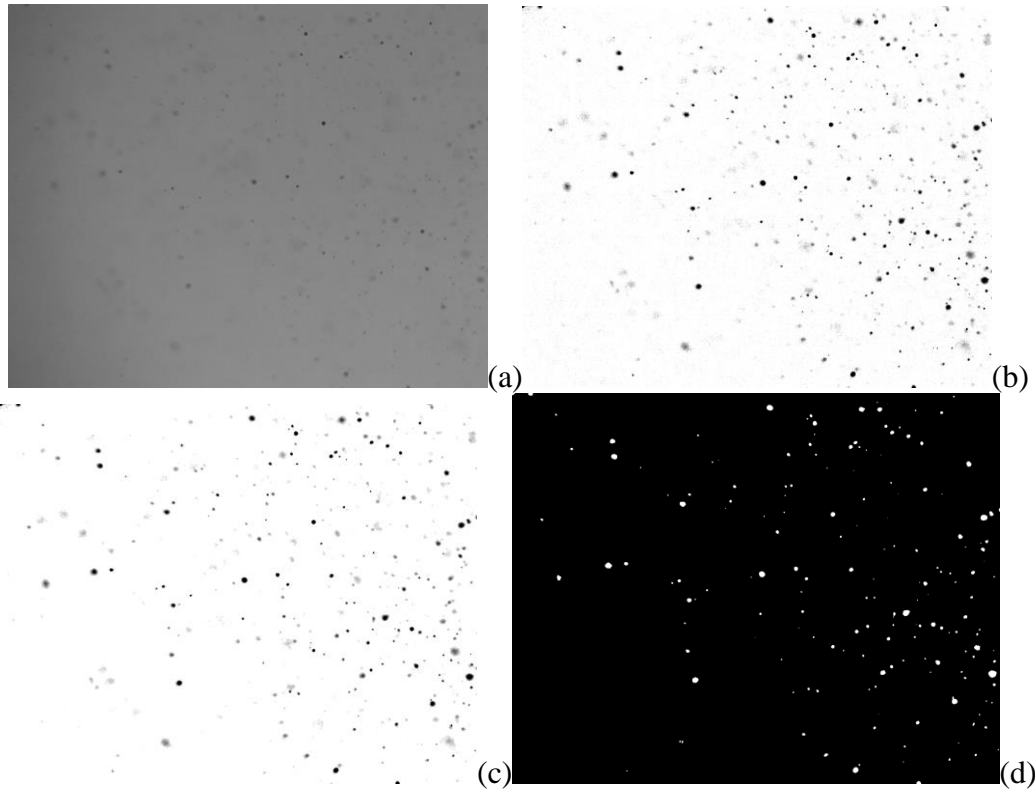


Fig. 3. Ejemplo de preprocesamiento de imágenes y aplicación del umbral local automático de Sauvola. (a) imagen real, (b) imagen con sustracción de fondo, (c) imagen con filtro de desenfoque, (d) imagen resultante con Sauvola.

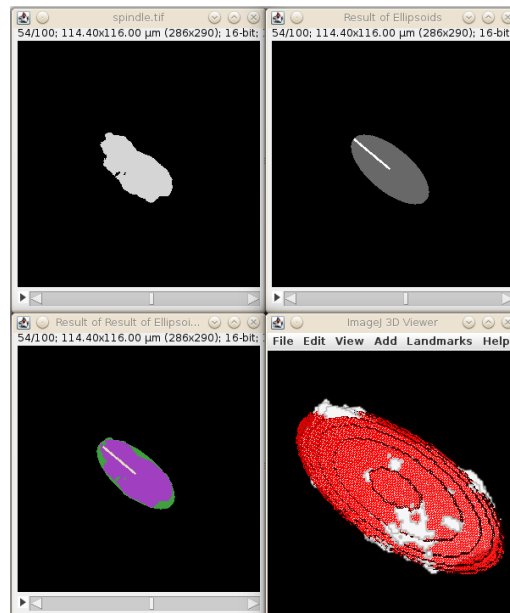


Fig. 4. Elipse de la función de análisis de partículas del software ImageJ / Fiji. Tomado de: https://imagejdocu.tudor.lu/tutorial/plugins/3d_ellipsoid bajo CCBYSA3.0.

Como la idea inicial del artículo es tener una aproximación del tamaño de la gota en cada imagen, se debe tener un patrón de comparación. El rendimiento del método se probó con una imagen de referencia que simulaba diferentes niveles de desenfoque de la gota aplicando un filtro gaussiano con radio incremental. En este caso se trataba de un patrón experimental realizado a partir de una imagen de referencia con seis niveles, cada nivel con un filtro gaussiano BLUR con radios de 0px (verdad base), 2,5px (imagen perfecta posiblemente adquirida por la cámara), 5px (sólo se considera desenfocado el círculo mínimo viable), 10px, 15px y 20 px (totalmente desenfocado). Cuando el radio del filtro es mayor que el diámetro de la gota, no se puede medir con precisión la anchura de la gota a partir de su imagen de sombra, por lo que estas gotas deben descartarse. La Fig. 5 muestra la mitad inferior de la imagen de referencia juto con su versión binarizada después de aplicar el umbral local automático de Sauvola. Puede observarse que los círculos con mayor grado de desenfoque quedan excluidos tras aplicar el filtro, simulando así gotas con cierto grado de desenfoque.

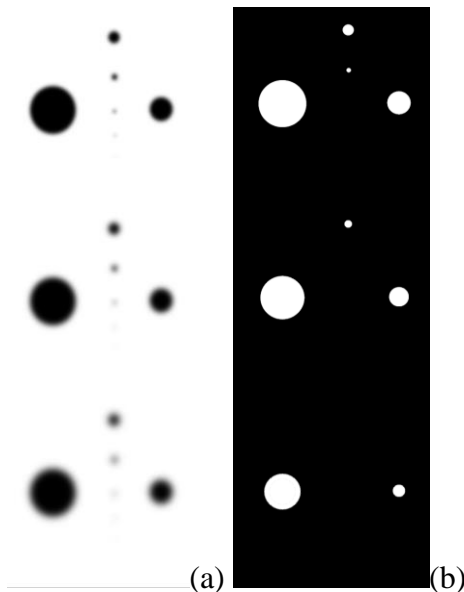


Fig. 5. (a) Mitad inferior de la imagen de referencia utilizada para probar el método y (b) resultado del proceso de umbralización local automática de Sauvola.

El porcentaje de diámetro luego de aplicar Sauvola (en comparación con su versión real) antes de que la imagen fuera suprimida fue de un 57%, es hecho indicó que el tamaño de diámetro mínimo de una partícula en el plano focal es de 5px (12.5 μ m). Sin

embargo, debido a es este criterio de basa en valores discretos de radios de difuminación, el valor mínimo de píxeles para describir un perfil circular es de 3, considerando su centro y ambos extremos de si circunferencia (7.5 μ m). Los conteos existentes inferiores a este valor deben ser considerados ruido, al igual que partículas que presenten un cociente entre el eje mayor y el eje menor de la elipse resultante para cada caso menor a 0.8.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 análisis de resultados

El procesamiento de los datos del archivo .csv que contiene los resultados se realiza en el software Mathworks © MATLAB en una sencilla secuencia de descarte de gotas inviables, aplicación de la escala de calibración de píxeles a micrómetros y, por último, trazado de histogramas junto con los valores medios y la desviación estándar de los datos del diámetro de las gotas.

La metodología de presentación gráfica de los datos procesados se realizó con un histograma comparativo del conjunto de datos de gotas de umbralización local automática y un conjunto de datos de umbralización binaria manual, contando las gotas por su tamaño. Ambos histogramas junto con su valor medio de diámetro y su desviación estándar se muestran en la figura 10.

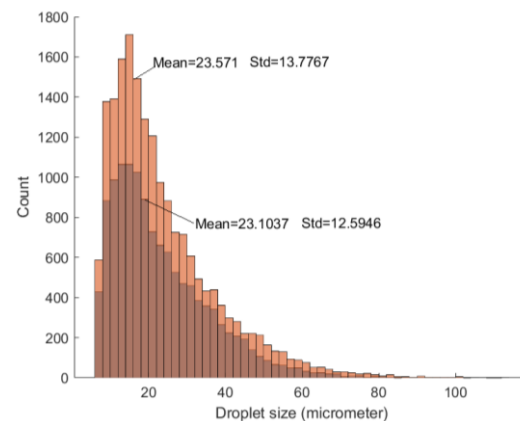


Fig. 6. Histogramas superpuestas de tamaño de gota Vs conteo. Gráfico naranja: Umbral binario manual, gráfico marrón: Umbral automático Sauvola.

El gráfico muestra que, para ambos métodos, el mayor número de gotas se encuentra entre los 10 y los 30 μ m de diámetro, con un pico máximo en torno a los 15 μ m. El umbral binario manual tiene un conteo máximo aproximado de 1700 gotas y el

umbral binario automático identificó 1100 gotas. El valor medio de ambos conjuntos de datos sólo varía en 0,467 μm . Comparando de la desviación estándar del conteo del umbral binario manual y del conteo del umbral automático de Sauvola se encuentra que, este último, tiende a estar más agrupado en torno a su media (Media = 23.1037 μm , desviación típica = 12.5946 μm), convirtiéndola en una distribución de datos que proporciona un valor de diámetro más fiable de cada gota además de mejorar la precisión del recuento, limitando el conteo de las gotas muy alejadas de la zona focal.

4. CONCLUSIONES

La metodología aplicada, tanto a nivel óptico como computacional, es sencilla y asequible y permite obtener resultados significativos en poco tiempo. La calidad de las imágenes y de su técnica de captura es esencial para el correcto funcionamiento del software de procesamiento de imágenes y, por tanto, para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos en el post-procesado. Con nuestra configuración informamos de mediciones de gotas de niebla de tamaño entre 7,5 y 100 μm con una incertidumbre de 2,5 μm .

El umbral local automático de Sauvola filtra las gotas desenfocadas y binariza la imagen en un solo paso, lo que permite obtener un valor estimado del número de gotas de una secuencia de imágenes que se encuentran en el mismo plano. Sin embargo, esto no funciona con gotas que son grandes en relación con el área de observación.

La técnica descrita en este artículo puede proporcionar valiosa información de primera mano para el estudio de las características físicas de aerosoles, sustancias atomizadas, generadores de niebla y otros casos que involucren partículas con un rango de tamaño de 10 -100 μm que puedan ser de interés. Combinando este sistema con imágenes coherentes o filtrado multiespectral se pueden encontrar aplicaciones para diferentes ramas de las ciencias naturales como la medicina, la biología y la física; así como para el ámbito artístico.

RECONOCIMIENTO

A la Universidad Nacional de Colombia por proporcionar los recursos necesarios para el desarrollo de los experimentos.

REFERENCIAS

- Wang, S., Dorr, G. J., Khashehchi, M., & He, X. (2015). Performance of selected agricultural spray nozzles using particle image velocimetry. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(3), 601-613.
- Fritz, B. K., & Hoffmann, W. C. (2016). Measuring spray droplet size from agricultural nozzles using laser diffraction. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, (115).
- Knop, I., Bansmer, S. E., Hahn, V., & Voigt, C. (2021). Comparison of different droplet measurement techniques in the Braunschweig Icing Wind Tunnel. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(2), 1761-1781.
- Gollin, D., Brevis, W., Bowman, E. T., & Shepley, P. (2017). Performance of PIV and PTV for granular flow measurements. *Granular Matter*, 19, 1-16.
- Huber, F. J., Altenhoff, M., & Will, S. (2016). A mobile system for a comprehensive online-characterization of nanoparticle aggregates based on wide-angle light scattering and laser-induced incandescence. *Review of Scientific Instruments*, 87(5), 053102.
- Maaß, S., Wollny, S., Voigt, A., & Kraume, M. (2011). Experimental comparison of measurement techniques for drop size distributions in liquid/liquid dispersions. *Experiments in Fluids*, 50, 259-269.
- Hijazi, B., Decourselle, T., Minov, S. V., Nuyttens, D., Cointault, F., Pieters, J. G., & Vangeyte, J. (2012). The use of high-speed imaging systems for applications in precision agriculture.
- Damsohn, M., & Prasser, H. M. (2011). Droplet deposition measurement with high-speed camera and novel high-speed liquid film sensor with high spatial resolution. *Nuclear engineering and design*, 241(7), 2494-2499.
- Minov, S. V., Cointault, F., Vangeyte, J., Pieters, J. G., & Nuyttens, D. (2015). Development of High-Speed Image Acquisition Systems for Spray Characterization Based on Single-Droplet Experiments. *Transactions of the ASABE*, 58(1), 27-37.
- Li, X., Liu, Z., Li, B., Feng, X., Liu, X., & Zhou, D. (2020). A novel attentive generative

- adversarial network for waterdrop detection and removal of rubber conveyor belt image. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1-11.
- Soldati, G., Del Ben, F., Brisotto, G., Biscontin, E., Bulfoni, M., Piruska, A., ... & Della Mea, V. (2018). Microfluidic droplets content classification and analysis through convolutional neural networks in a liquid biopsy workflow. *American journal of translational research*, 10(12), 4004.
- Wang, T., Kwok, T. H., Zhou, C., & Vader, S. (2018). In-situ droplet inspection and closed-loop control system using machine learning for liquid metal jet printing. *Journal of manufacturing systems*, 47, 83-92.
- Shin, Y. J., & Lee, J. B. (2010). Machine vision for digital microfluidics. *Review of Scientific Instruments*, 81(1), 014302.
- Porav, H., Bruls, T., & Newman, P. (2019, May). I can see clearly now: Image restoration via de-raining. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 7087-7093). IEEE.
- Wang, L., Yue, X., Liu, Y., Wang, J., & Wang, H. (2019). An intelligent vision-based sensing approach for spraying droplets deposition detection. *Sensors*, 19(4), 933.
- Bissell, D., Lai, W., Stegmeir, M., Troolin, D., Pothos, S., & Lengsfeld, C. (2014). An approach to spray characterization by combination of measurement techniques. In *ILASS Americas 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Portland*.
- Ramakrishnan, A., Thomas, C., & Tharakan, T. J. (2015, February). Spray characterisation using combined radon and hough transforms. In *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)* (pp. 1-5). IEEE.
- Sudheer, K. P., & Panda, R. K. (2000). Digital image processing for determining drop sizes from irrigation spray nozzles. *Agricultural Water Management*, 45(2), 159-167.
- Zhao, H., Zhou, J., Gu, Y., Ho, C. M. B., Tan, S. H., & Gao, Y. (2018, August). Real-time computing for droplet detection and recognition. In *2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)* (pp. 589-594). IEEE.
- Chong, Z. Z., Tor, S. B., Gañán-Calvo, A. M., Chong, Z. J., Loh, N. H., Nguyen, N. T., & Tan, S. H. (2016). Automated droplet measurement (ADM): an enhanced video processing software for rapid droplet measurements. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20, 1-14.
- Sauvola, J., & Pietikäinen, M. (2000). Adaptive document image binarization. *Pattern recognition*, 33(2), 225-236.
- Wu, C., Shi, Z., & Govindaraju, V. (2004, August). Fingerprint image enhancement method using directional median filter. In *Biometric Technology for Human Identification* (Vol. 5404, pp. 66-75). SPIE.