

# Filtros Morfológicos Aplicados en la Reconstrucción Tridimensional de Superficies

## *Morphological Filters Applied in Three-Dimensional Surface Reconstruction*

- id** **Luis Enrique Rodríguez-Olguín** es egresado del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) (lerodriguez@posgrado.cidesi.edu.mx), (<https://orcid.org/0000-0003-3975-7943>), Maestro.
- id** **Jorge Luis Pérez-Ramos** es profesor investigador de la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro (México) (jorge.luis.perez@uaq.mx), (<https://orcid.org/0000-0002-0444-9230>), Doctor.
- id** **Luis Antonio Díaz-Jiménez** es profesor investigador de la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro (México) ([luis.diaz@uaq.edu.mx](mailto:luis.diaz@uaq.edu.mx)), (<https://orcid.org/0000-0003-1519-105X>), Maestro.
- id** **Hugo Jiménez-Hernández** es profesor investigador de la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro (México) (hugo.jimenez@uaq.mx), (<https://orcid.org/0000-0003-0827-6645>), Doctor.

**Resumen:** Este trabajo presenta una metodología basada en filtros morfológicos para la detección precisa de irregularidades en superficies capturadas mediante sensores LiDAR. La creciente necesidad de monitorear y evaluar la integridad de infraestructuras urbanas y entornos industriales, donde pequeñas anomalías pueden ser indicativas de fallas estructurales críticas o problemas en líneas de producción, justifica el desarrollo de este enfoque. La metodología propuesta se desarrolla en dos etapas principales. En la primera, se utiliza un filtro de medias para completar la nube de puntos generada por el sensor, mejorando la calidad de los datos. En la segunda, se aplican filtros morfológicos Top-Hat y Bottom-Hat para detectar deformaciones por encima o por debajo de la superficie base de medición. El tamaño y la forma del elemento estructurante en 3D se determinan mediante el análisis del histograma de distancias respecto al plano de referencia. Este enfoque permite identificar con gran detalle deformaciones cóncavas y convexas, proporcionando un análisis preciso de las irregularidades en superficies nominalmente planas. Los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta aísla de manera eficiente las zonas deformadas, y que la sensibilidad de la detección varía según las características del elemento estructurante. Se presentan ilustraciones numéricas que validan la robustez y eficiencia del método, demostrando su aplicabilidad en escenarios que requieren un análisis de alta precisión.

**Palabras clave:** Reconstrucción, LiDAR, Filtros Morfológicos, Matemáticas Morfológicas, Reconstrucción 3D.

**Cómo citar:** Rodríguez-Olguín, L.E., Pérez-Ramos, J.L., Díaz-Jiménez, L.A. y Jiménez-Hernández, H. (2024). Filtros Morfológicos Aplicados en la Reconstrucción Tridimensional de Superficies. *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 83-93. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.83-93>

Recepción: 03-10-2024  
Aprobación: 23-10-2024

**Abstract:** Surfaces captured by LiDAR sensors. The growing need to monitor and assess the integrity of urban infrastructures and industrial environments, where small anomalies can be indicative of critical structural failures or problems in production lines, justifies the development of this approach. The proposed methodology is developed in two main stages. In the first, a mean filter is used to complete the point cloud generated by the sensor, improving the quality of the data. In the second, Top-Hat and Bottom-Hat morphological filters are applied to detect deformations above or below the measurement base surface. The size and shape of the 3D structuring element are determined by analyzing the histogram of distances from the reference plane. This approach allows identification of concave and convex deformations in great detail, providing an accurate analysis of irregularities on nominally flat surfaces. The results show that the proposed methodology efficiently isolates deformed zones and that the detection sensitivity varies according to the characteristics of the structuring element. Numerical illustrations are presented that validate the robustness and efficiency of the method, demonstrating its applicability in scenarios that require high-precision analysis.

**Keywords:** Reconstruction, LiDAR, Morphological Filters, Morphological Mathematics, 3D Reconstruction.

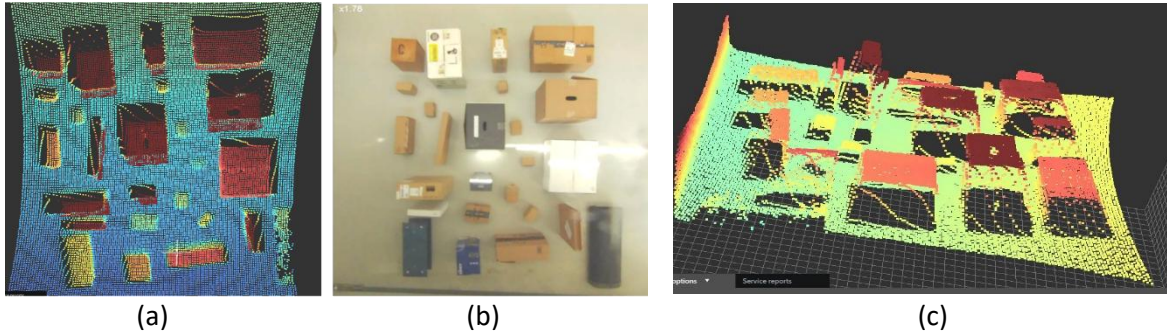
### Introducción

Desde hace algunos años, nos encontramos en la conversión al mundo digital, esto consiste en realizar una transformación digital de los entornos analógicos, la visión por computadora y el procesamiento de imágenes se han convertido en herramientas fundamentales en cualquier proceso industrial y social, permitiendo obtener información de relevancia para realizar toma de decisiones en sistemas inteligentes. En ese sentido, las tecnologías 4.0 integran estas tecnologías digitales para hacer eficientes los procesos industriales, de manufactura, maquinado, ensamblando, etc.; mejorando la calidad terminal del producto o servicio. Para lograr este cometido es necesario aplicar un conjunto de herramientas de Inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT), computo en la nube, realidad aumentada y algoritmos de visión por computadora (Jan, 2023; Bécue & Gama, 2021). Esta última, se relaciona directamente con la tecnología 4.0 permitiendo aprovechar el procesamiento de imágenes digitales para obtener de ellas información que permite automatizar procesos, implementar servicios de inspección de calidad inteligente, video vigilancia, entre otras. El alcance de estas teorías converge en procesos de toma de decisión inteligentes en entornos de la Industria 4.0 y en entornos urbanos de ciudades inteligentes (Lom, 2016; Wolniak, 2023; Li, 2021).

En esta misma idea, la captura de datos mediante sensores de distancia, en especial con sensores LiDAR (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) ofrece una captura de datos bastante representativa de un escenario cualquiera, en condiciones que una cámara RGB convencional no podría igualar (Khan, 2021). Estos sensores, que se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones, como el mapeo, la navegación en sistemas de robótica autónoma y reconstrucciones tridimensionales de superficies. Esta tecnología proporciona una nube de puntos, las cuales representan un sistema de coordenadas tridimensional que describe la superficie de un objeto o entorno. Por ello, un sensor de distancia es una buena opción para captura de escenarios en 3D como una nube de puntos dispersa donde los niveles o altura describen distancias entre el sensor y la superficie como se observa en la Figura 1, no obstante, podemos observar en (c) que la

captura de datos en bruto no ofrece una representación fiel, aun es necesaria contar con una etapa de filtrado para mejorar las características y el detalle necesario de representación.

**Figura 1.** Adquisición de datos con ToF: (a) nube de puntos desde vista superior; en (b) se tiene el escenario real en vista superior; y (c) una vista isométrica del escenario.



Los modelos 3D resultantes pueden ser reproducidos en un corto período de tiempo y de manera precisa. Dichos modelos son creados a partir de nubes de puntos, las cuales son representaciones de la superficie externa de un objeto dependiendo del ángulo de captura y la posición del sensor.

Las nubes de puntos proporcionadas por el sensor ofrecen los datos suficientes para poder generar modelos 3D de superficies, pero esta información necesita ser procesada mediante una etapa de filtrado. En la literatura podemos contar gran variedad de filtros que mejoran la información como: Filtros basados no lineales (Latouche, 2017), filtros basados en estadísticos (Chang, 2008; Griffin, 2000), filtros Gaussianos (Wang, 2014), filtros morfológicos (Soille, 1999), entre otros.

En este sentido la propuesta de esta metodología consiste en aplicar filtros morfológicos compuestos en nube de puntos para poder reconstruir una superficie en tres dimensiones, y de ella poder suavizar la superficie permitiendo determinar de forma detallada irregularidades en las superficies.

### Antecedentes y trabajos relacionados

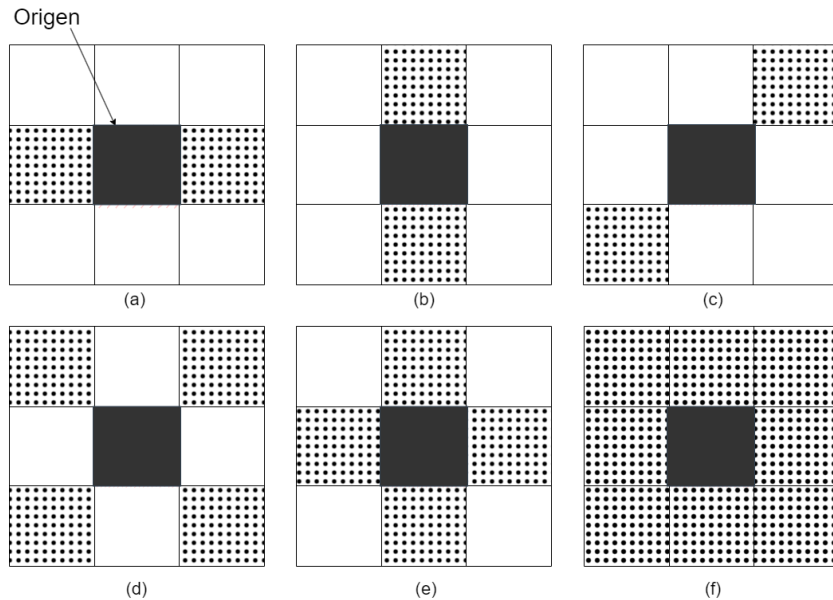
En el procesamiento de imágenes, la Morfología Matemática (MM) se comprende como el estudio de la topología o la estructura de objetos a partir de sus respectivas imágenes, esto se lleva a cabo como un por medio de un conjunto de operadores y filtros no lineales, donde una de sus mayores aplicaciones es en el procesamiento digital de imágenes, modificando la imagen de salida por medio de una estructura local llamado Elemento Estructurante (EE) que viaja sobre la imagen de forma ordenada. Como resultado se obtiene un objeto/imagen que contiene los aspectos más relevantes de su forma.

Las operaciones de la MM tienen como finalidad simplificar los datos asociados a la imagen preservando sus características esenciales de forma, eliminando irrelevancias. En las operaciones de la MM, el resultado de la interacción entre dos conjuntos depende de la forma de los conjuntos involucrados ya que sus características y defectos se correlacionan directamente con la forma.

El EE es una forma geométrica simple (por ejemplo: círculo, rectángulo, línea, etc.), que se utiliza como elemento de referencia, está definido por una ventana deslizante, con la cual se compara cada objeto de la imagen, permitiendo discriminar aquellos que poseen propiedades geométricas comunes, este EE se determina de manera que sus características geométricas (forma, tamaño, orientación, etc.) se identifiquen con las características morfológicas de los objetos presentes en la

imagen. En la Figura 2 se muestran ejemplos de elemento estructurante de diferentes formas de tamaño fijo.

**Figura 2.** Elemento estructurante en 2 dimensiones de tamaño  $3 \times 3$ , en diferentes



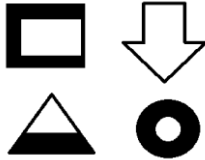

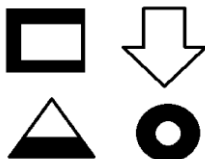

El EE es un componente clave en la morfología matemática, ya que determina cómo se procesan y analizan las formas y estructuras en imágenes o conjuntos de datos, como nubes de puntos. En el contexto de la morfología matemática, el elemento estructurante es un conjunto de píxeles (en 2D) o voxels (en 3D), o más generalmente, un conjunto de puntos con una forma y tamaño específicos que se utiliza para modificar o analizar una imagen o un objeto mediante operaciones morfológicas, como la dilatación, la erosión, la apertura o el cierre. La elección del EE adecuado es una tarea importante, dado que el EE como nube de puntos puede tener infinitas formas, tamaños, densidades y orientaciones.

### Operadores morfológicos básicos

En la MM se define dos operadores básicos: la dilatación y la erosión. Estas son la base de cualquier transformación morfológica. Cualquier operador, transformación o algoritmo incluirá una erosión, una dilatación o ambas primitivas en su implementación.

En primer lugar, la erosión en términos de la teoría de conjuntos, el conjunto erosionado siempre está contenido en el original. Una transformación que cumple esta propiedad se denomina “reductiva”. El efecto en imágenes binarias se puede observar en la Tabla 1 donde X define la imagen binaria de entrada y B el elemento estructurante cuadrado de tamaño  $5 \times 5$ , aplicando el operador erosión se obtiene una reducción de la imagen original.

**Tabla 1.**  
*Operadores morfológicos básicos y su efecto en imágenes binarias.*

Operador	Ecuación	Imagen Original	Aplicándole operador
Erosión	$X \ominus B = x   (B)_x \subseteq X$		
Dilatación	$X \oplus B = [x   (B)_x \cap X] \neq \emptyset$		

El segundo es la dilatación que se entiende como, el conjunto dilatado siempre contiene al original. Una transformación que cumple esta propiedad se denomina “extensiva”. En el caso de imágenes digitales, la dilatación representa un aumento de la imagen original.

### Filtros morfológicos

El resultado de esta aplicación sucesiva de erosiones y dilataciones es una eliminación de detalles menores, sin distorsionar la forma global del objeto. A esta manera de implementar estos operadores de manera sucesiva se le conoce como filtros morfológicos (Serra, 1982).

Los filtros morfológicos básicos son apertura y cerradura, el primer se encarga de suavizar el contorno de objetos, eliminando protuberancias y abriendo canales, este filtro está definido como se ve en la Ec. (1), se obtiene al aplicar una operación morfológica de erosión seguida de una dilatación.

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B \quad (1)$$

Por otro lado, la cerradura, el segundo filtro morfológico básico que tiene la función de eliminar pequeños orificios, fusionar brechas y alargar pequeñas entradas, este filtro se obtiene de una operación morfológica de dilatación seguida por una erosión y está definido como

$$X \bullet B = (X \oplus B) \ominus B \quad (2)$$

donde X representa a la imagen binaria, y B al elemento estructurante (Gil & Kimmel, 2002). En consecuencia, con la combinación y transformaciones de los operadores y filtros morfológicos básicos es posible generar nuevos operadores o algoritmos morfológicos. Para el desarrollo de este trabajo se propone implementar filtros morfológicos especiales, estos filtros son el Top-Hat y el Bottom-Hat.

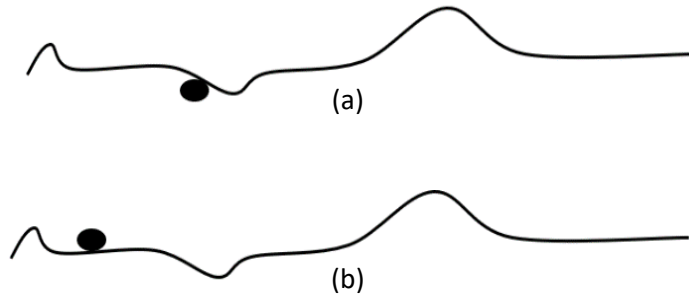
Estos filtros morfológicos sirven para detectar o resaltar detalles, por lo tanto, se pretende utilizar el filtro Top-Hat y el Bottom-Hat en la superficie tridimensional para identificar los defectos. El filtro Top-Hat realiza un recorrido del elemento estructurante a lo largo de la parte superior de la superficie con la finalidad de identificar los defectos que estén en la zona inferior. El filtrado top-hat calcula la apertura morfológica de la imagen y luego resta el resultado de la imagen original, este proceso se ve en la la Figura (3a) y Ec. (3):

$$T_{hat}(X) = X - X \circ B \quad (3)$$

En ese mismo orden, el filtro Bottom-Hat realiza un recorrido del elemento estructurante a lo largo de la parte inferior de la superficie con la finalidad de identificar los defectos en la parte superior de la superficie, el filtrado con bottom-hat calcula el cierre morfológico de la imagen y luego resta la imagen original como se observa en la Figura (3b) y Ec. (4)

$$B_{hat}(X) = X \cdot B - X \quad (4)$$

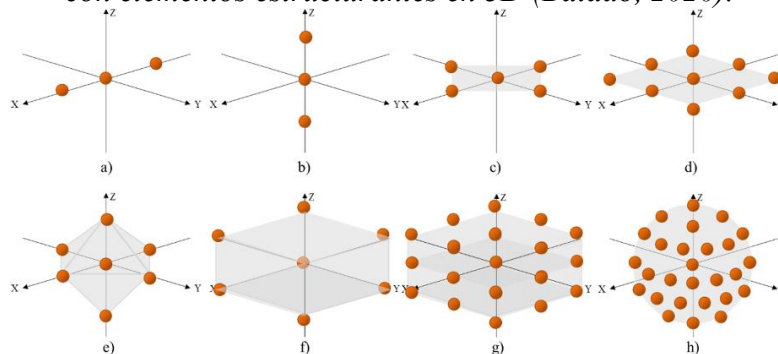
**Figura 3.** Filtros Morfológicos compuestos:  
(a) Filtro Bottom Hat, (b) Filtro Top Hat.



**Nota:** La línea representa la superficie tridimensional reconstruida y el círculo representa el elemento estructurante con el que se analizara la superficie.

Muchas de las técnicas de procesamiento de nubes de puntos tienen su origen en el procesamiento de imágenes. Pero la MM, a pesar de ser una de las técnicas de procesamiento de imágenes más utilizadas, aún no se ha adaptado claramente a aplicaciones 3D como son las nubes de puntos, encontramos más aplicación en 2D principalmente binarias. Por lo tanto, el objetivo del trabajo es implementar estos operadores y filtros en una reconstrucción 3D. Por lo tanto, para aplicaciones es necesario proponer un EE en 3D como se muestra en la Figura 4.

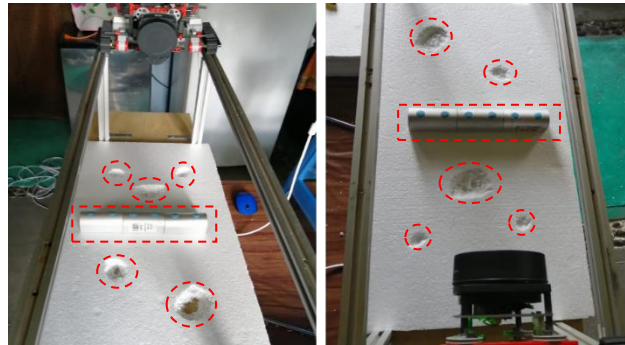
**Figura 4.** Operadores morfológicos con elementos estructurantes en 3D (Balado, 2020).



### Método

Para realizar el proceso experimental se tiene una estructura que permite mediante un recorrido lineal adquirir la topografía de una superficie con relieves y deformaciones que serán detectadas por el sensor LiDAR, en la Figura 5, podemos observar la superficie experimental con huecos simulando baches en el suelo o topes en cualquier camino.

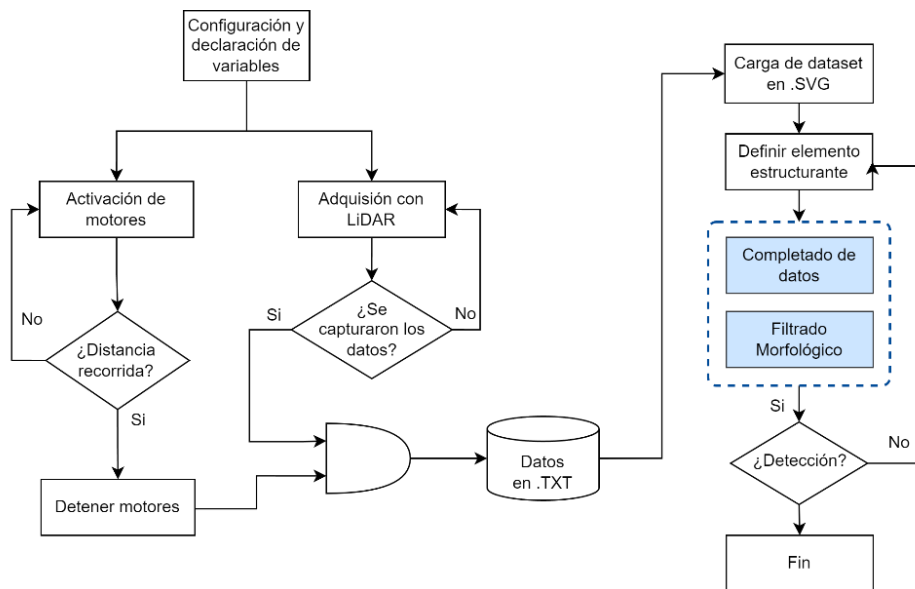
**Figura 5.** Estructura de prueba para la detección de relieves en superficies con LiDAR.



El método propuesto está compuesto por dos pasos: en la primera se describe el proceso de captura de información con el sensor LiDAR en forma de una nube de puntos carente de expresión o interpretación espacial. En el segundo paso es donde esta nube de puntos toma sentido mediante la aplicación iterativa de los filtros morfológicos.

En el siguiente diagrama de flujo de la Figura 6, se presenta de forma generalizada el proceso a seguir para poder replicar la experimentación, desde la tarea de recolección de información, estructurar la misma, procesarla y analizarla.

**Figura 6.** Proceso de captura y análisis de datos.

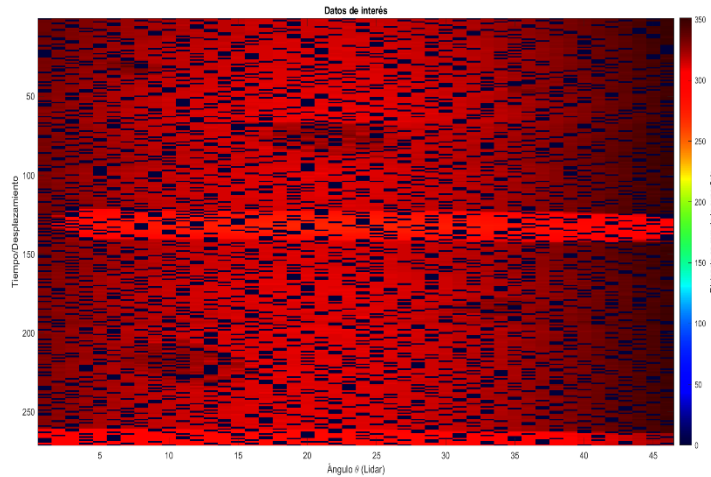


Como se mencionó la primera etapa es la parte de adquisición e interpretación de los datos, los primeros diagramas de flujo describen la programación del prototipo y la adquisición de datos por parte del sensor, el tercer algoritmo es para generar los datos para realizar la reconstrucción, son la matriz de datos en crudo a analizar. La segunda etapa describe la parte de la reconstrucción y filtrado morfológico para detectar y aislar los defectos en la superficie.

## Resultados

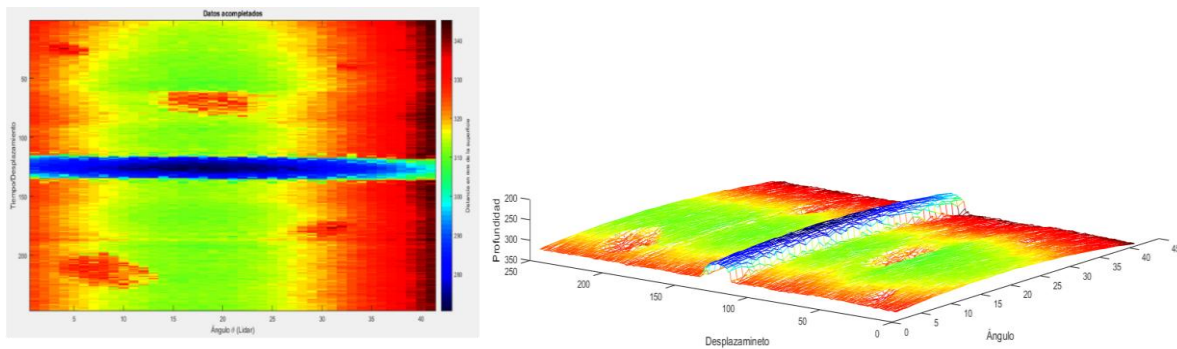
En la etapa de reconstrucción 3D por medio del procedimiento de la Figura 6, los datos adquiridos se aprecian en la Figura 7, los datos en color azul son valores que no se adquirieron correctamente por parte del sensor y que se completaron para obtener la reconstrucción por medio de un promedio de valores vecinos.

**Figura 7.** Datos crudos de captura por medio del sensor LiDAR.



Después, la reconstrucción del escenario se puede observar de forma completa en la Figura 8, esta reconstrucción es el punto de partida. Se busca analizar la superficie y detectar los defectos en ella, los colores Rojos sugieren deformaciones por debajo de la superficie y las zonas cercanas al color azul, sugieren deformaciones superiores a la superficie base, en un contexto de ciudades, sería el equivalente a baches y topes.

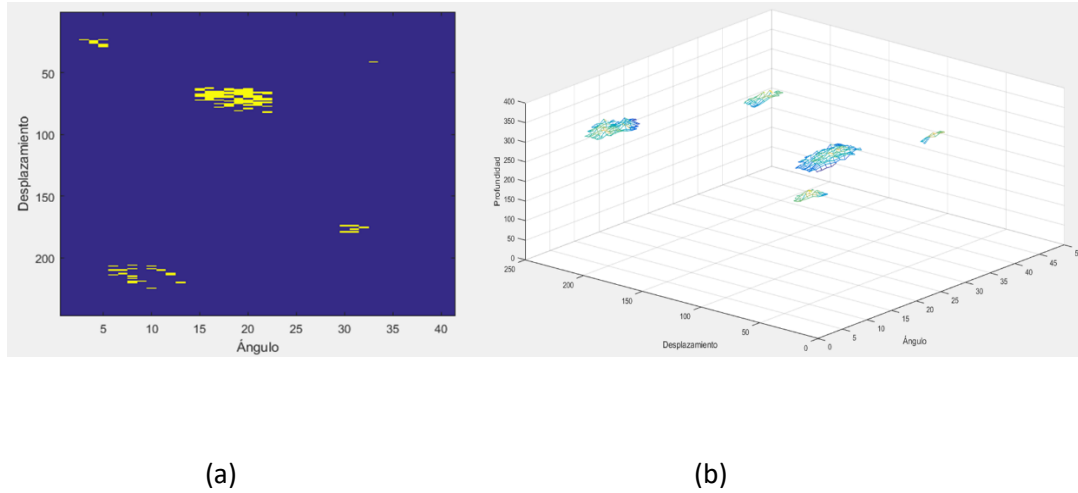
**Figura 8.** Vista superior e isométrica del escenario con datos completos.



### Filtrado Morfológico de segmentación de zonas de interés

Este filtro recorre el elemento estructurante por la parte superior de la superficie reconstruida y tiene como finalidad resaltar las anomalías en la parte inferior de la superficie. El resultado del filtro morfológico Top-Hat se muestra en la Figura 9(a).

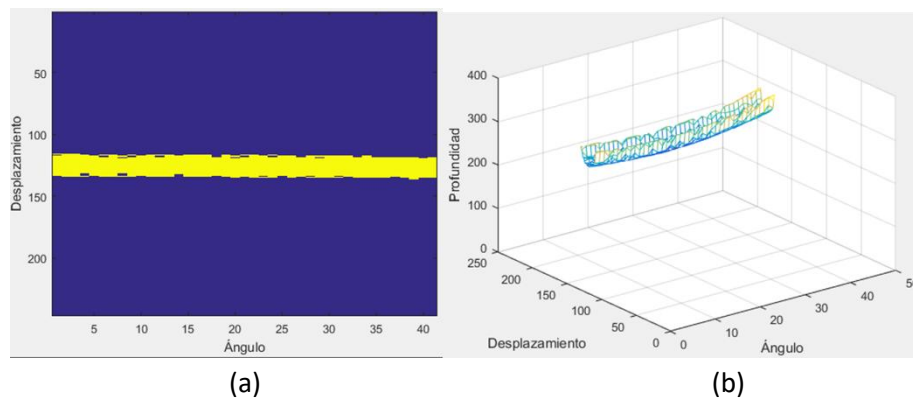
**Figura 9.** Detección de deformaciones en superficies por debajo de la superficie con LiDAR.



Mediante el histograma de distancias se determinar el corte o a partir del valor de la distancia que se puede considerar anomalía y resaltar solamente los baches en la superficie. En la Figura 9 (a) y (b) que se presentan a continuación se muestran los resultados del filtro Top-Hat, aislando los defectos de la superficie 2D y 3D.

Este filtro recorre el elemento estructurante por la parte inferior de la superficie reconstruida y tiene como finalidad resaltar los topos. El resultado del filtro morfológico Bottom-Hat se muestra en la siguiente Figura10. Al igual que en el filtro pasado el histograma que contiene los resultados del filtro Bottom-Hat, es utilizado para determinar el corte y resaltar solamente los topos en la superficie.

**Figura 10.** Estructura para la detección de relieves en superficies con LiDAR.



## Discusión

La experimentación demostró que los filtros morfológicos son una herramienta útil para el análisis de estructuras y formas, que en ocasiones no son observables a simple vista, y poder clasificarlas como defectos superficiales, sin embargo, la calidad y dimensionamiento de las formas identificadas dependen de la selección del elemento estructurante, ya que por sus características puede ser capaz de detectarlos, en este estudio, fue necesaria la implementación de dos elementos estructurantes, uno para cada filtro morfológico, para el Top Hat era necesario un elemento estructurante más pequeño para que fuera capaz de identificar los hoyos, por otro lado, para el Bottom Hat se implementó uno más grande para que se centrara en identificar el saliente y discriminar anomalías más pequeñas.

Por otro lado, en la adquisición y reconstrucción de imágenes notamos que los datos crudos tienen una deformación radial debido a la adquisición del sensor LiDAR, también que la implementación de MM siempre se realiza principalmente sobre datos estructurados en retícula en 2D, lo que implica una pérdida de resolución al migrar información tridimensional a bidimensional, por eso el principal problema que acompaña a la aplicación MM es la adaptación de una técnica ráster 2D a datos vectoriales 3D.

## Conclusión y trabajos futuros

En este trabajo de investigación, se han aplicado filtros morfológicos compuestos *Bottom Hat* y *Top Hat* para interpretar nubes de puntos obtenidas a través de sensores de distancia y transformarlas en superficies tridimensionales. Estos filtros permiten una reconstrucción 3D eficiente, facilitando la detección de irregularidades en el plano, como topes o baches en una carretera.

La morfología matemática es una teoría y técnica para el análisis y tratamiento de las estructuras geométricas que permite conocer los aspectos más relevantes de su forma. Utilizando esta herramienta de manera apropiada y definiendo el elemento estructurante adecuadamente se pueden obtener características esenciales de formas y eliminar irrelevancias, o en el caso de este trabajo, detallar los defectos en una superficie. También se puede recalcar la utilidad de las nubes de puntos como una herramienta para la reconstrucción de un entorno y que se puede enfocar esta tecnología en aplicaciones específicas.

Este trabajo permite iniciar una línea de investigación enfocada a la implementación de morfología matemática y nubes de puntos. Como trabajos futuros se pueden considerar el dimensionamiento de los defectos identificados, aplicar la metodología a otros sensores que proporcionen información de nubes de puntos y comprobar su funcionamiento a partir de estas reconstrucciones.

## Referencias

- Jan, Z., Ahamed, F., Mayer, W., Patel, N., Grossmann, G., Stumptner, M., & Kuusk, A. (2023). Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 216, 119456.
- Bécue, A., Praça, I., & Gama, J. (2021). Artificial intelligence, cyber-threats and Industry 4.0: Challenges and opportunities. *Artificial Intelligence Review*, 54(5), 3849-3886.
- Lom, M., Pribyl, O., & Svitek, M. (2016, May). Industry 4.0 as a part of smart cities. In *2016 Smart Cities Symposium Prague (SCSP)* (pp. 1-6). IEEE.

- Wolniak, R., Gajdzik, B., & Grebski, W. (2023). THE IMPLEMENTATION OF INDUSTRY 4.0 CONCEPT IN SMART CITY. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management/Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie*, (178).
- Li, Z., He, Y., Lu, X., Zhao, H., Zhou, Z., & Cao, Y. (2021). Construction of Smart City Street Landscape Big Data-Driven Intelligent System Based on Industry 4.0. *Computational intelligence and neuroscience*, 2021(1), 1716396.
- Khan, M. U., Zaidi, S. A. A., Ishtiaq, A., Bukhari, S. U. R., Samer, S., & Farman, A. (2021, July). A comparative survey of lidar-slam and lidar based sensor technologies. In *2021 Mohammad Ali Jinnah University International Conference on Computing (MAJICC)* (pp. 1-8). IEEE.
- Latouche, H., Solarte, K., Ordonez, J., & Sanchez, L. (2017). Nonlinear filters to denoising color images. *Ing. UC*, 24(2), 185-195.
- Chang, C. C., Hsiao, J. Y., & Hsieh, C. P. (2008, December). An adaptive median filter for image denoising. In *2008 Second international symposium on intelligent information technology application* (Vol. 2, pp. 346- 350). IEEE.
- Griffin, L. D. (2000). Mean, median and mode filtering of images. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, physical and engineering sciences*, 456(2004), 2995-3004.
- Wang, M., Zheng, S., Li, X., & Qin, X. (2014, April). A new image denoising method based on Gaussian filter. In *2014 International Conference on information science, electronics and electrical engineering* (Vol. 1, pp. 163-167). IEEE.
- Soille, P. (1999). *Morphological image analysis: principles and applications* (Vol. 2, No. 3, pp. 170-171). Berlin: Springer.
- Balado, J., Van Oosterom, P., Díaz-Vilariño, L., & Meijers, M. (2020). Mathematical morphology directly applied to point cloud data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168, 208-220.
- Serra, J., & Vincent, L. (1992). An overview of morphological filtering. *Circuits, Systems and Signal Processing*, 11, 47-108.
- Gil, J. Y., & Kimmel, R. (2002). Efficient dilation, erosion, opening, and closing algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(12), 1606-1617.