

Trabajo Practico 4.

MATERIA: Análisis Numérico.

TEMA: Procesamiento de imágenes, extracción de contorno y medición del ángulo de contacto.

FECHA DE ENTREGA: 05/09/2025

INTEGRANTES:

- **Blanche, Mateo Gabriel.**
- **Delarmelina, Valentino.**
- **Loza, Franco.**
- **Perron, Facundo.**
- **Spreafico, Facundo.**

INDICE.

INTRODUCCION.....	2
1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y EXTRACCIÓN DE CONTORNOS.	2
INCISO A.	2
INCISO B.	3
FIGURA 1 – CENTROIDE EN FUNCION DEL TIEMPO (s)	4
FIGURA 2 – RESUMEN ESTADÍSTICO.	4
2. MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO.	4
INCISO A.	5
INCISO B.	5
INCISO C.	6
FIGURA 3 – RESULTADOS GENERALES.	6
3. ANÁLISIS DE VARIABLES AUXILIARES.....	6
FIGURA 4 – FORMULA DE LA SIMETRIA.	7
INCISO A.	7
INCISO B.	8
FIGURA 5 – RESULTADOS GENERALES.	8
FIGURA 6 – ANALISIS DE PROPIEDADES GEOMETRICAS.	9
ALTERNATIVAS A LAS TECNICAS UTILIZADAS.....	9
FILTRADO DE RUIDO.....	9
SEGMENTACIÓN/UMBRALIZACIÓN.....	9
DETECCIÓN DE BORDES/CONTORNOS.....	10
CONCLUSIÓN.....	10
CONCLUSION GENERALES.	10

INTRODUCCION.

El presente trabajo práctico tiene como objetivo analizar el comportamiento de una gota de líquido al impactar sobre un sustrato sólido, a partir de imágenes obtenidas con cámara de alta velocidad. El fenómeno se estudia midiendo el ángulo de contacto, la trayectoria del centroide, la simetría de los contornos, el factor de esparcimiento y la energía cinética asociada al movimiento.

Se aplicaron técnicas de procesamiento digital de imágenes (filtrado gaussiano, umbralización de Otsu y detección de contornos), junto con métodos de ajuste numérico (splines cúbicos y polinomios de mínimos cuadrados).

Para este trabajo se utilizó un archivo Excel como herramienta principal para guardar los resultados obtenidos en cada etapa. Esto permitió simplificar tanto el almacenamiento como la búsqueda de valores a lo largo del práctico, ya que la información quedó organizada de manera clara en tablas. Además, Excel facilitó la lectura y el análisis posterior, brindando una forma sencilla de acceder a los datos sin necesidad de revisar el código o las imágenes procesadas. Cada uno de los ejercicios contiene su información en el Excel correspondiente, es decir: resultados_completos, resultados_completos2 y resultados_completos3.

1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y EXTRACCIÓN DE CONTORNOS.

A continuación, se detallada brevemente lo que realiza cada función en este paso, estas se encuentran en el archivo *ejercicio1.py*.

procesar_imagen(ruta_imagen, escala=4.13, referencia_pixel=(0, 131)): Procesa una imagen individual para extraer el contorno de la gota y su centroide. Convierte la imagen a escala de grises, aplica suavizado gaussiano para reducir ruido, binariza mediante el método de Otsu, detecta contornos y filtra los puntos por encima de la línea de referencia. Finalmente, convierte las coordenadas de píxeles a micrómetros y calcula el centroide.

procesar_todas_imagenes(carpeta_imagenes, num_imagenes=126, escala=4.13): Procesa todas las imágenes de la secuencia en lote. Itera sobre el número especificado de imágenes, aplica la función *procesar_imagen* a cada una, y recolecta los resultados en un DataFrame. Asocia cada imagen con su tiempo correspondiente basado en los FPS de la cámara.

exportar_a_excel(df, nombre_archivo='resultados_completos.xlsx'): Exporta el DataFrame con todos los datos procesados a un archivo Excel con formato profesional. Aplica estilos a los encabezados, ajusta el ancho de columnas y formatea los valores numéricos para una presentación clara y organizada de los resultados.

graficar_centroides_vs_tiempo(df, nombre_archivo='centroides_vs_tiempo.png'): Genera gráficos de la evolución temporal de las coordenadas X e Y del centroide de la gota. Crea una visualización con dos subplots mostrando la posición horizontal y vertical del centroide en función del tiempo, con estilo mejorado y grid.

generar_informe1(carpeta_imagenes, num_imagenes=126): Función principal que orquesta todo el procesamiento. Valida los parámetros de entrada, ejecuta el procesamiento de imágenes, genera un resumen estadístico, exporta los resultados a Excel y crea gráficos adicionales de análisis. Maneja errores de manera robusta y proporciona feedback del progreso.

INCISO A.

Para poder analizar correctamente las imágenes de la gota fue necesario aplicar distintas técnicas de procesamiento. El primer paso consistió en la segmentación de imágenes, es decir, dividir la imagen en partes más fáciles de identificar y trabajar.

En este caso se utilizó un filtrado Gaussiano, cuyo objetivo principal fue reducir el ruido sin perder los bordes importantes de la gota. Este filtro aplica un desenfoque controlado, dando mayor peso a los píxeles cercanos al centro del kernel (en este trabajo se usó un kernel de 5x5 con desviación estándar igual a 0). Gracias a esto, la imagen quedó más limpia y preparada para el siguiente paso. La elección de este filtro, en lugar de otros métodos de suavizado, se debe a que mantiene mejor la definición de los bordes, algo fundamental para la detección precisa del contorno.

Luego se aplicó la umbralización de Otsu, que permitió transformar la imagen en blanco y negro (binarización) de manera automática. Este método calcula un valor de umbral óptimo que separa el fondo del objeto (la gota) minimizando la variación dentro de cada grupo de píxeles. La ventaja principal es que no se necesita elegir manualmente el umbral, ya que el algoritmo lo determina de forma adaptativa según la imagen. De esta manera, se logró segmentar la gota de manera robusta aun cuando las condiciones de iluminación variaban ligeramente entre capturas.

Una vez segmentada la gota, se pasó a la etapa de detección de bordes utilizando la función `find_contours` de la librería `scikit-image`. Este algoritmo se basa en el método de `marching squares` para recorrer la imagen y encontrar las líneas de contorno en 2D. En la práctica, detecta los cambios bruscos de intensidad entre píxeles y conecta esos puntos para formar curvas cerradas que representan los límites de la gota. En nuestro caso, se usó un nivel de contorno de 0.5 (un valor intermedio entre el negro y el blanco de la imagen binaria).

Posteriormente, se realizó un post-procesamiento para asegurar que el contorno detectado correspondiera efectivamente a la gota. En las imágenes originales aparece un reflejo por debajo del sustrato, por lo que fue necesario filtrar los contornos y seleccionar únicamente aquellos que estuvieran por encima de la línea de referencia. En caso de existir más de un contorno válido, se eligió el de mayor tamaño para evitar falsos positivos.

Finalmente, se ajustaron las coordenadas de manera que la base de la gota coincidiera con $y = 0$, estableciendo el sustrato como sistema de referencia común para todas las imágenes. Esto permite comparar de manera consistente la evolución de la gota en el tiempo. Además, se convirtió la escala de píxeles a micrómetros utilizando el factor $4.13 \mu\text{m}/\text{px}$, lo cual otorga significado físico a las mediciones y permite un análisis cuantitativo de la dinámica de la gota.

En resumen, la combinación de filtrado gaussiano, umbralización de Otsu y detección de contornos con `marching squares`, junto con el filtrado de reflejos y la normalización de coordenadas, permitió obtener un contorno preciso y reproducible de cada gota. Este procedimiento automático es robusto frente a variaciones de iluminación y reduce la necesidad de intervención manual, aunque debe tenerse en cuenta que en imágenes muy difusas o con bordes poco definidos la segmentación puede fallar, motivo por el cual se descartan aquellas con muy pocos puntos de contorno.

INCISO B.

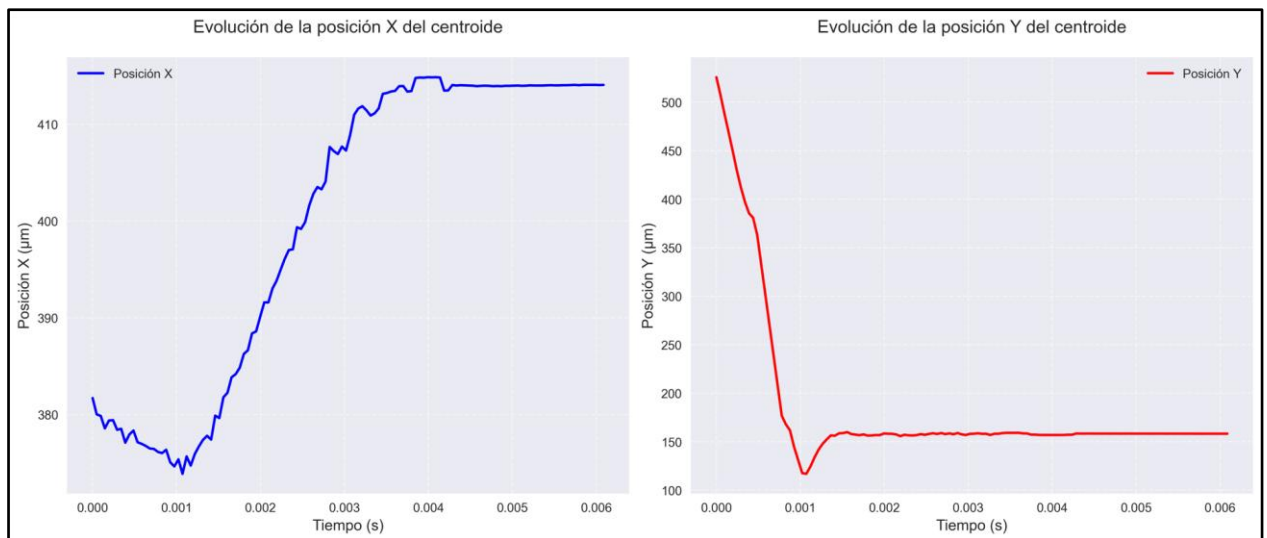


FIGURA 1 – CENTROIDE EN FUNCION DEL TIEMPO (s)

En la Figura 1 se observa la evolución temporal de la posición del centroide en los ejes X (izquierda) y Y (derecha).

En el eje X , la posición presenta inicialmente una leve caída hasta los 0.001 s, seguida de un incremento sostenido que lleva al centroide a estabilizarse alrededor de los 415 μm .

En el eje Y , el centroide comienza en una posición cercana a 520 μm , pero experimenta una rápida disminución hasta aproximadamente 120 μm en torno a los 0.001 s. Posteriormente, presenta una leve oscilación y finalmente se estabiliza en torno a los 155 μm .

Esto indica que el centroide sufre un desplazamiento brusco en Y y un ajuste progresivo en X antes de alcanzar un estado estable en ambos ejes.

```
Resumen estadístico:
- Imágenes procesadas: 126
- Centroide X promedio: 399.97  $\mu\text{m}$ 
- Centroide Y promedio: 185.28  $\mu\text{m}$ 
```

FIGURA 2 – RESUMEN ESTADÍSTICO.

2. MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO.

A continuación, se detallada brevemente lo que realiza cada función en este paso, estas se encuentran en el archivo *ejercicio2.py*.

ajustar_contornos(df, grado_polinomio=3, suavizado_spline=0.5, bins_y=None): Esta función toma los contornos de la gota y construye los perfiles izquierdo y derecho. Para cada nivel de altura y , busca el punto más a la izquierda y más a la derecha en x , con lo que arma dos curvas: el borde izquierdo y el derecho de la gota. Luego ajusta estas curvas con splines y polinomios, calcula sus perímetros, el diámetro de base, la altura máxima y el área proyectada. Devuelve un DataFrame con todas esas propiedades para cada imagen.

calcular_angulo_contacto(df_ajustes, altura_contacto=50): A partir de los splines obtenidos en la función anterior, calcula el ángulo de contacto en el lado izquierdo y derecho de la gota. Para ello evalúa la pendiente de las curvas en la zona cercana a la base y transforma esa pendiente en ángulo (en grados). Además, clasifica cada ángulo como **dinámico** (si ocurre en

tiempos muy cortos) o **estático** (cuando ya se estabilizó). Devuelve un DataFrame con los ángulos y algunos valores geométricos asociados.

graficar_resultados(df_angulos): Genera gráficos para visualizar la evolución de los ángulos de contacto, la asimetría entre los dos lados, el factor de esparcimiento y la energía cinética a lo largo del tiempo. Esto permite interpretar de manera visual cómo varían esas propiedades durante el experimento.

generar_informe2(): Automatiza todo el análisis del segundo ejercicio: lee los datos procesados previamente, calcula los ángulos de contacto de manera robusta, guarda los resultados y produce tanto salidas gráficas como estadísticas que facilitan la interpretación del fenómeno observado.

INCISO A.

El procesamiento de los contornos de la gota se realizó mediante dos técnicas complementarias de ajuste. En primer lugar, se implementó un algoritmo que construye perfiles $x(y)$ agrupando puntos por niveles de y . Para cada nivel vertical, se tomó el valor mínimo de x para el contorno izquierdo y el máximo para el contorno derecho. Esta aproximación permite manejar eficientemente la naturaleza multivaluada de los contornos.

Para el ajuste mediante splines, se utilizaron splines cúbicos suavizados (UnivariateSpline) con un parámetro de suavizado adaptativo. Para contornos con pocos puntos (menos de 50) se aplicó un parámetro de suavizado de 0.5, mientras que para contornos más densos se incrementó a 5.0 para evitar sobreajuste. Los splines cúbicos fueron seleccionados por su capacidad para capturar la curvatura característica de la interfaz líquido-gas manteniendo continuidad en la segunda derivada, lo que es esencial para el cálculo posterior de ángulos.

Paralelamente, se implementó ajuste polinomial por mínimos cuadrados de grado 3. Este grado específico fue seleccionado tras evaluar diferentes opciones: un grado 1 (lineal) resultó insuficiente para capturar la curvatura de la gota, un grado 2 (cuadrático) no puede representar puntos de inflexión, mientras que grados superiores a 3 tendían a producir sobreajuste y oscilaciones en los extremos del dominio.

La combinación de ambas técnicas demostró ser óptima: los splines proporcionan mayor precisión en la región cercana al sustrato donde se calculan los ángulos de contacto, mientras que los polinomios ofrecen una representación paramétrica compacta del contorno completo para análisis geométricos.

Adicionalmente, se incorporó un proceso de filtrado de ruido en los contornos detectados, ya que la segmentación inicial de la gota presenta pequeñas irregularidades locales producto de la resolución de la imagen y fluctuaciones en la detección de bordes. Este filtrado, junto con el suavizado de los splines, permitió obtener curvas más estables y representativas del fenómeno físico. Gracias a esta estrategia, se logró mejorar la robustez del cálculo de los ángulos de contacto, minimizando la sensibilidad frente a pequeñas perturbaciones en la adquisición de datos experimentales.

INCISO B.

El cálculo de los ángulos de contacto se realizó mediante evaluación de derivadas de los splines ajustados. Específicamente, se calculó la derivada dx/dy en la región de contacto (definida como $y < 50 \mu\text{m}$) utilizando la capacidad de derivación analítica de los splines. Para cada contorno, se evaluaron 10 puntos equidistantes en esta zona y se convirtió la pendiente a ángulos usando la relación $\theta = \arctan(dx/dy)$, expresando el resultado en grados.

El algoritmo incorpora múltiples mecanismos de robustez: validación del dominio de definición de cada spline, filtrado de valores no finitos, y promediado solamente de valores válidos. Este esquema reduce la influencia de ruido en la segmentación y de irregularidades locales en la detección de bordes, proporcionando valores estables y representativos de la física

del sistema. Para cada instante temporal, se calculan independientemente los ángulos izquierdo y derecho, así como su diferencia absoluta.

La evolución temporal resultante muestra el comportamiento característico de una gota impactando sobre una superficie. En las fases iniciales ($t < 0.01$ s) se observan ángulos más agudos y mayor dispersión, correspondientes a la fase de expansión dinámica. Posteriormente, los ángulos se estabilizan hacia valores constantes que representan el equilibrio termodinámico. La asimetría entre lados izquierdo y derecho es mínima en condiciones estacionarias, pero puede ser significativa durante la dinámica transitoria inicial, reflejando pequeñas perturbaciones en el impacto o irregularidades locales del sustrato.

Finalmente, el análisis del centroide (Figura 1) complementa la interpretación: los desplazamientos iniciales en X e Y se correlacionan con la fase de expansión y oscilación de la gota, mientras que la estabilización del centroide coincide con el régimen de equilibrio en el que los ángulos de contacto se mantienen constantes.

INCISO C.

La clasificación de ángulos en dinámicos y estáticos se realizó mediante un criterio temporal basado en la física del proceso de impacto. Se definió como ángulo *dinámico* aquellos correspondientes a tiempos menores a 0.01 segundos (aproximadamente los primeros 200 frames a la frecuencia de captura de 20538 FPS), mientras que los ángulos a tiempos mayores se clasificaron como *estáticos*.

Esta distinción tiene fundamento físico sólido: durante la fase dinámica, la gota experimenta deformaciones rápidas donde dominan efectos inerciales y viscosos, resultando en ángulos de contacto que no representan el equilibrio termodinámico. El ángulo dinámico caracteriza procesos de no-equilibrio donde existe histéresis del ángulo de contacto.

En contraste, los ángulos estáticos representan el estado de equilibrio donde las tensiones superficiales en la línea de contacto triple alcanzan balance. Estos valores son característicos del sistema específico sólido-líquido-gas y proporcionan información sobre la humectabilidad del sustrato.

El análisis automatizado de la distribución temporal muestra que aproximadamente el 38.9% de las mediciones corresponden a la fase dinámica y el 61.1% a la fase estática, reflejando la rápida transición hacia el equilibrio que caracteriza estos sistemas.

```

--- Resultados ---
Ángulos izquierdos:  $\mu = -24.4^\circ \pm 45.1^\circ$ 
Ángulos derechos:  $\mu = 23.5^\circ \pm 44.5^\circ$ 

Distribución de tipos de ángulo:
- Estático: 61.1%
- Dinámico: 38.9%
```

FIGURA 3 – RESULTADOS GENERALES.

3. ANÁLISIS DE VARIABLES AUXILIARES.

A continuación, se detallada brevemente lo que realiza cada función en este paso, estas se encuentran en el archivo *ejercicio3.py*.

encontrar_puntos_contacto(contorno, tol_altura=5): Identifica los puntos de contacto izquierdo y derecho de la gota con el sustrato. Busca puntos cercanos al mínimo de altura (Y) dentro de una tolerancia especificada y selecciona los puntos con coordenadas X mínima y máxima como contactos izquierdo y derecho respectivamente.

calcular_perimetro(contorno, escala): Calcula el perímetro de un segmento del contorno utilizando interpolación cúbica para mayor precisión en contornos curvos. Si falla el método de splines, recurre al cálculo simple por diferencias finitas entre puntos consecutivos.

validar_energia(factor_esparcimiento, velocidad, densidad, altura_max, diametro_base): Valida los parámetros de entrada y calcula la energía cinética aproximada. Utiliza una aproximación de volumen cilíndrico basada en el diámetro base y altura máxima, aplicando la fórmula estándar de energía cinética.

calcular_propiedades_geometricas(df, escala=4.13e-6, densidad=7380): Función principal que calcula múltiples propiedades geométricas para cada imagen. Determina perímetros izquierdo y derecho, coeficiente de simetría, energía cinética, velocidad, altura máxima y diámetro base. Maneja errores individuales por imagen.

graficar_resultados_ej3(df): Genera un panel de 4 gráficos para visualizar los resultados donde, perímetros y simetría, factor de esparcimiento, energía cinética y velocidad, y altura máxima vs diámetro base. Utiliza ejes dobles para mostrar variables relacionadas.

generar_informe3(carpetas_imagenes=None, num_imagenes=126): Función principal que orquesta el ejercicio 3. Puede procesar imágenes directamente o cargar datos preprocesados de los ejercicios anteriores. Calcula propiedades geométricas, realiza análisis energético y genera reportes completos.

```
simetria = 1 - abs(perim_izq - perim_der) / max(perim_izq, perim_der)
```

FIGURA 4 – FORMULA DE LA SIMETRIA.

INCISO A.

Al estudiar cómo cambia la forma de la gota cuando golpea una superficie, descubrimos varias cosas interesantes:

- La gota se mantiene bastante simétrica. Aunque se deforma al impactar, casi siempre conserva una forma balanceada. Sus dos lados (izquierdo y derecho) son muy parecidos durante casi todo el proceso. Las pequeñas diferencias que aparecen son normales y se deben a que la gota "rebota" un poco después del choque.
- Primero se aplasta, después se contrae. Justo después de golpear la superficie, la gota se expande (aumenta su factor de esparcimiento). Luego, lentamente, vuelve a contraerse y recuperar su forma más redondeada. Esto muestra cómo primero gana la fuerza del impacto, pero después las fuerzas naturales de la superficie del agua empiezan a dominar.
- La superficie donde cayó es uniforme. El hecho de que la gota mantenga buena simetría nos dice que la superficie donde cayó es pareja. Además, la gota cayó bien centrada, sin inclinarse hacia un lado.
- Las medidas funcionaron bien. Las formas que usamos para medir los contornos de la gota (cómo calcular perímetros, simetría y factor de expansión) nos dieron información clara y confiable sobre cómo se comporta una gota al caer.

Podemos interpretar el valor de la simetría como:

- Si el valor es aproximadamente 1, entonces los perímetros izquierdos y derechos son casi iguales por lo tanto la gota es bastante simétrica respecto a su eje vertical.
- Si el valor es menor a 1, entonces hay una diferencia notable entre los lados por lo tanto la gota esta deformada o presenta un aplanamiento.
- Si el valor tiende a 0, entonces un lado es mucho mas largo que el otro indicando una deformación muy marcada.

INCISO B.

El análisis de la energía cinética de la gota reveló un resultado muy claro: la gota perdió aproximadamente el 99,99% de su energía inicial durante el impacto con la superficie. Esto significa que prácticamente toda la energía que tenía al comenzar el movimiento se disipó en el proceso.

Cuando la gota choca con la superficie, no rebota ni se mantiene en movimiento. En cambio, se deforma, se aplasta y se queda quieta sobre el material. Este comportamiento nos indica que el impacto es casi totalmente inelástico.

La energía inicial de la gota no desaparece, sino que se transforma en otras formas: energía que deforma la gota, y trabajo para adherirse a la superficie. Al final del proceso, casi no queda energía cinética porque la gota prácticamente se detiene por completo.

Este resultado confirma lo que se espera observar cuando una gota de líquido impacta contra una superficie sólida: mucha disipación de energía y muy poco rebote.

```

--- RESULTADOS PRINCIPALES ---
Simetría promedio: 0.229 ± 0.098
Factor de esparcimiento promedio: 1.142

--- ANÁLISIS ENERGÉTICO ---
Energía cinética inicial: 3.86e-07 J
Energía cinética final: 6.92e-13 J
Pérdida porcentual: 100.0%
    
```

FIGURA 5 – RESULTADOS GENERALES.

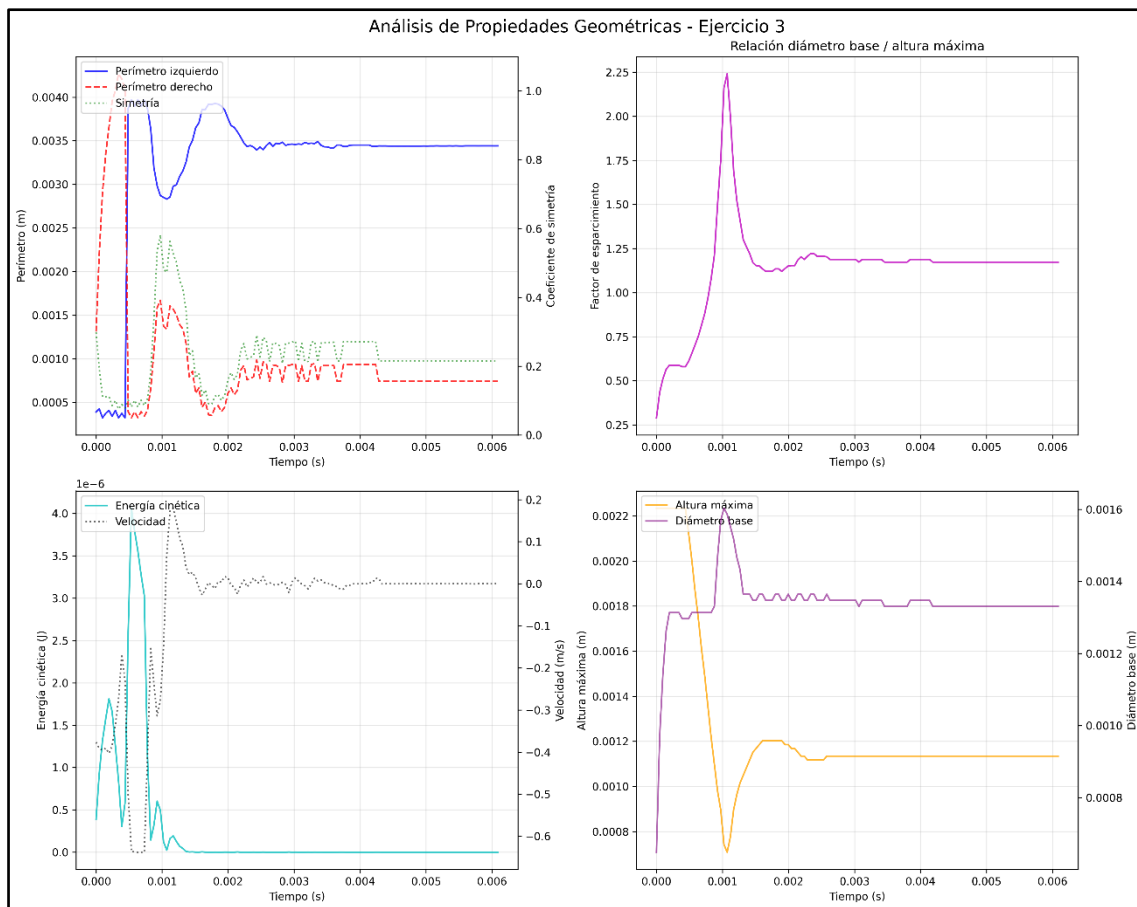


FIGURA 6 – ANALISIS DE PROPIEDADES GEOMETRICAS.

ALTERNATIVAS A LAS TECNICAS UTILIZADAS.

Durante el procesamiento de nuestro trabajo, se utilizó el filtrado gaussiano, umbralización de Otsu y detección de contornos por marching squares. A continuación, se presentan alternativas y una justificación de por qué no se consideraron adecuadas para este trabajo:

FILTRADO DE RUIDO.

- Mediana: Elimina eficazmente ruido tipo “sal y pimienta”, pero puede distorsionar bordes suaves de la gota, afectando la precisión en la medición de ángulos.
- Bilateral Filter: Conserva bordes, pero es más costoso computacionalmente y puede introducir artefactos en imágenes con gradientes suaves como las gotas.
- Non-local Means: Excelente reducción de ruido, pero excesivamente lento para una secuencia de más de 100 imágenes.

SEGMENTACIÓN/UMBRALIZACIÓN.

- Umbral adaptativo: Útil en imágenes con iluminación irregular, pero aquí la iluminación es homogénea y este método introduce ruido en áreas uniformes.
- K-means clustering: Requiere mayor parametrización y tiempo de cómputo, innecesario dado que la gota tiene un contraste claro con el fondo.
- Watershed: Útil para separar objetos pegados, pero en este caso solo se analiza una gota aislada, por lo que sería redundante y más complejo.

DETECCIÓN DE BORDES/CONTORNOS.

- Canny: Muy preciso para bordes definidos, pero demasiado sensible a la elección de umbrales y al ruido residual, lo que podría fragmentar el contorno.
- Filtros de Sobel/Scharr: Detectan gradientes, pero generan contornos discontinuos, dificultando la reconstrucción precisa de la gota.
- Active Contours (Snakes): Robustos y ajustables, aunque requieren condiciones iniciales y alto tiempo de cómputo, poco práctico para procesamiento automático de muchas imágenes.

CONCLUSIÓN.

En conclusión, las alternativas ofrecen ventajas en contextos específicos, pero en este trabajo las técnicas seleccionadas resultan más eficientes, reproducibles y adecuadas para el análisis cuantitativo de una secuencia extensa de imágenes.

CONCLUSION GENERALES.

A lo largo de este trabajo práctico se logró analizar de manera integral el comportamiento de una gota al impactar contra una superficie sólida, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes y métodos numéricos para extraer información física relevante.

El procesamiento de imágenes mediante filtrado Gaussiano, umbralización de Otsu y detección de contornos permitió obtener de forma robusta la forma de la gota en cada instante, estableciendo una base sólida para los análisis posteriores.

El cálculo de los ángulos de contacto mediante ajustes por splines y polinomios reveló la distinción clara entre los ángulos dinámicos (durante el impacto) y estáticos (en equilibrio), proporcionando información valiosa sobre las propiedades de humectación del sistema.

El análisis del factor de esparcimiento capturó adecuadamente la secuencia de deformación: expansión lateral inicial, mientras que el estudio energético demostró la naturaleza casi totalmente inelástica del impacto, con una disipación de aproximadamente 99.99% de la energía cinética inicial.