

RANCA GUA, 05-03-2024

PRESENTACIÓN DE TRABAJO DE TÍTULO:

**IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE HERRAMIENTA  
DE MAPEO DE ENTORNOS FRUTÍCOLAS  
MEDIANTE SENSOR LIDAR Y CÁMARA ESTÉREO  
MONTADOS EN PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
WARTHOG**

Ignacio Andrés Vásquez Vásquez

Profesor guía: Rodrigo Verschae

Profesor co-guía: Robert Guamán

Comisión evaluadora: Luis Cossio, Alfonso Ehijo, Christopher Flores

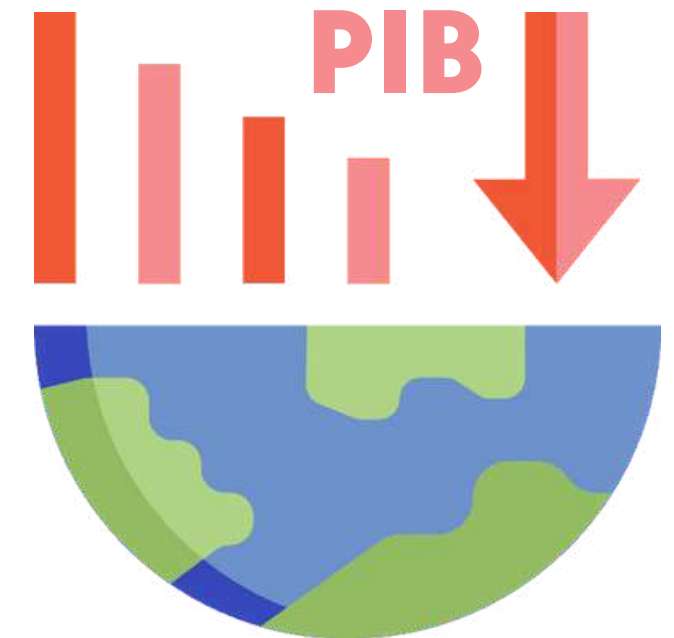


- 01 INTRODUCCIÓN**
- 02 ESTADO DEL ARTE**
- 03 MATERIALES Y MÉTODOS**
- 04 RESULTADOS**
- 05 CONCLUSIÓN**
- 06 REFERENCIAS**

# INTRODUCCIÓN

UOH

- **Importancia de la agricultura:**
  - Vital para alimentación y empleo.
- **Presiones sobre recursos:**
  - Crecimiento poblacional y cambio climático generan presión en tierra y agua.
- **Actividad agropecuario-silvícola:**
  - El PIB presentó una caída del 0.6%, determinado principalmente por la actividad agropecuario-silvícola (-4.1%) (Banco Central de Chile, s. f.).
- **Agricultura de precisión (AP):**
  - Maximiza rendimiento y optimiza recursos con tecnologías avanzadas.
- **Plataforma robótica Warthog.**



# OBJETIVO GENERAL

Generar un mapa del entorno frutícola mediante la recopilación de datos provenientes de sensor LiDAR<sup>1</sup> y cámara estéreo integrados en una plataforma robótica móvil, en el contexto de la agricultura de precisión.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 Realizar una revisión de literatura sobre plataformas robóticas móviles, el uso de sensores en robótica y el mapeo de entornos con robots.
- 2 Realizar la configuración del equipo experimental mediante el uso de algoritmos y técnicas de calibración.
- 3 Implementar un algoritmo de mapeo del entorno frutícola mediante la información recopilada a través del equipo experimental y uso de herramientas de mapeo.
- 4 Evaluar el algoritmo de mapeo utilizando un software de simulación y en campo, mediante un análisis cualitativo y cuantitativo.
- 5 Habilitar una herramienta de visualización de los datos mapeados.

<sup>1</sup> LiDAR: *Light Detection and Ranging*



# ESTADO DEL ARTE - APLICACIONES Y USOS DE PLATAFORMAS ROBÓTICAS MÓVILES

- MINERÍA Y RESCATE
- MANTENIMIENTO FERROVIARIO
- AGRICULTURA DE PRECISIÓN
  - Utilización de UGV robóticos en tareas agrícolas diversas (**Botta et al., 2022**).
  - Aplicación en monitoreo y sensado remoto en agricultura.
  - Ejemplos notables como Husky, BoniRob, Robotanist y Thorvald (**Gil et al., 2023**).
  - Contribución a la optimización en la agricultura de precisión.



# ESTADO DEL ARTE - SENSORES Y SU IMPORTANCIA EN LA ROBÓTICA

| Sensor             | Aplicación  | Referencia   |
|--------------------|---|--|
| Cámara             | Medición de la altura de los cultivos y creación mapas tridimensionales.                                  | (Kim et al., 2021)<br>(Rovira-Más et al., 2008)    |
| LiDAR <sup>1</sup> | Detección de estructuras, digitalización árboles y plantas, y toma decisiones.                            | (Rivera et al., 2023)                              |
| GPS <sup>2</sup>   | Determinación de posición y altitud, permitiendo la navegación en tiempo real.                            | (Vieira et al., 2022)<br>(Rovira-Más et al., 2008) |
| IMU <sup>3</sup>   | Se combina con GPS para determinar la posición y altitud en vehículos autónomos, mejorando la navegación. | (Vieira et al., 2022)<br>(Rovira-Más et al., 2008) |

Fuente: elaboración propia



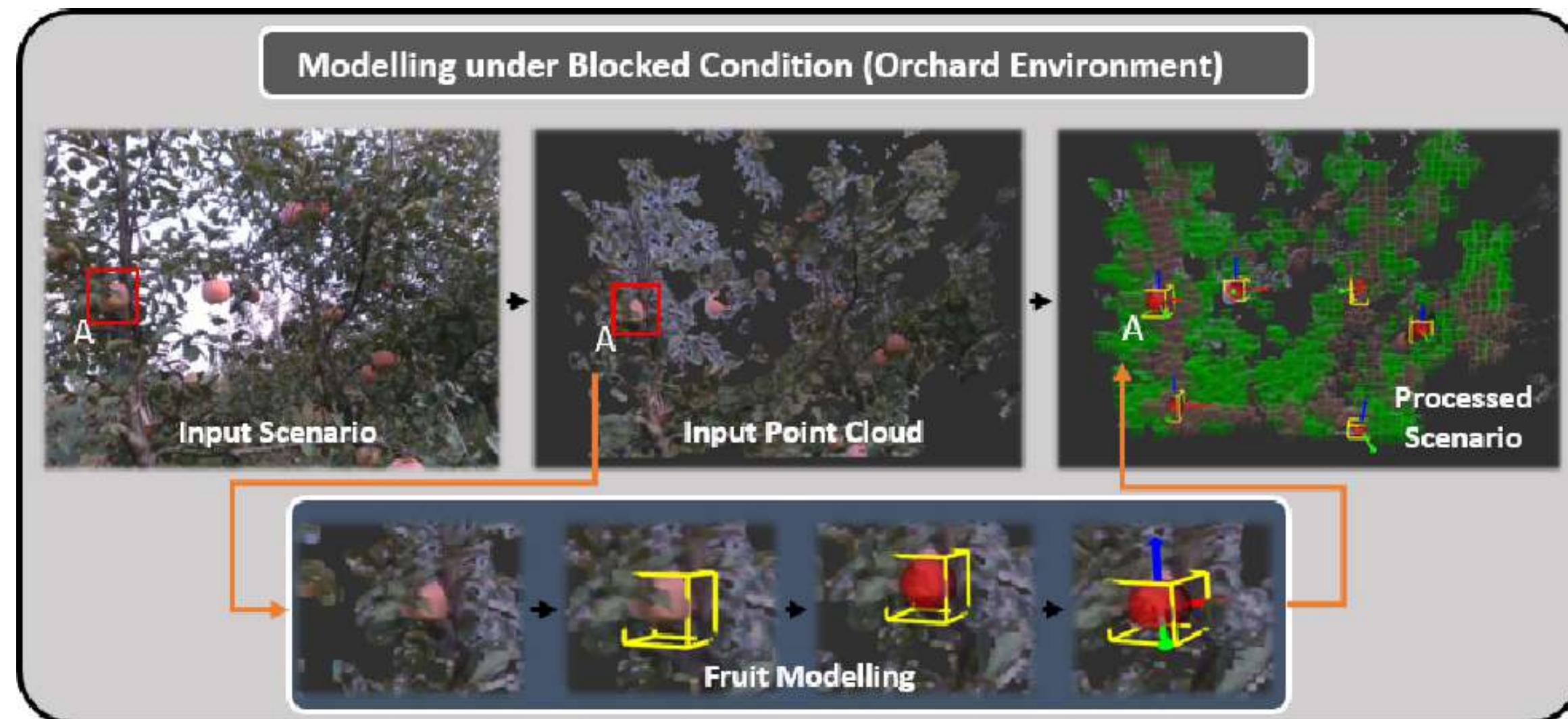
<sup>1</sup> LiDAR: Light Detection and Ranging  
<sup>2</sup> GPS: Global Position System  
<sup>3</sup> IMU: Inertial Measurement Unit



# ESTADO DEL ARTE - MAPEO DEL ENTORNO

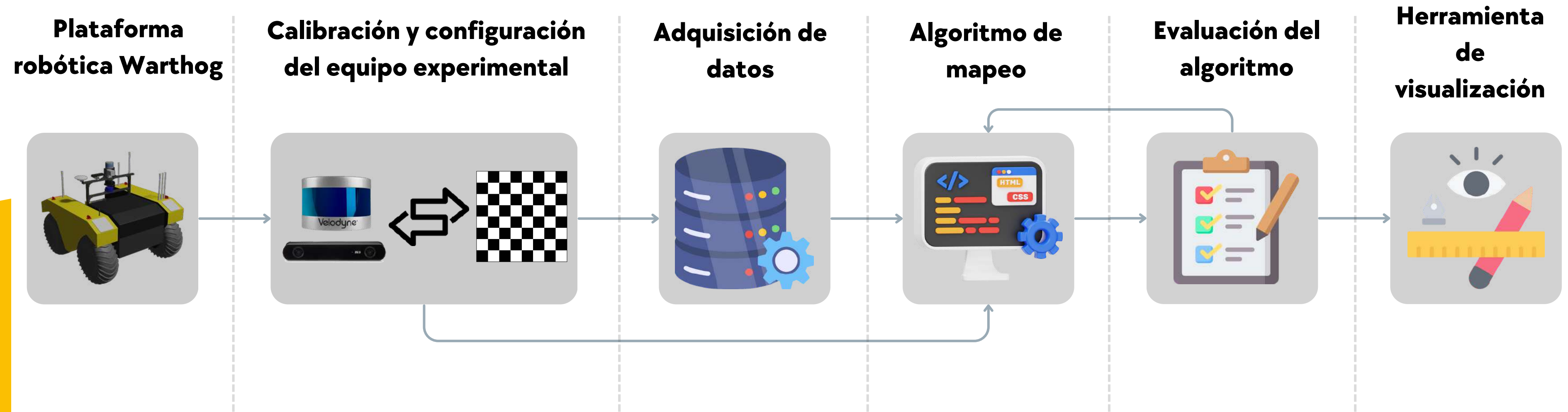


Recolección de frutas con robots, utilizando aprendizaje profundo y "OctoMap" para la percepción visual y modelado de frutas en huertos no estructurados (**Kang y Chen, 2019**).



Fuente: Kang y Chen, 2019.

# METODOLOGÍA

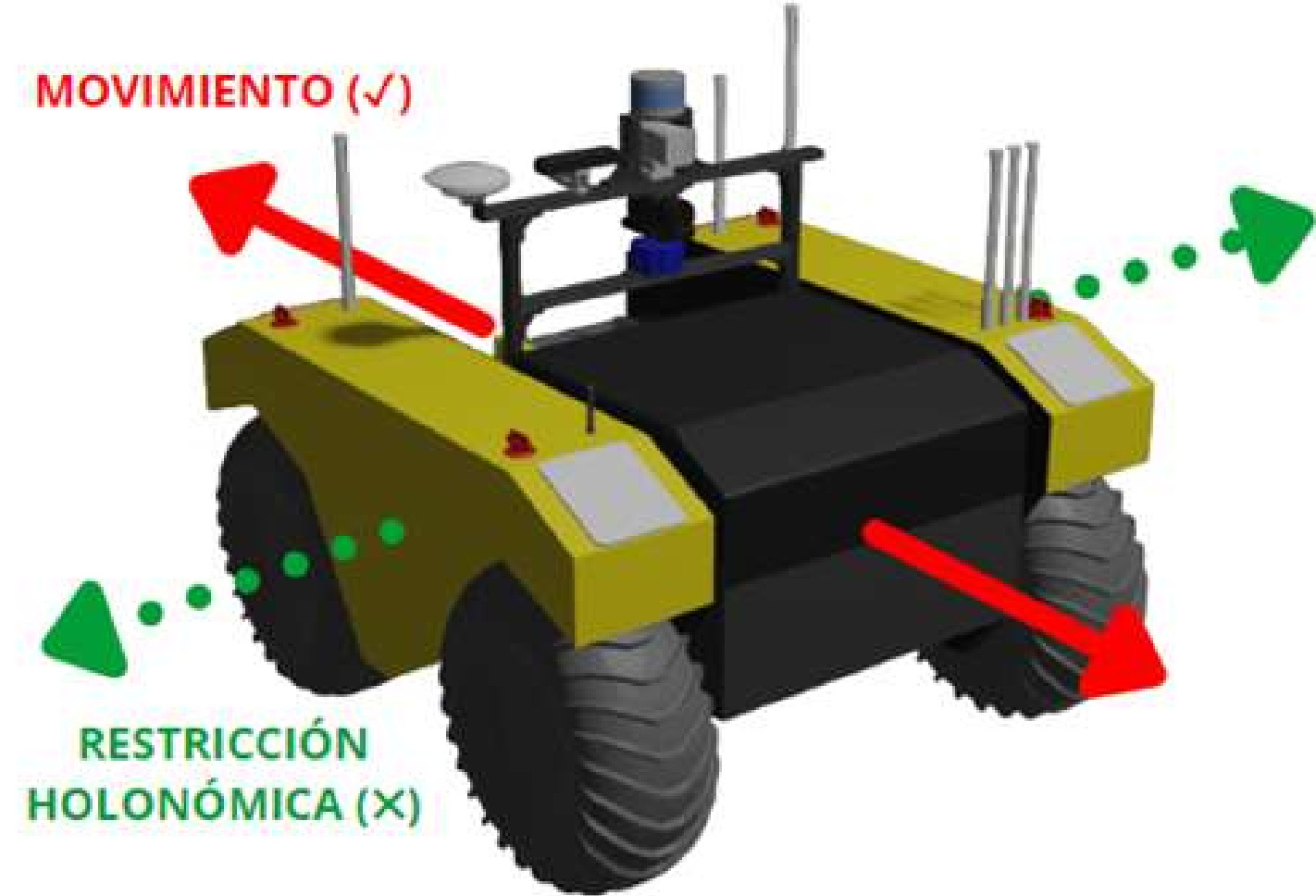


*Fuente: elaboración propia*



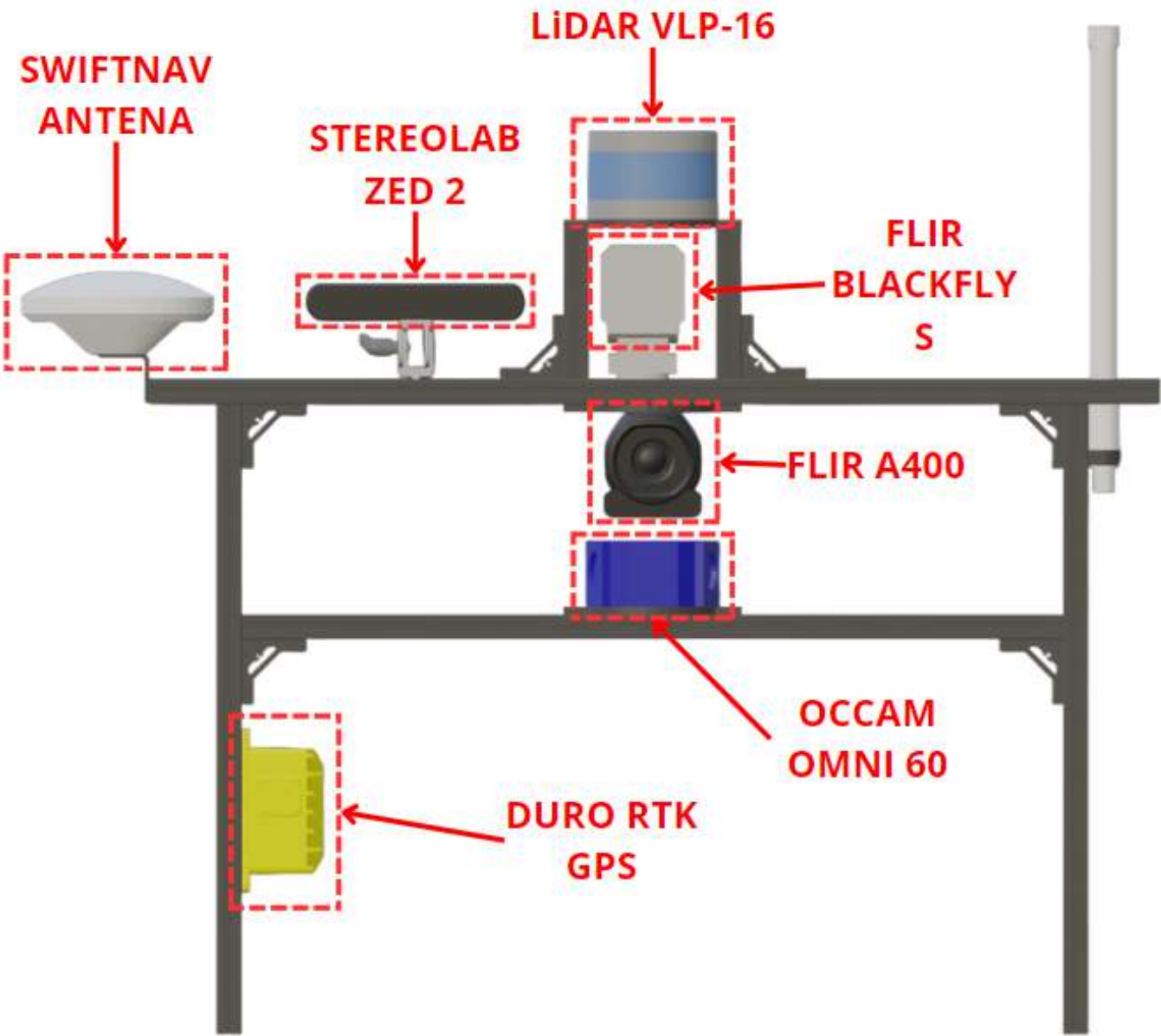
# PLATAFORMA ROBÓTICA WARTHOG

- Vehículo terrestre no tripulado (UGV).
- Comercializado por la empresa Clearpath Robotics.
- Plataforma no holonómica.
- Tracción en las cuatro ruedas y capacidad anfibia.



| Características      | Especificaciones     |
|----------------------|----------------------|
| Dimensiones          | 1.52 x 1.38 x 0.83 m |
| Peso                 | 280 kg               |
| Peso máximo de carga | 272 kg               |
| Velocidad máxima     | 18 km/h              |
| Autonomía            | 3 horas              |

# SENSORES INTEGRADOS



Fuente: elaboración propia

| Sensor                                      | Resolución  | FOV        | FPS  | Hz |
|---|-------------|------------|------|----|
| LiDAR <sup>1</sup> - Velodyne Puck (VLP-16) | 2.0°        | 360° x 30° | -    | 10 |
| Cámara estéreo - Stereolab ZED 2            | 1920 x 1080 | 110° x 70° | 30   | -  |
| Cámara - FLIR Blackfly S                    | 3072 x 2048 | -          | 59.6 | -  |
| Cámara Termográfica - FLIR A400             | 640 x 480   | 42°        | 30   | -  |
| IMU <sup>2</sup> UM7                        | 0.01°       | -          | -    | 20 |
| GPS <sup>3</sup> - SwiftNav Duro RTK        | 1 cm        | -          | -    | 10 |

Fuente: elaboración propia

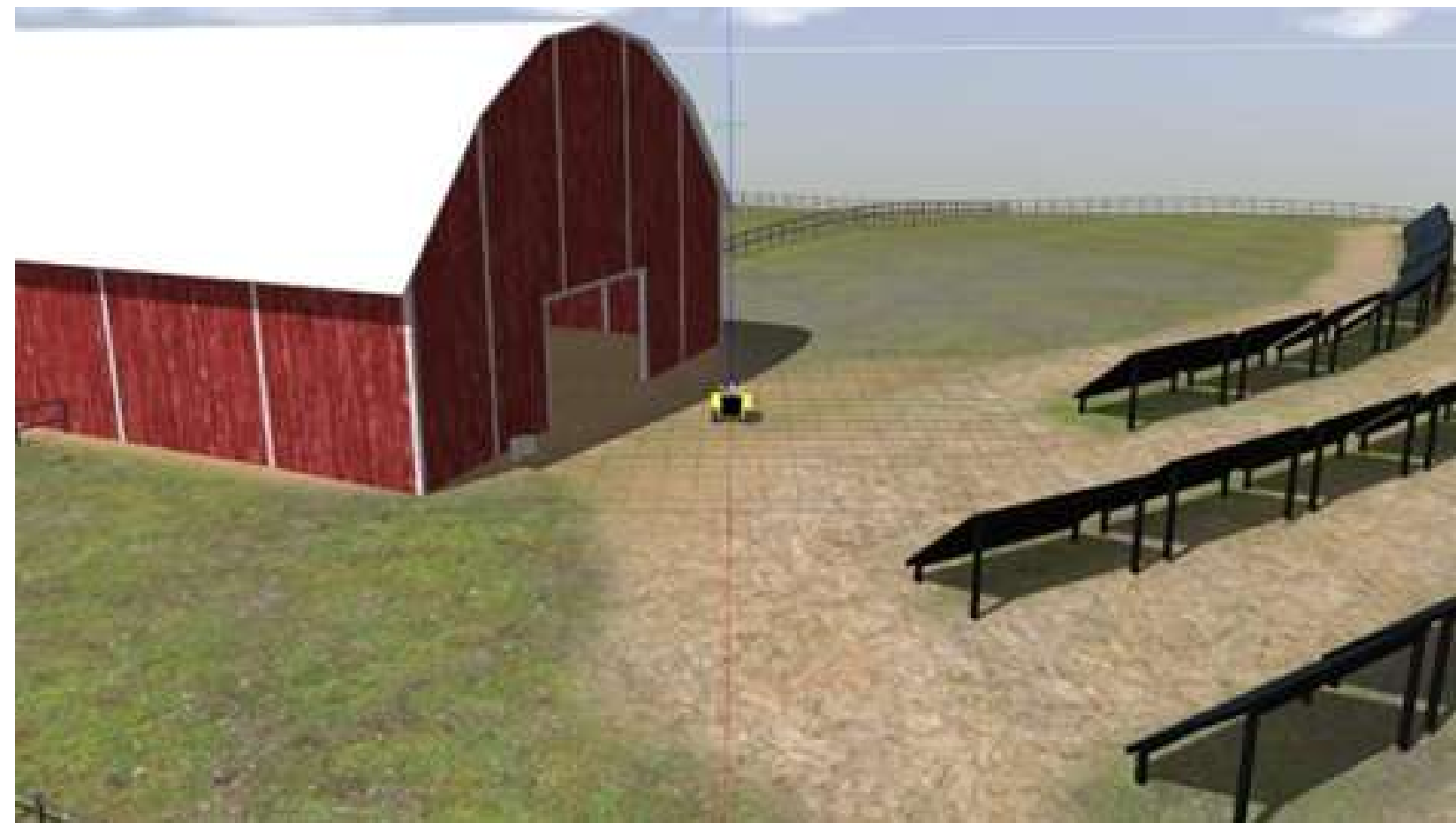
<sup>1</sup> LiDAR: Light Detection and Ranging  
<sup>2</sup> GPS: Global Position System  
<sup>3</sup> IMU: Inertial Measurement Unit

## SOFTWARE Y HARDWARE

- Equipado con dos computadoras con sistema operativo Ubuntu 20.04 y ROS.
- ROS (*Robot Operating System*).
- Software de simulación: Gazebo.



GAZEBO





# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## ODOMETRÍA

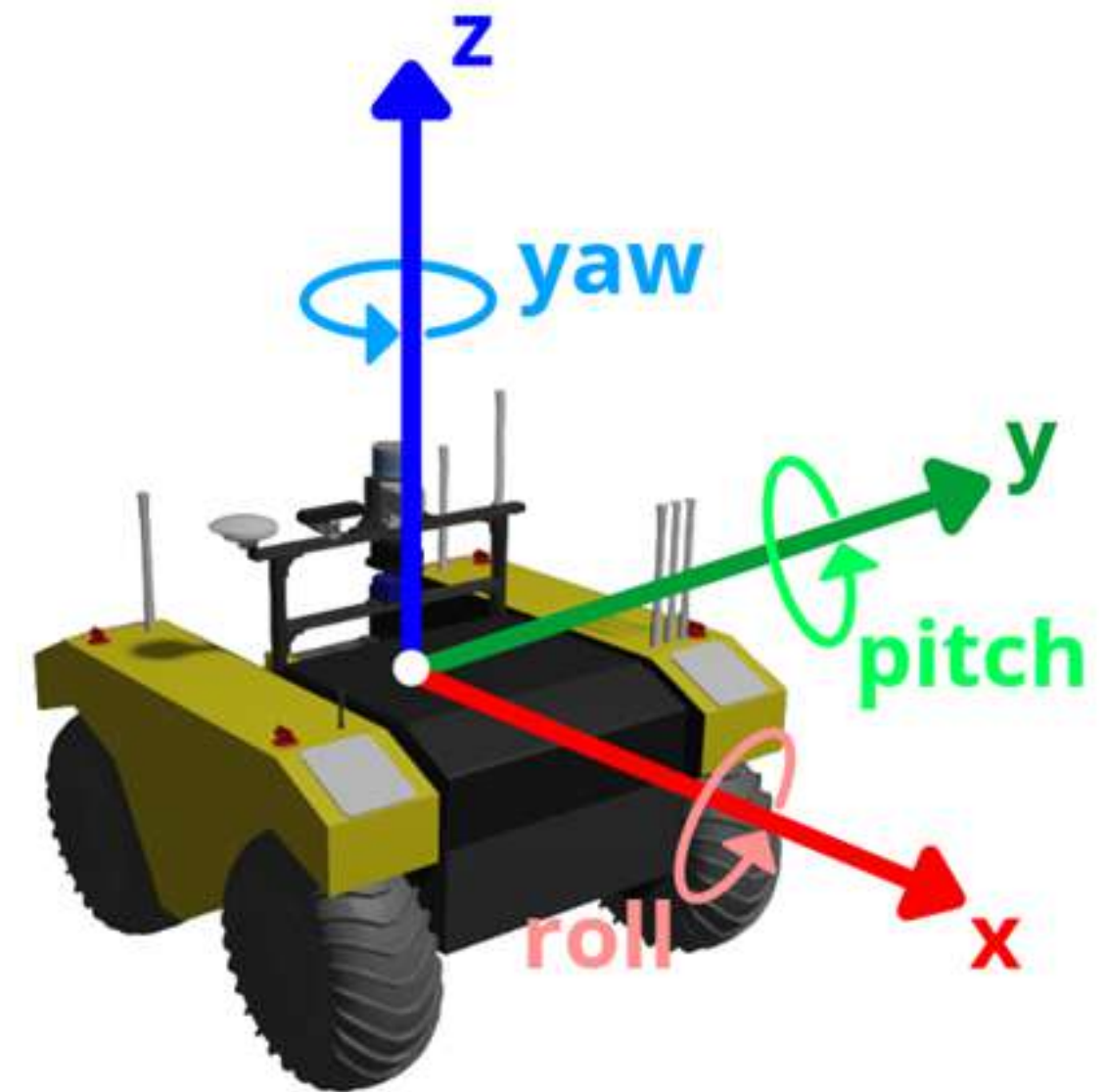
- Técnica utilizada para estimar la posición y orientación del robot con respecto a la posición inicial.
- Paquete de ROS *robot\_localization*.
- La configuración de odometría en ROS se realizan en un archivo YAML.

$$M = \begin{bmatrix} x & y & z \\ roll & pitch & yaw \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ \ddot{x} & \ddot{y} & \ddot{z} \end{bmatrix}$$

- Odometría utilizando datos del GPS. Proporciona información sobre la posición, velocidad y dirección del desplazamiento.

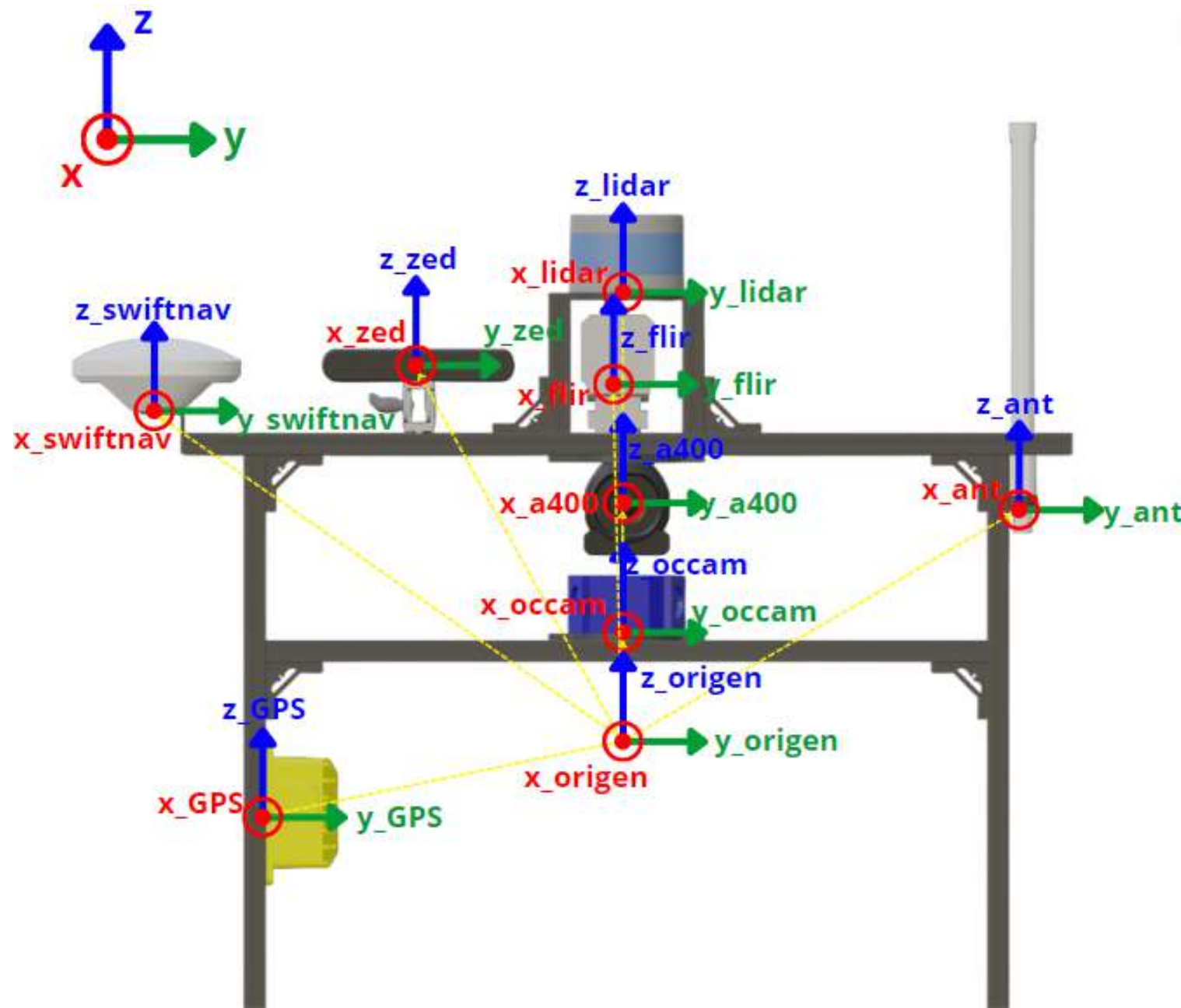
$$1^\circ \text{ latitud} = 111321 \text{ [m]}$$

$$1^\circ \text{ longitud} = \frac{40075000 * \cos(\text{latitud}[^{\circ}])}{360} \text{ [m]}$$

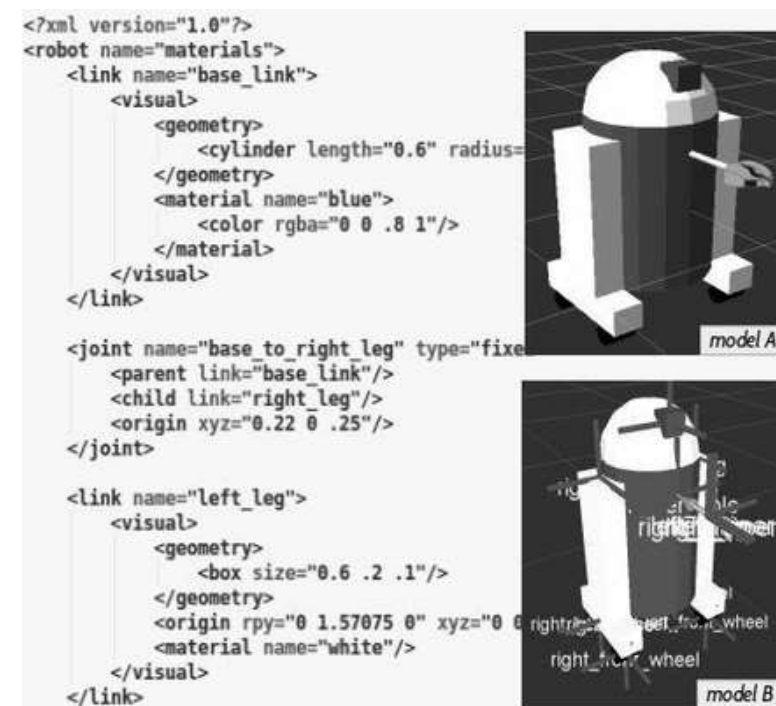


Fuente: elaboración propia

## CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN CONFIGURACIÓN "MANUAL"



- URDF (*Unified Robot Description Format*) es un archivo XML que permite describir al robot, incluyendo información sobre la geometría, cinemática y sensores del robot.
- Paquete de ROS *tf* (*Transform Frames*).



# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CALIBRACIÓN DE CÁMARA

- La calibración de la cámara consiste en corregir la distorsión y errores presentes en la imagen (distorsión radial o tangencial)
- Paquete de ROS camera\_calibration .
- Tablero de ajedrez de tamaño A2, disposición de 8x6 intersecciones entre las cuadrículas. Cada cuadrícula del tablero mide 0.058 metros.
- Parámetros de calibración:

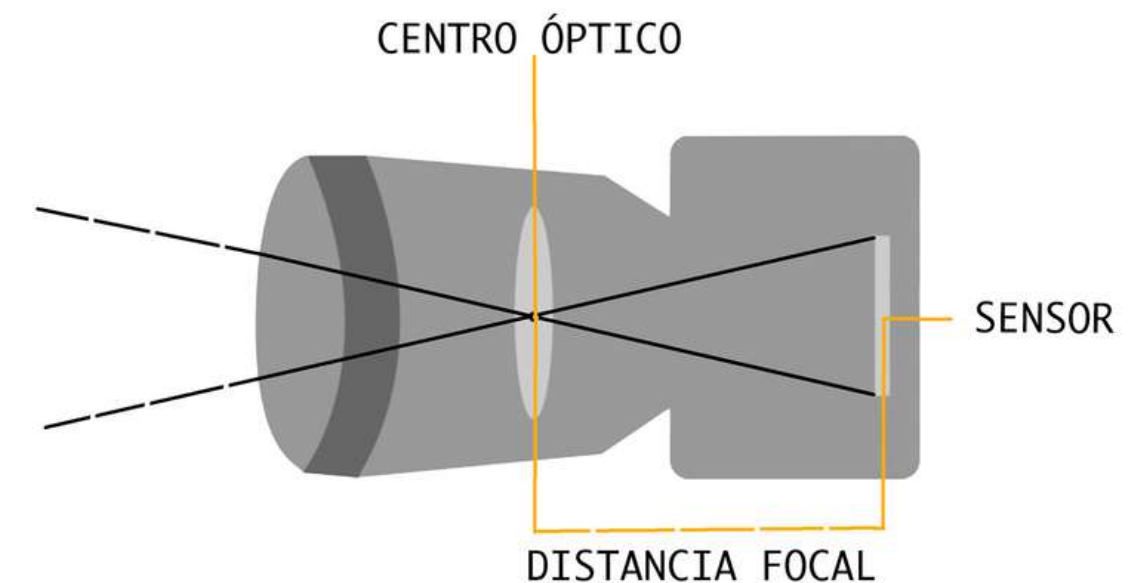
**D** Coeficientes de distorsión.

**R** Matriz de rectificación.

**K** Matriz de cámara

**P** Matriz de proyección.

$$K = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} fx' & 0 & cx' & Tx \\ 0 & fy' & cy' & Ty \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



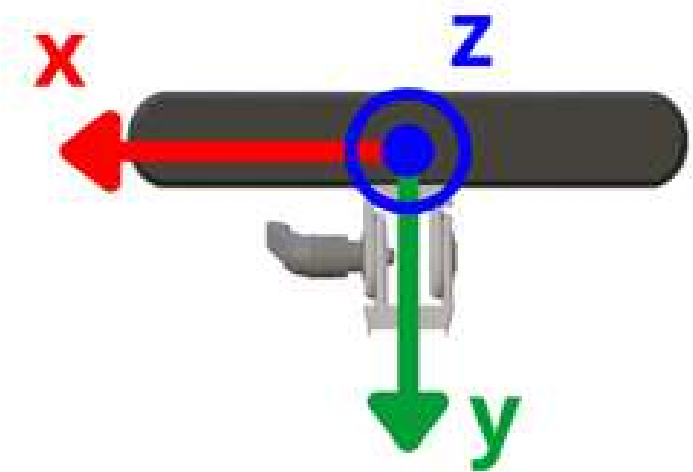
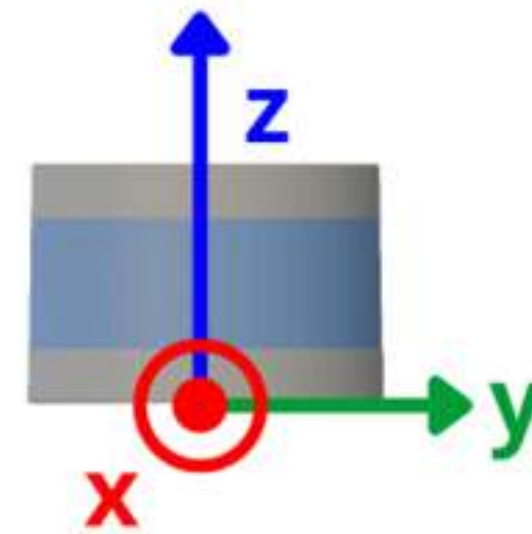


# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CALIBRACIÓN DE CÁMARA Y SENSOR LIDAR

- La calibración cámara-LiDAR consiste en ajustar los parámetros extrínsecos entre ambos sensores.
- Trabajo propuesto **`extend_lidar_camera_calib`** permite realizar esta calibración.
  - **FLOAM**: permite obtener una nube de puntos densa (archivo PCD).
  - **livox\_camera\_calib**: realiza la calibración extrínseca entre sensores.
    - RANSAC.
    - Canny.
- La traslación y rotación relativa entre la cámara y el LiDAR esta dada por la matriz E.

- Sistemas de referencias para cada sensor empleado por el algoritmo:



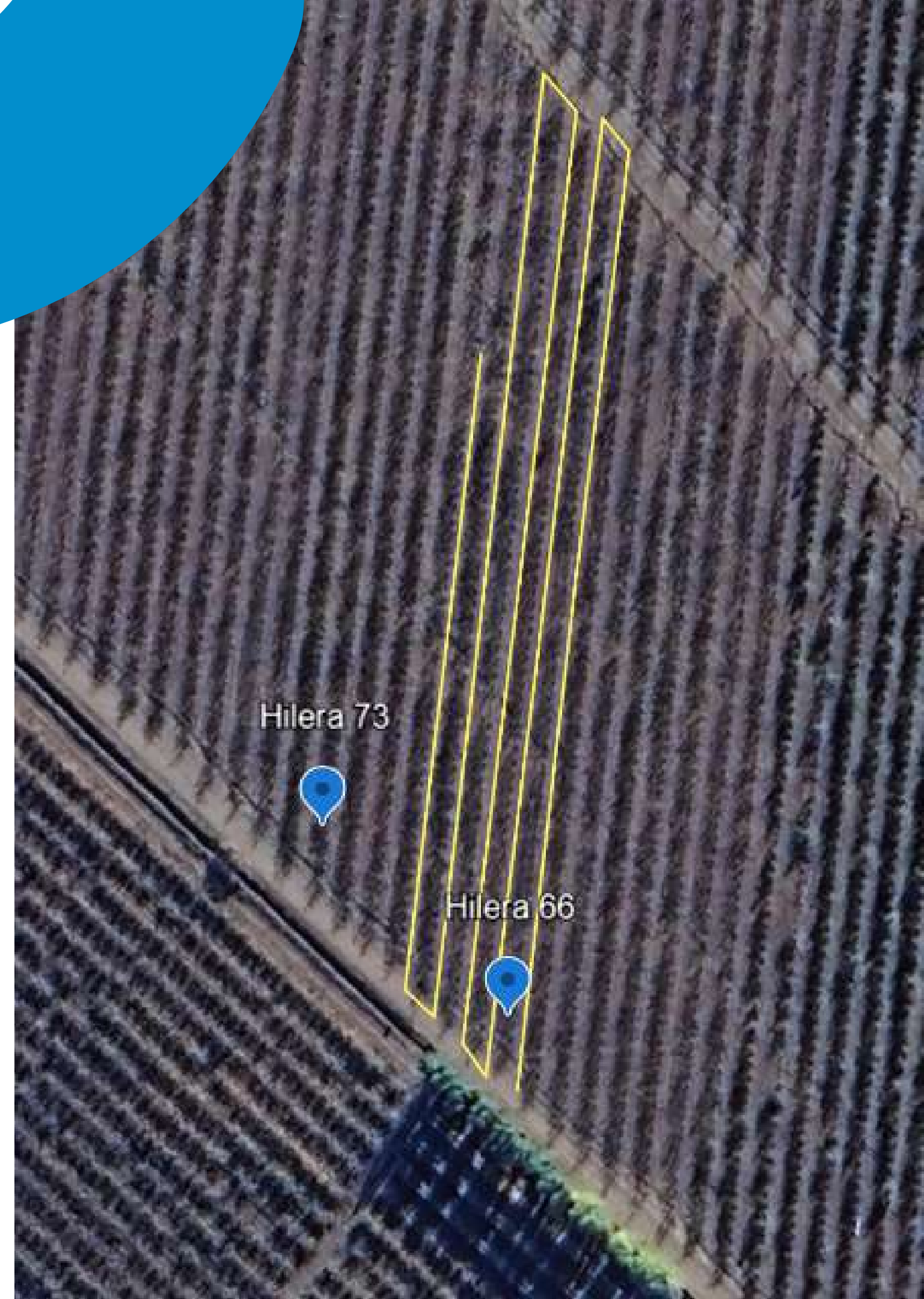
*Fuente: elaboración propia*

$$E = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & t_x \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & t_y \\ r_{21} & r_{21} & r_{22} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \longrightarrow E = \begin{bmatrix} 0.0 & -1.0 & 0.0 & t_x \\ 0.0 & 0.0 & -1.0 & t_y \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotación realizada: (90, -90, 0)

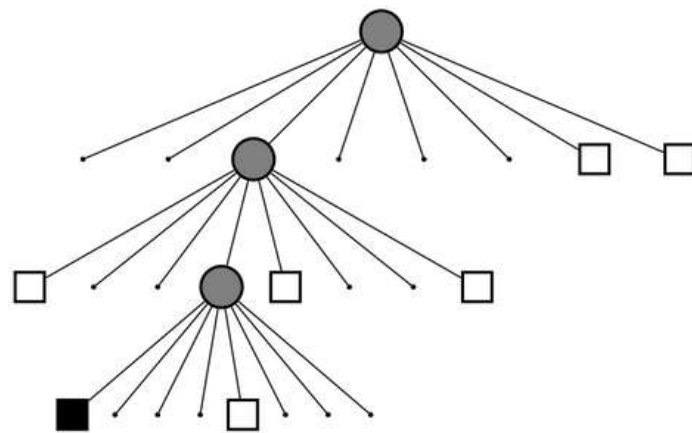
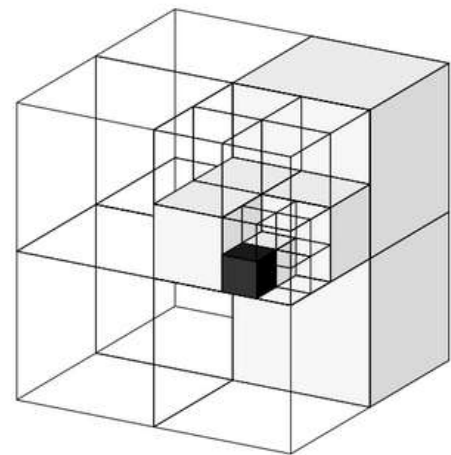
## ADQUISICIÓN DE DATOS

- Paquete de ROS *roslab*.
- Los archivos de registro resultantes se guardan en formato ".bag".
- Monitoreo de almacenamiento con interfaz en tiempo real.
- Información utilizada en el trabajo de título:
  - Ubicación: Fundo La Torre en Rengo, Chile
  - Descripción: El recorrido se centró en las hileras 66 a 73, que albergan árboles de cerezo y tienen una longitud de aproximadamente 140 metros.
  - Dos salidas a terreno: 13-09-23 / 24-11-23.

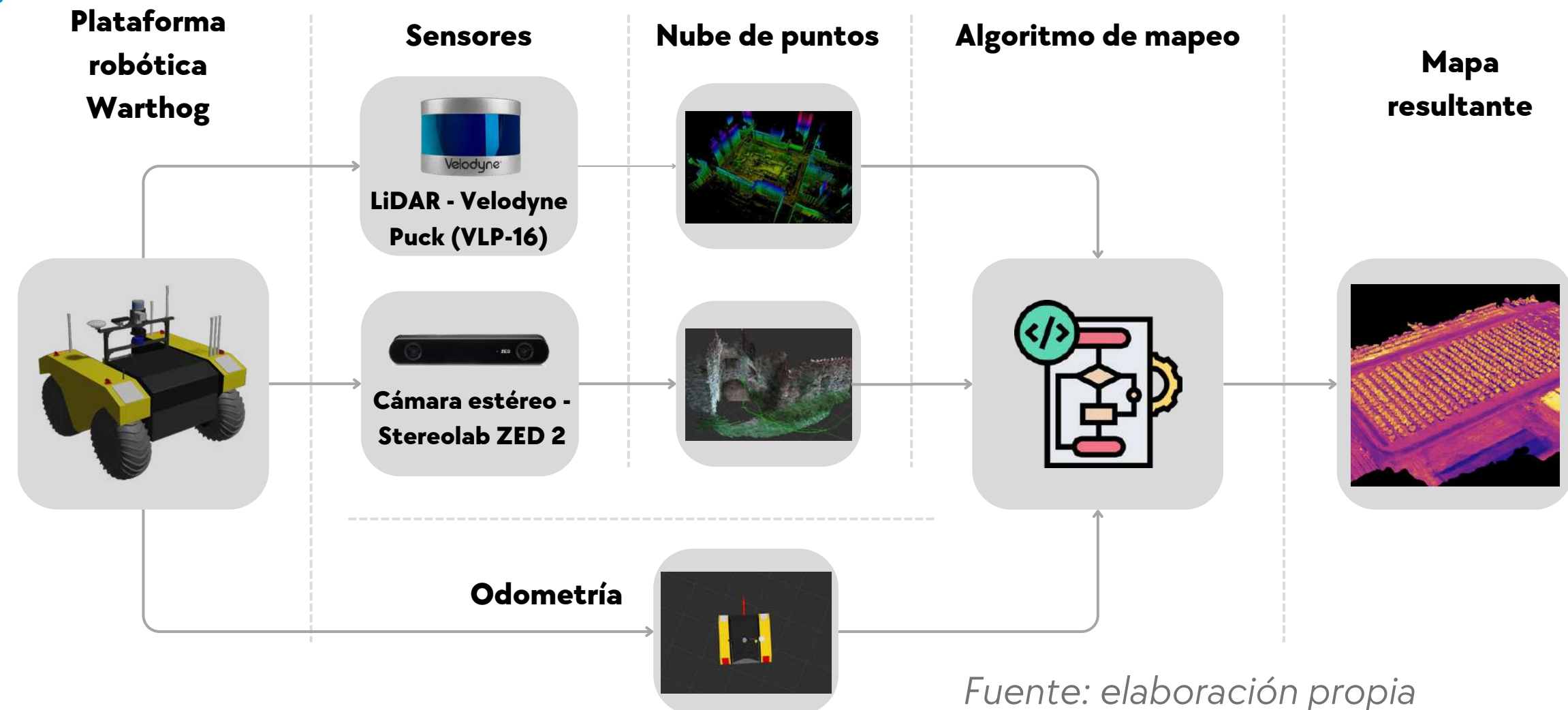


# ALGORITMO DE MAPEO "OCTOMAP"

- Herramienta de mapeo 3D que utiliza una representación octree (árbol octal) para dividir el espacio 3D en pequeños bloques.
- Un **octree** es una estructura de datos jerárquica que divide el espacio en ocho regiones. Cada región puede ser dividida a su vez en ocho regiones, y así sucesivamente.
- Cada octante puede contener información detallada sobre la ocupación del espacio, indicando si una región está ocupada por un objeto o vacía. La información de ocupación se almacena en cada celda del octree, siendo binaria (ocupada o no) o un valor real que representa la probabilidad de ocupación.



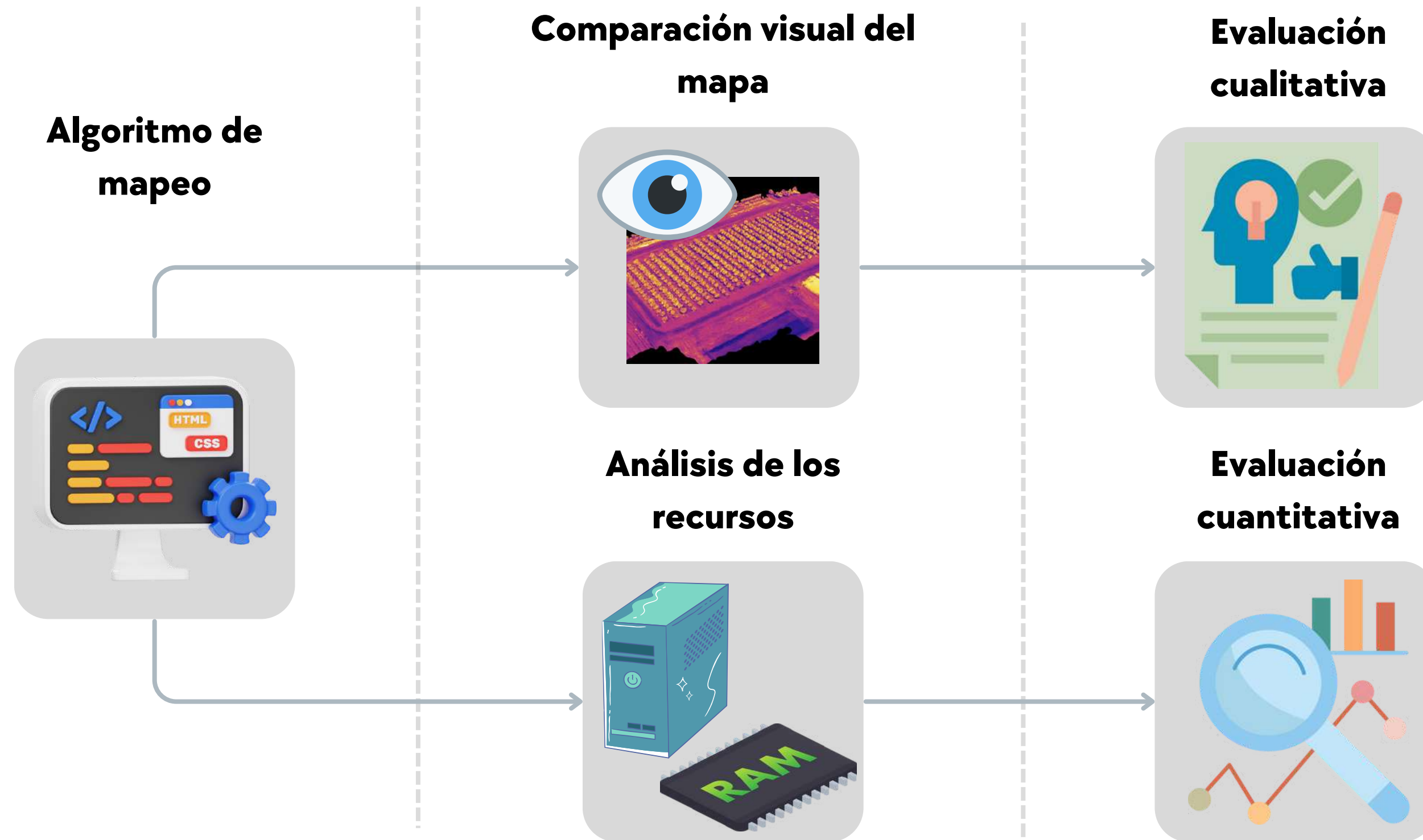
Fuente: (Hornung et al., 2013)



Fuente: elaboración propia



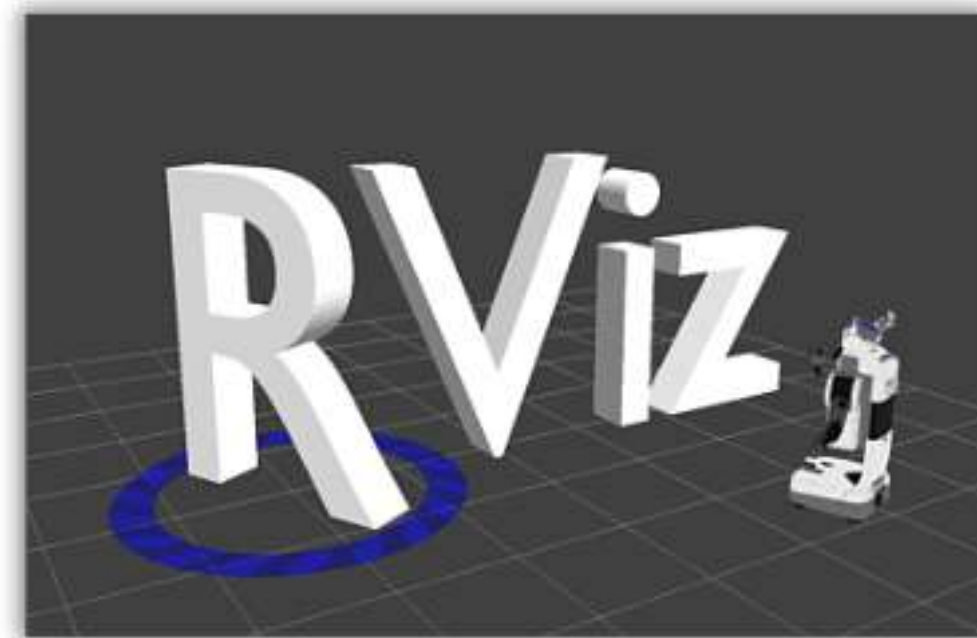
# EVALUACIÓN DEL ALGORITMO DE MAPEO



*Fuente: elaboración propia*

## HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN

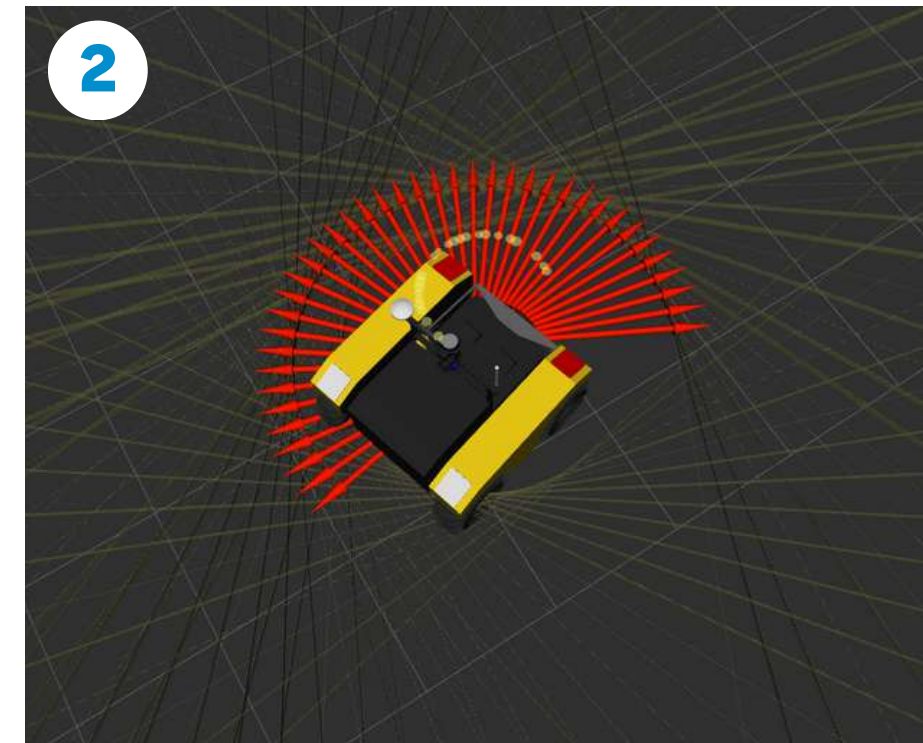
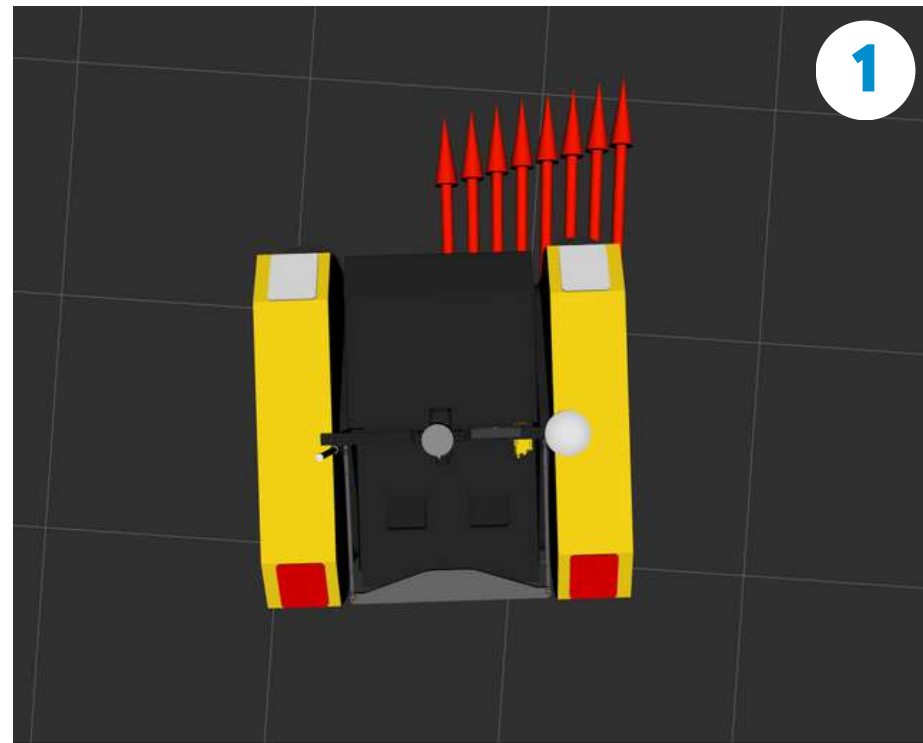
- Herramienta 3D para visualizar robots, nubes de puntos y mapas, facilitando la exploración interactiva de entornos mapeados.
- Configuración de RVIZ según necesidades específicas.
- Código de Python como interfaz entre usuario y RVIZ.
- Archivo .launch automatiza la apertura de RVIZ con configuraciones predefinidas y ejecuta el código Python para la selección.



## RESULTADOS



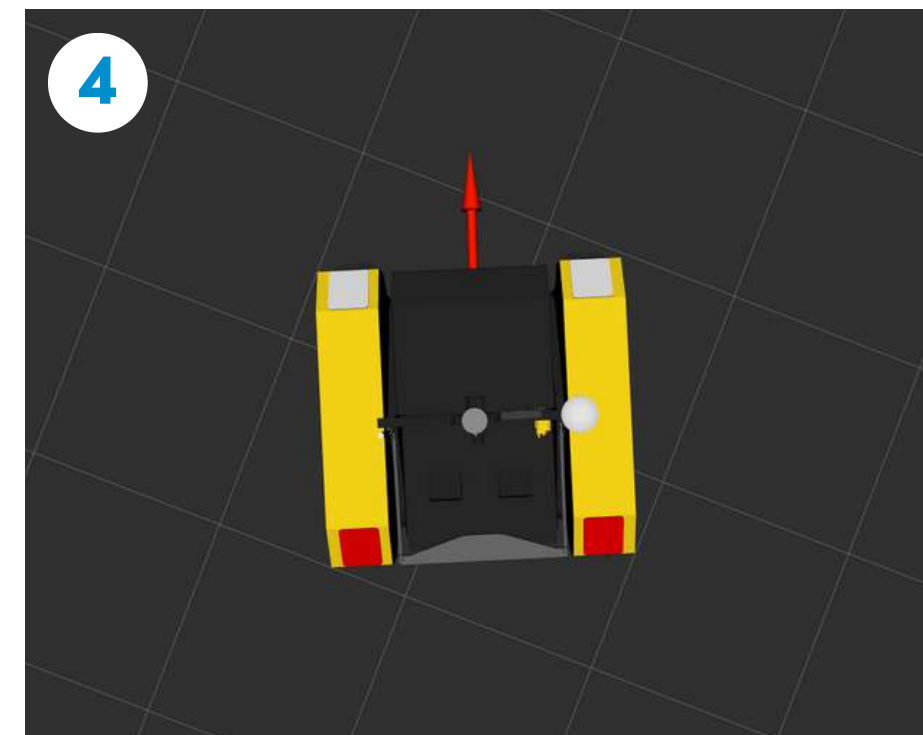
# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN ODOMETRÍA



```
localization.yaml

ekf_localization:
  imu0: um7/imu/data
  imu0_config: [false, false, false,
                false, false, true,
                false, false, false,
                false, false, true,
                true, false, false]
  imu0_remove_gravitational_acceleration: true

odom0: warthog_velocity_controller/odom
odom0_config: [false, false, false,
               false, false, false,
               true, true, false,
               false, false, true,
               false, false, false]
```

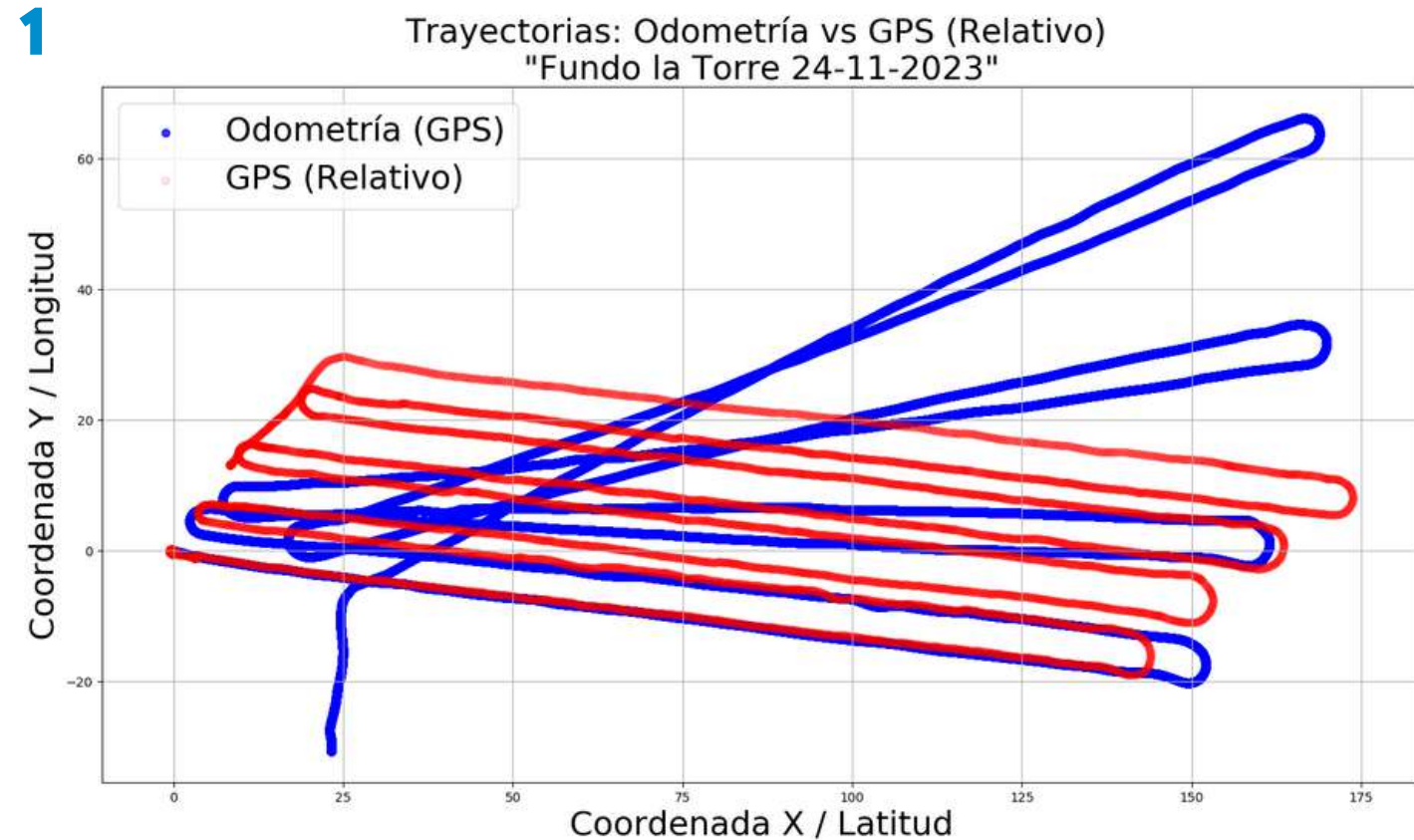


*Fuente: elaboración propia*

# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## ODOMETRÍA

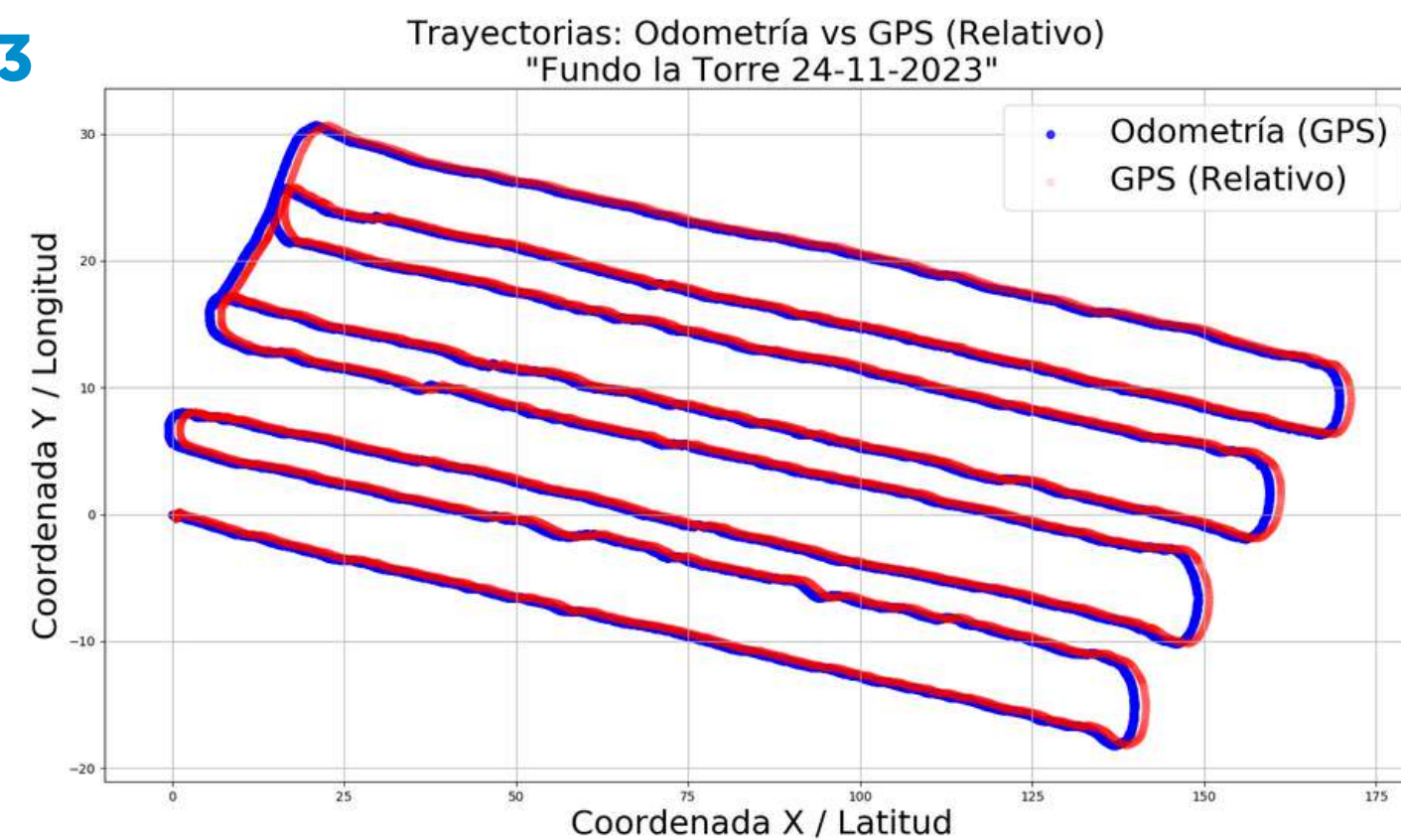
1



2



3



*Fuente: elaboración propia*



# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

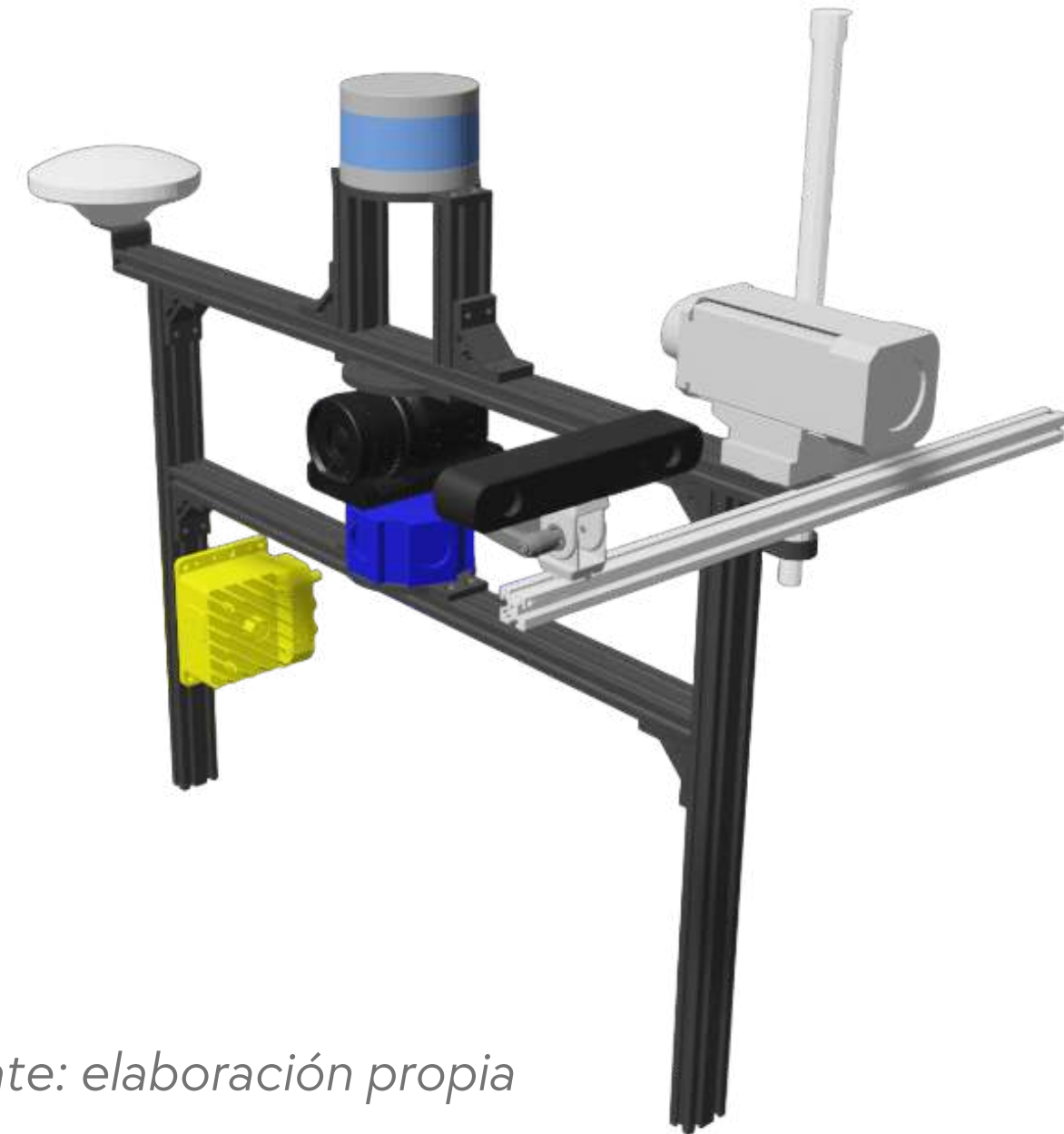
## CONFIGURACIÓN "MANUAL"

### 1 Configuración inicial de sensores



*Fuente: elaboración propia*

### 2 Configuración de sensores modificada

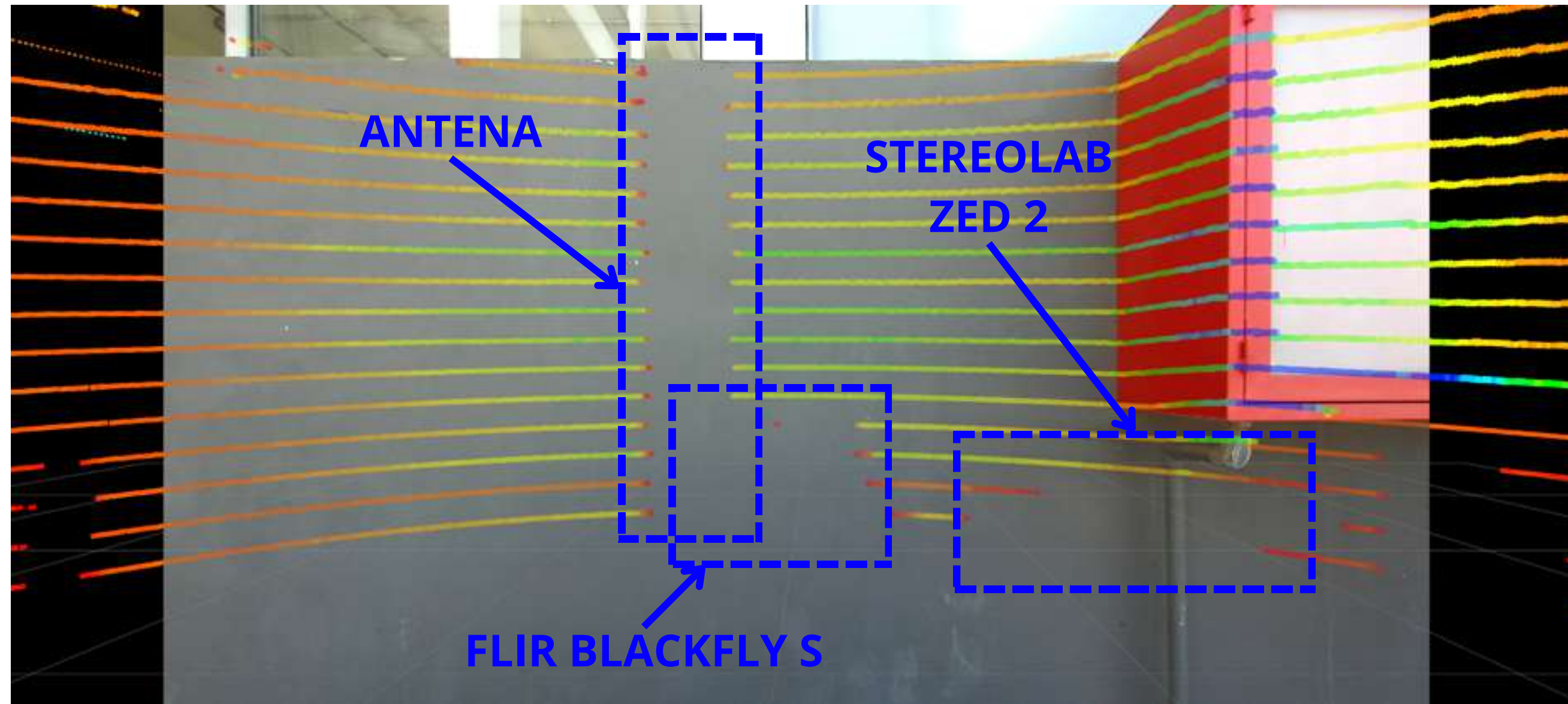


*Fuente: elaboración propia*



# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN CONFIGURACIÓN "MANUAL"

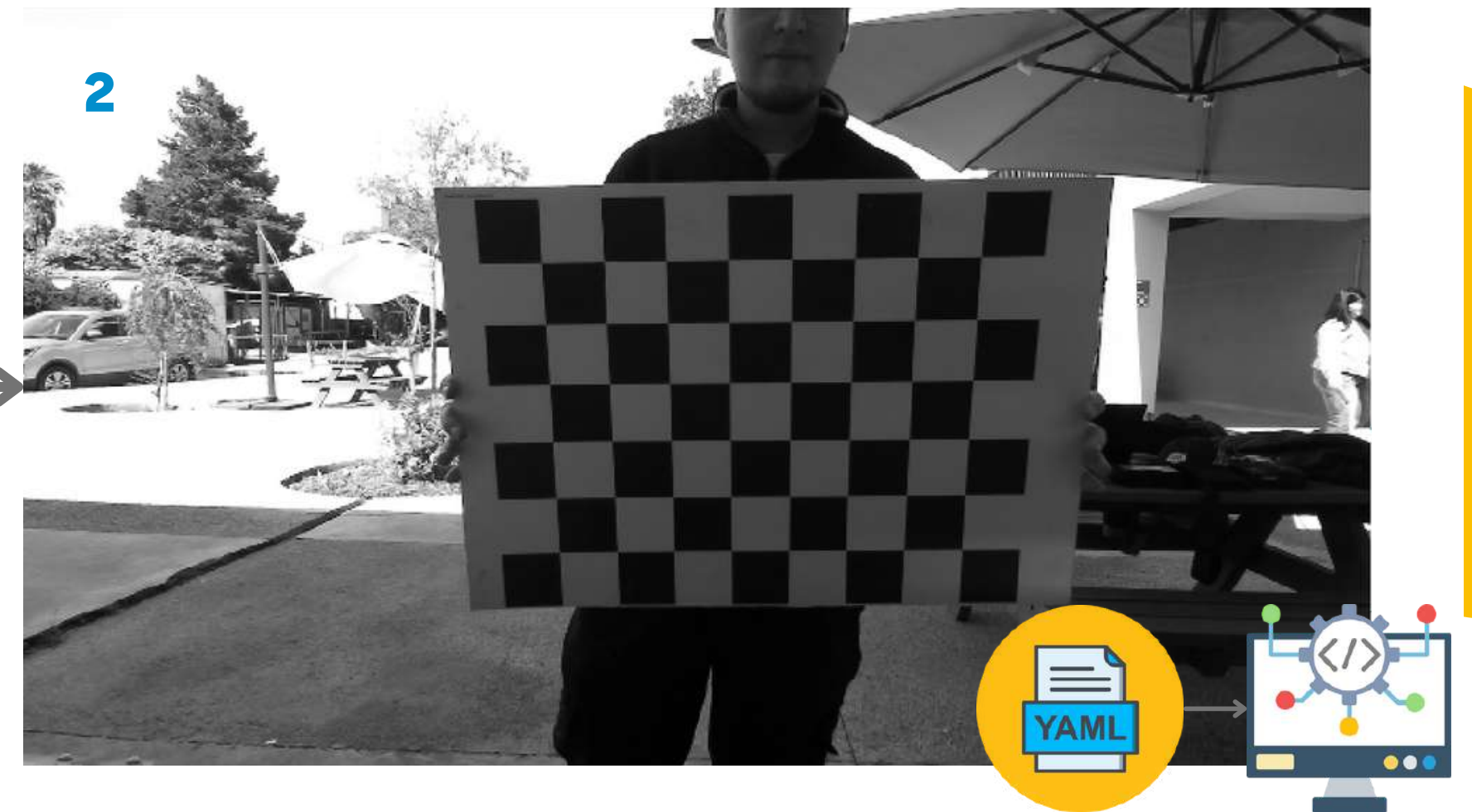
Problema con traslación de sensores.



*Fuente: elaboración propia*

# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CALIBRACIÓN DE CÁMARA



*Fuente: elaboración propia*



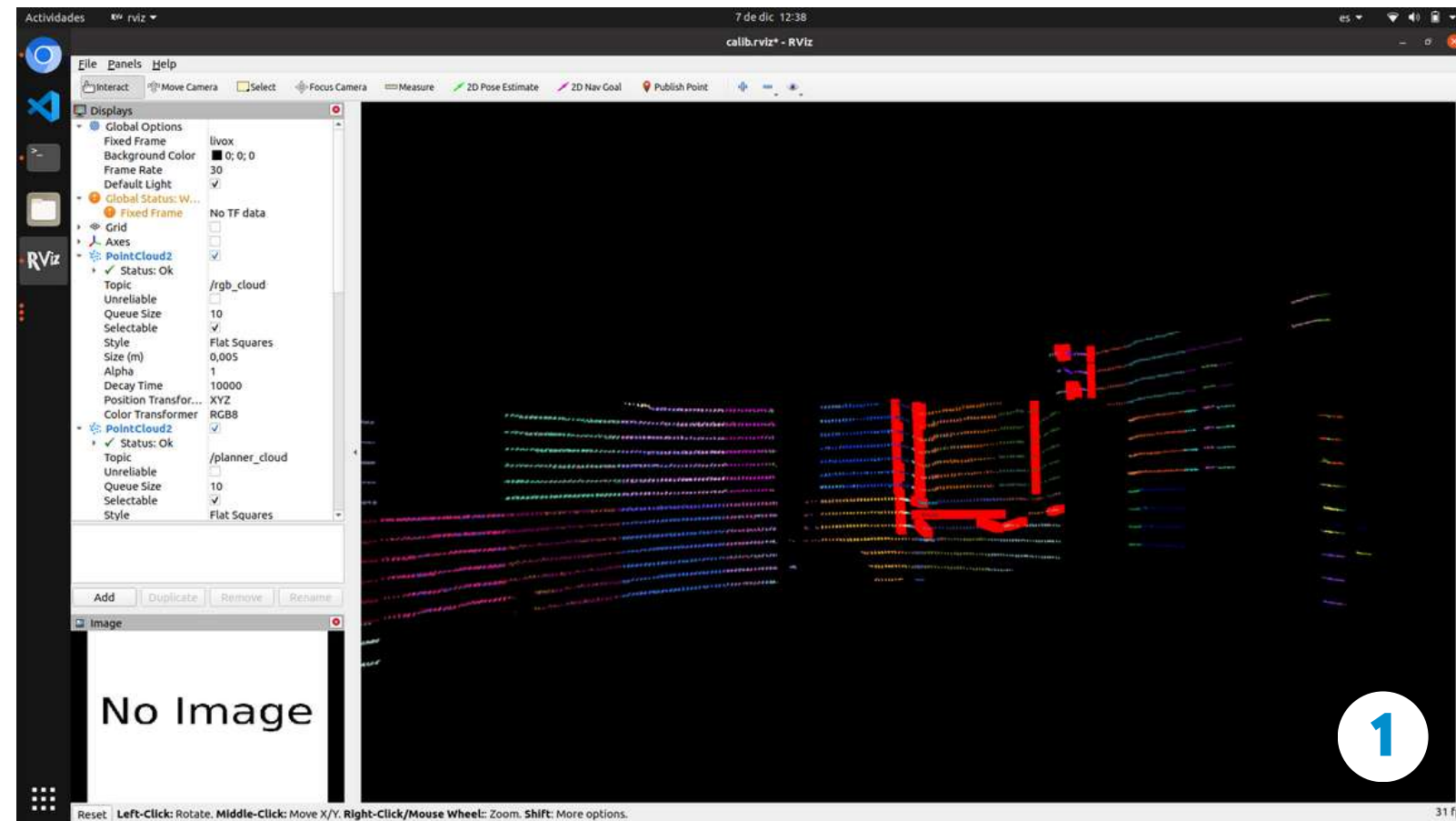
# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CALIBRACIÓN DE CÁMARA Y SENSOR LIDAR

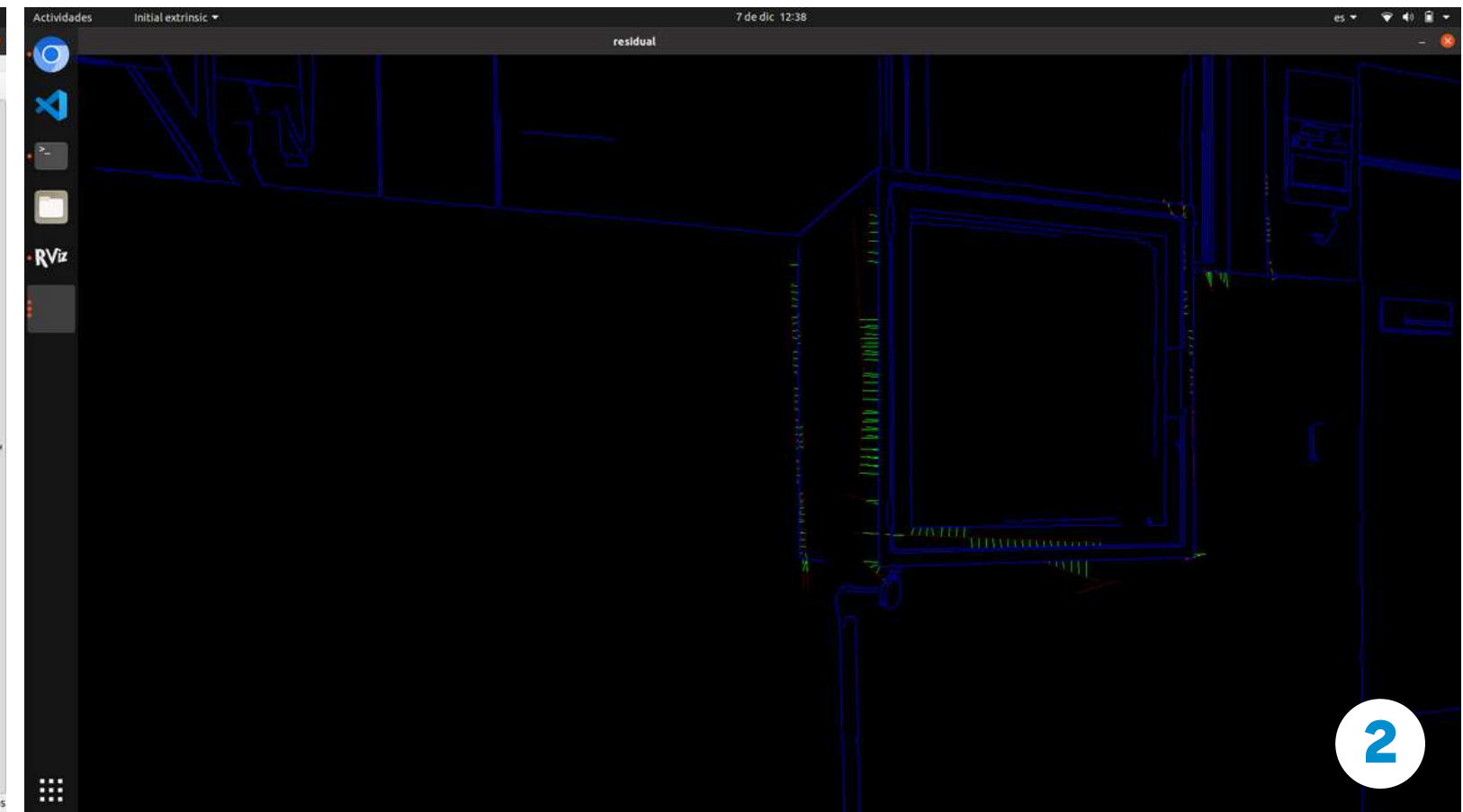
- Rotación de 90 grados para la nube de puntos.
- Configuración de algoritmo de calibración extrínseca.

$$E = \begin{bmatrix} 0.0 & -1.0 & 0.0 & -0.1965 \\ 0.0 & 0.0 & -1.0 & -0.12365 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & -0.41011 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

RANSAC



CANNY





# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CALIBRACIÓN DE CÁMARA Y SENSOR LIDAR

- Parámetros extrínsecos resultantes:

$$E = \begin{bmatrix} -0.0698172 & -0.99756 & 0.000516412 & -0.191322 \\ -0.15612 & 0.0104152 & -0.987683 & -0.161197 \\ 0.985268 & -0.0690379 & -0.156466 & -0.45126 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Rotación obtenida (en grados):

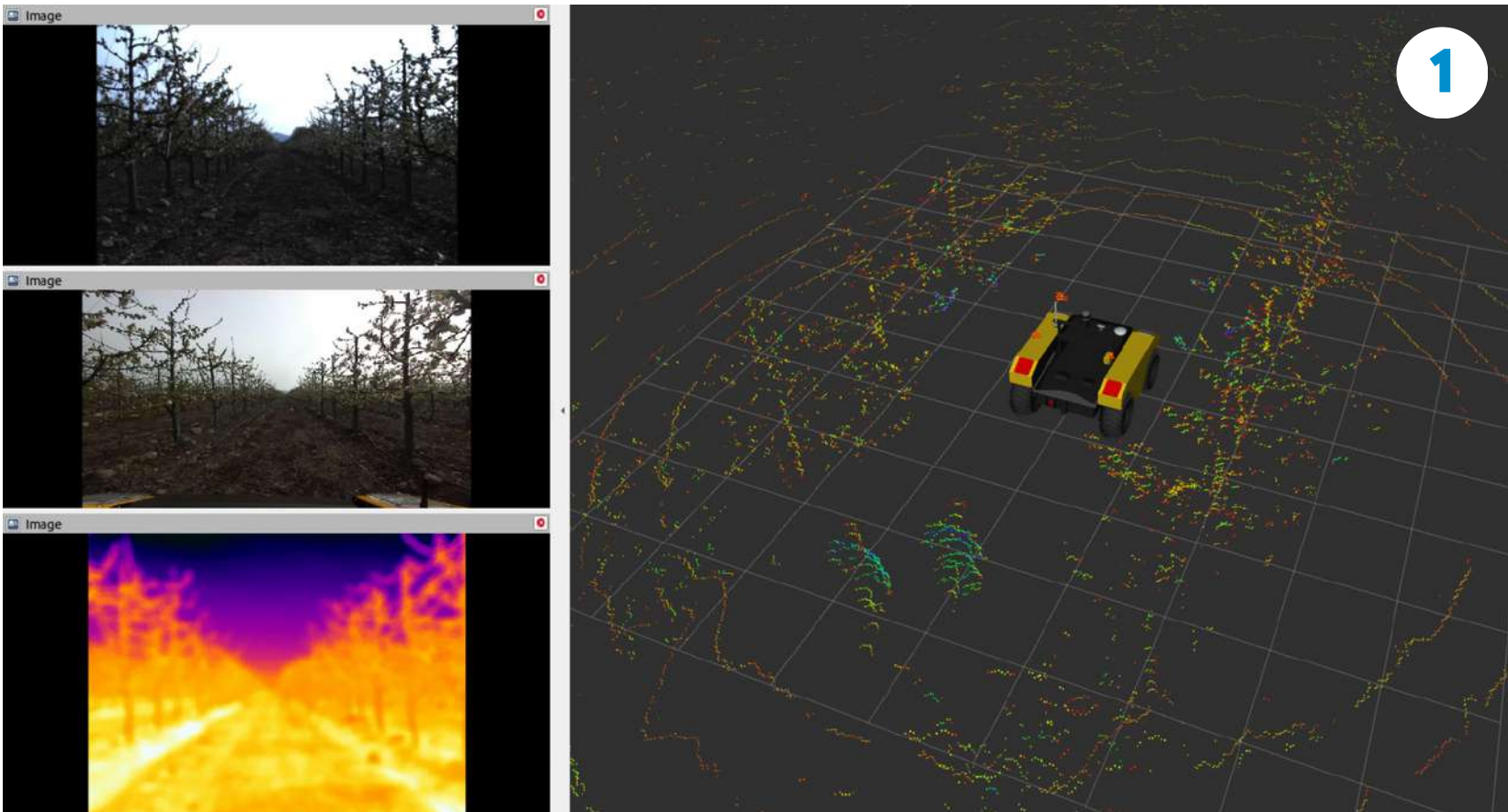
(-156.19154358, -80.15287841, -114.0941451)

- Representación visual de los parámetros obtenidos:



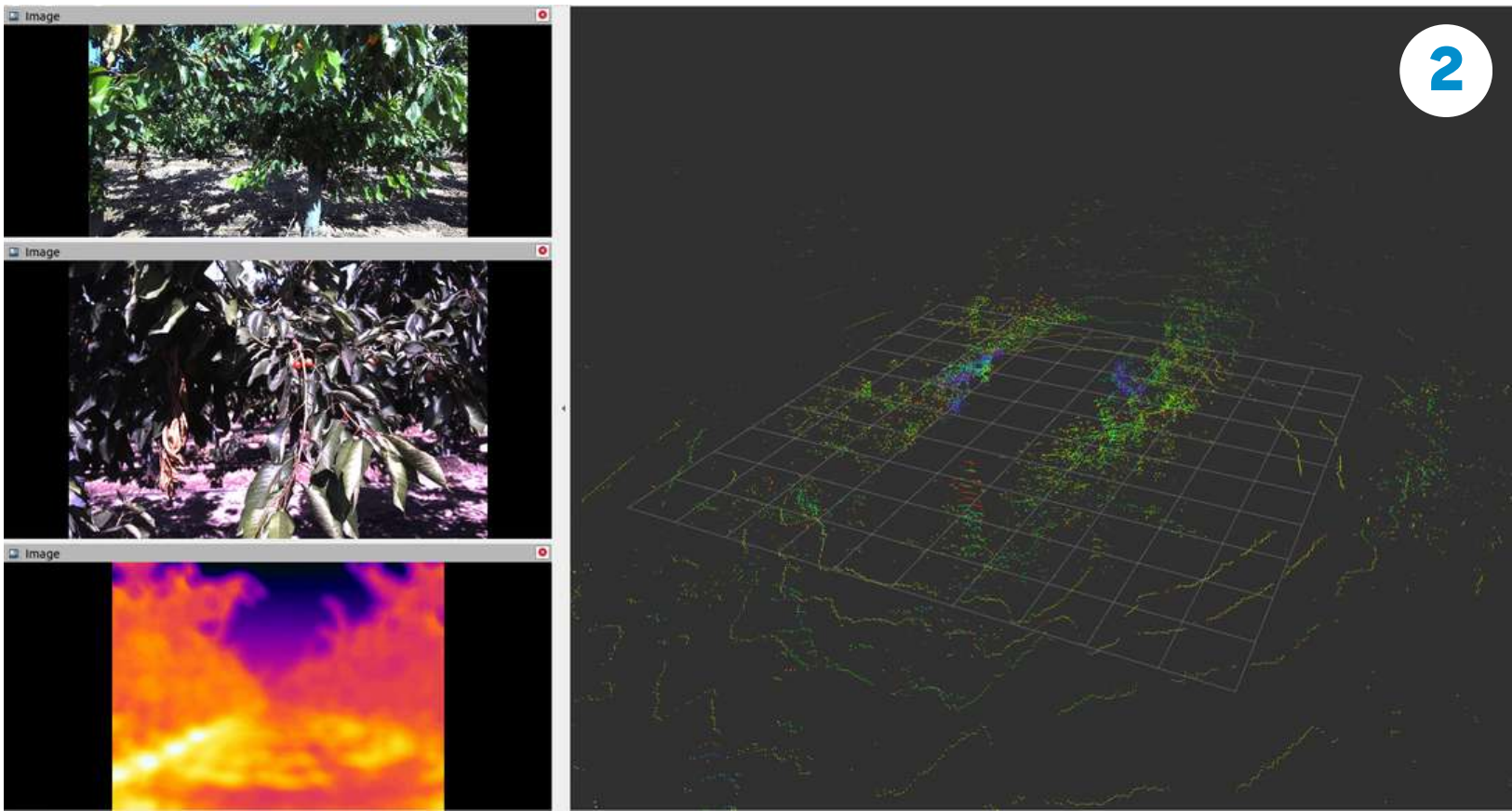
*Fuente: elaboración propia*

# ADQUISICIÓN DE DATOS



Primera salida a terreno: 13 - 09 - 2023

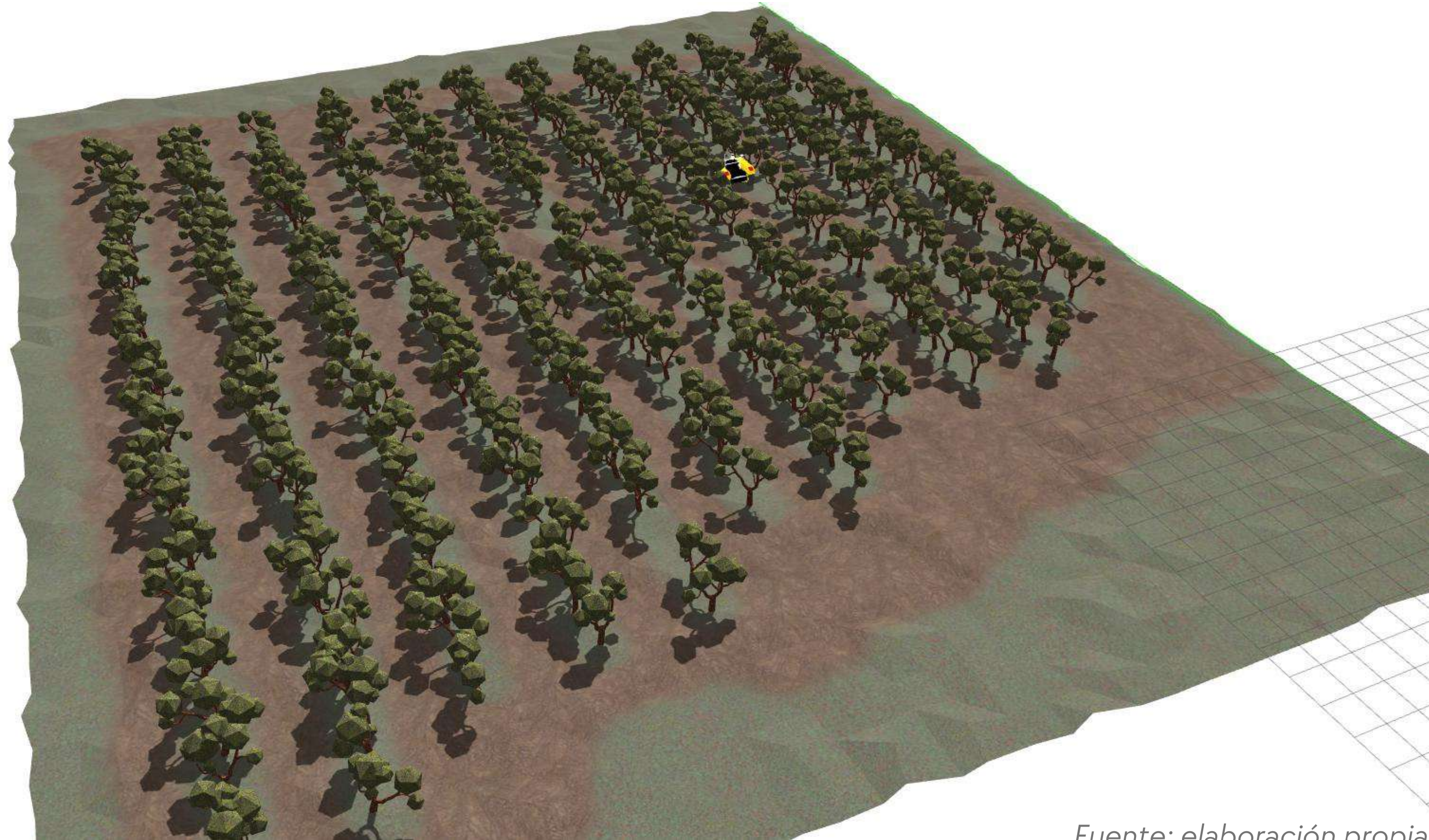
Segunda salida a terreno: 24 - 11 - 2023



Fuente: elaboración propia



# ENTORNO DE SIMULACIÓN MAPEADO



*Fuente: elaboración propia*



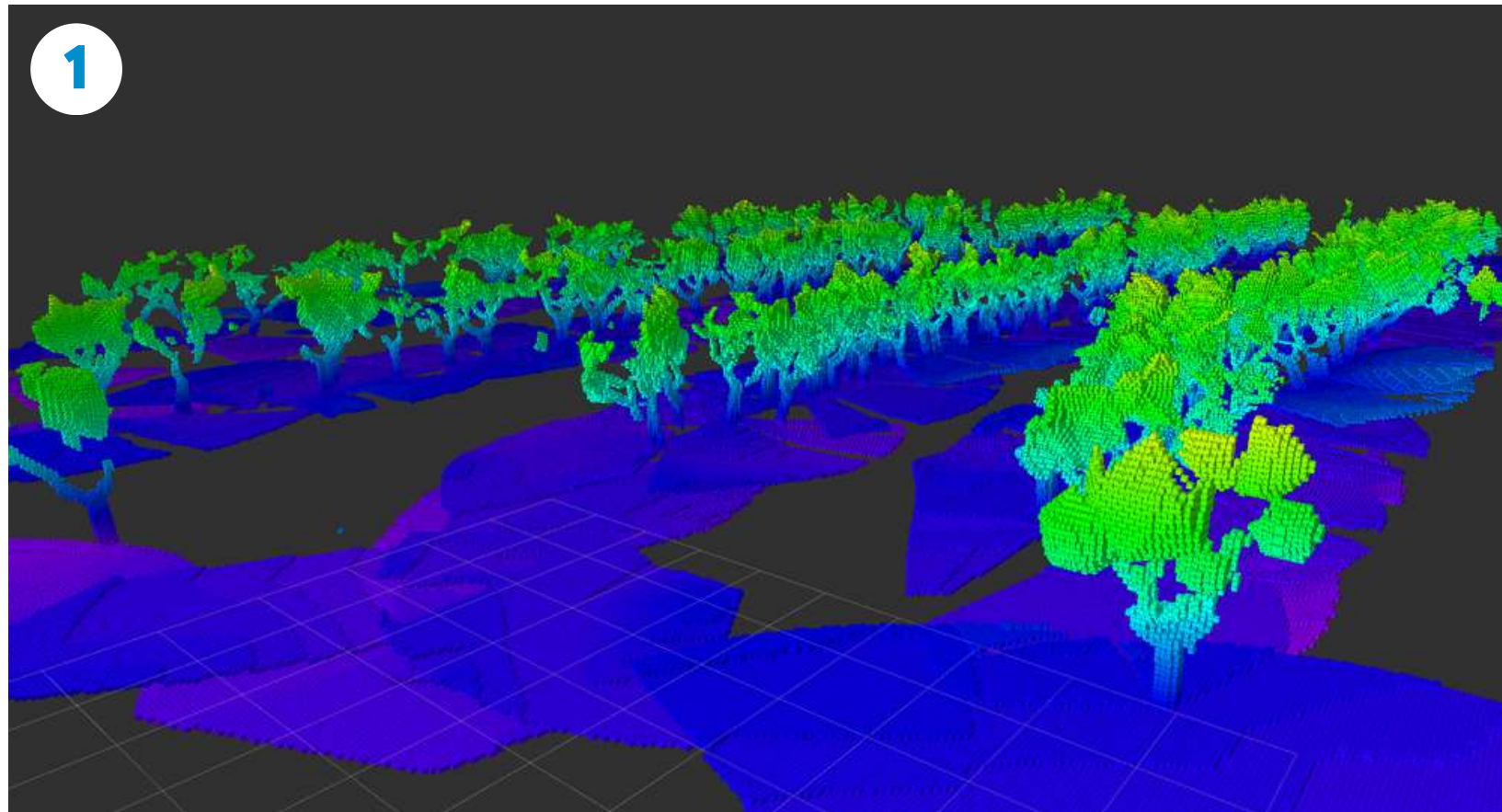
# ENTORNO REAL MAPEADO



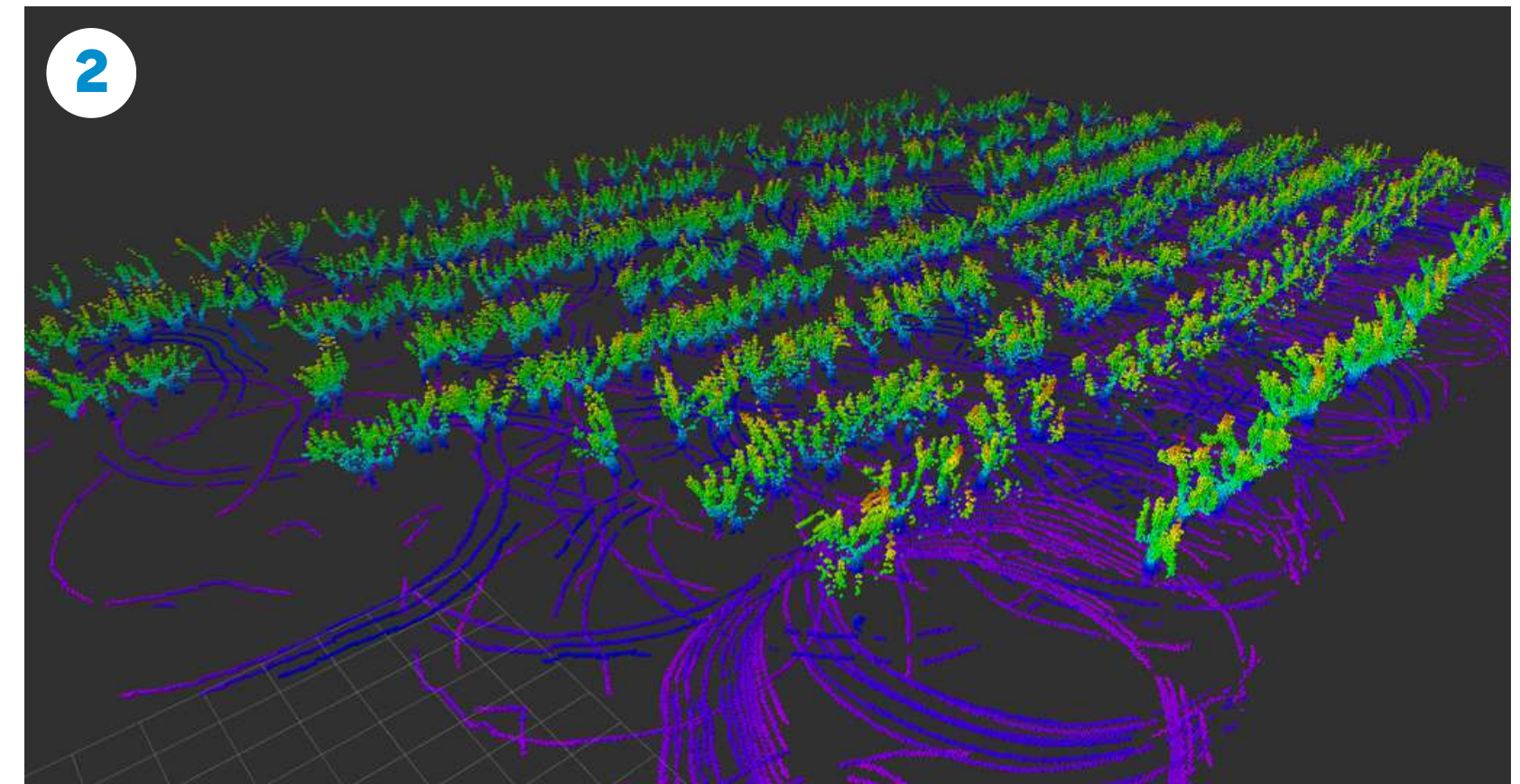
Fuente: RISLab



# MAPEO EN ENTORNO DE SIMULACIÓN



Mapeo sobre múltiples hileras - Cámara estéreo

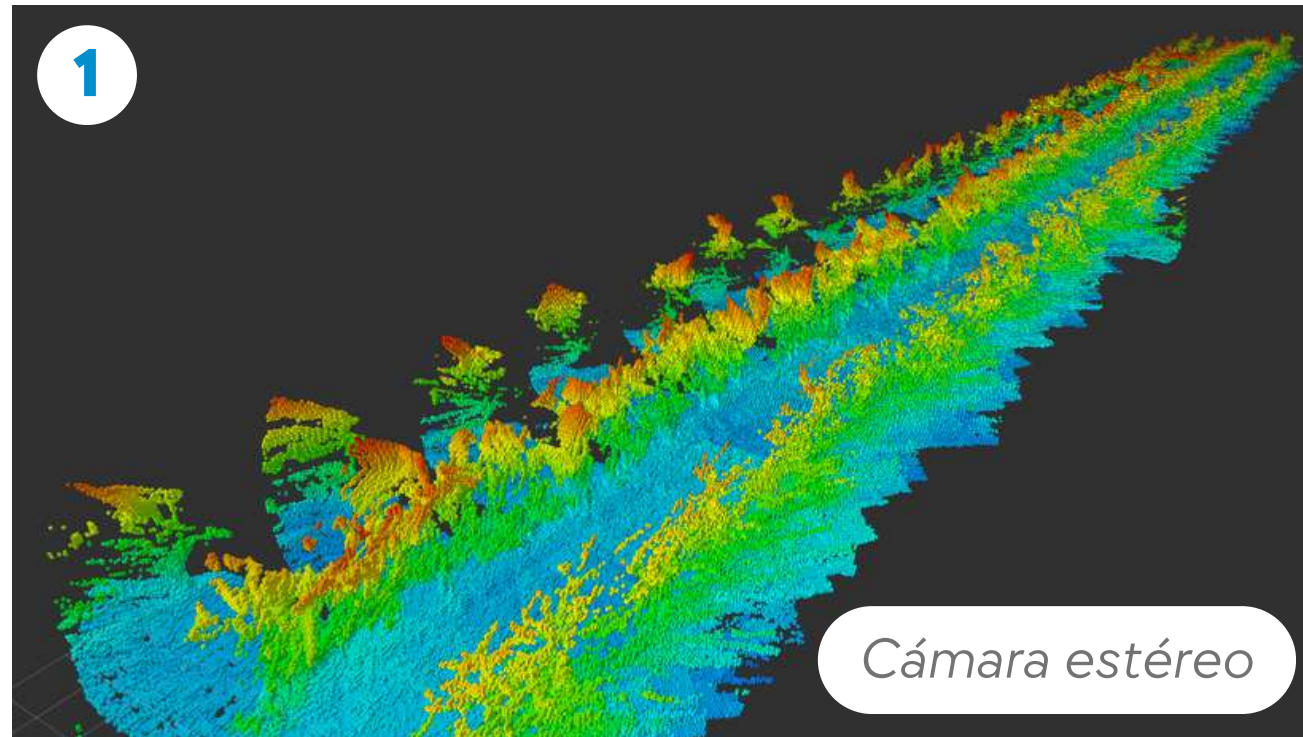


Mapeo sobre múltiples hileras - Sensor LiDAR

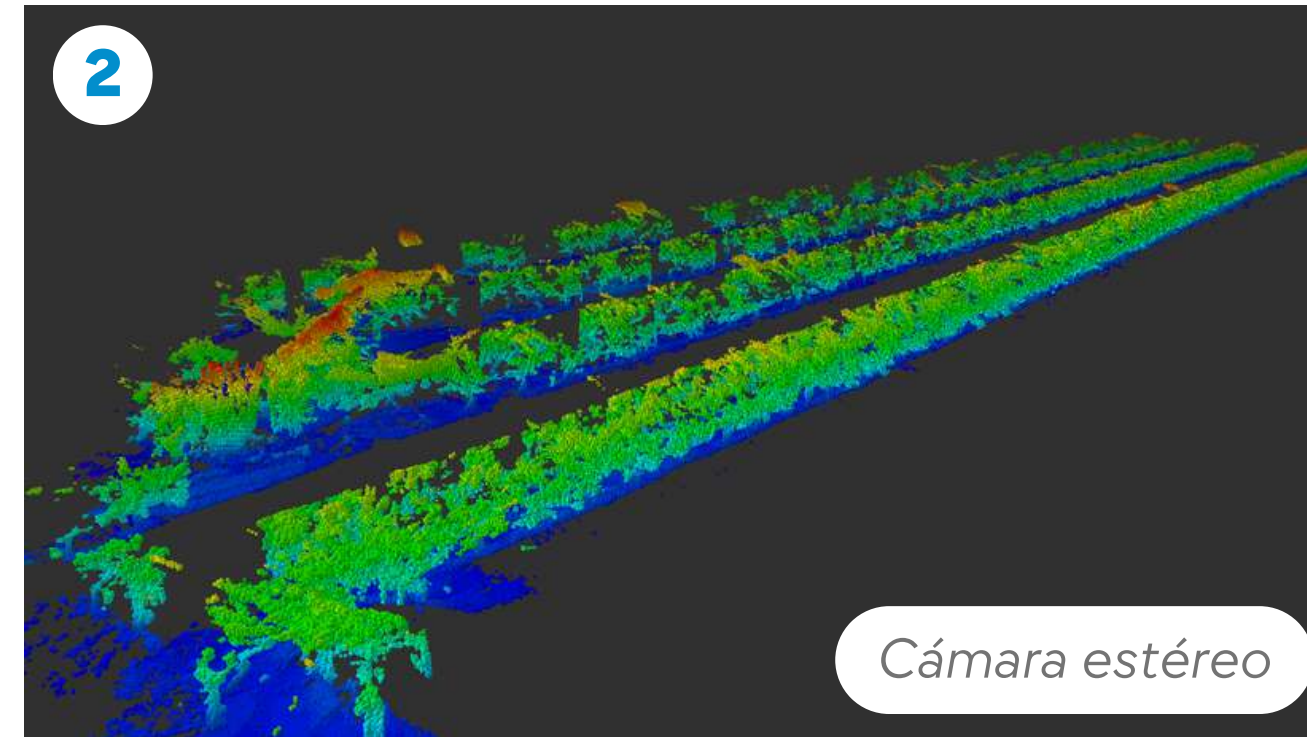
*Fuente: elaboración propia*



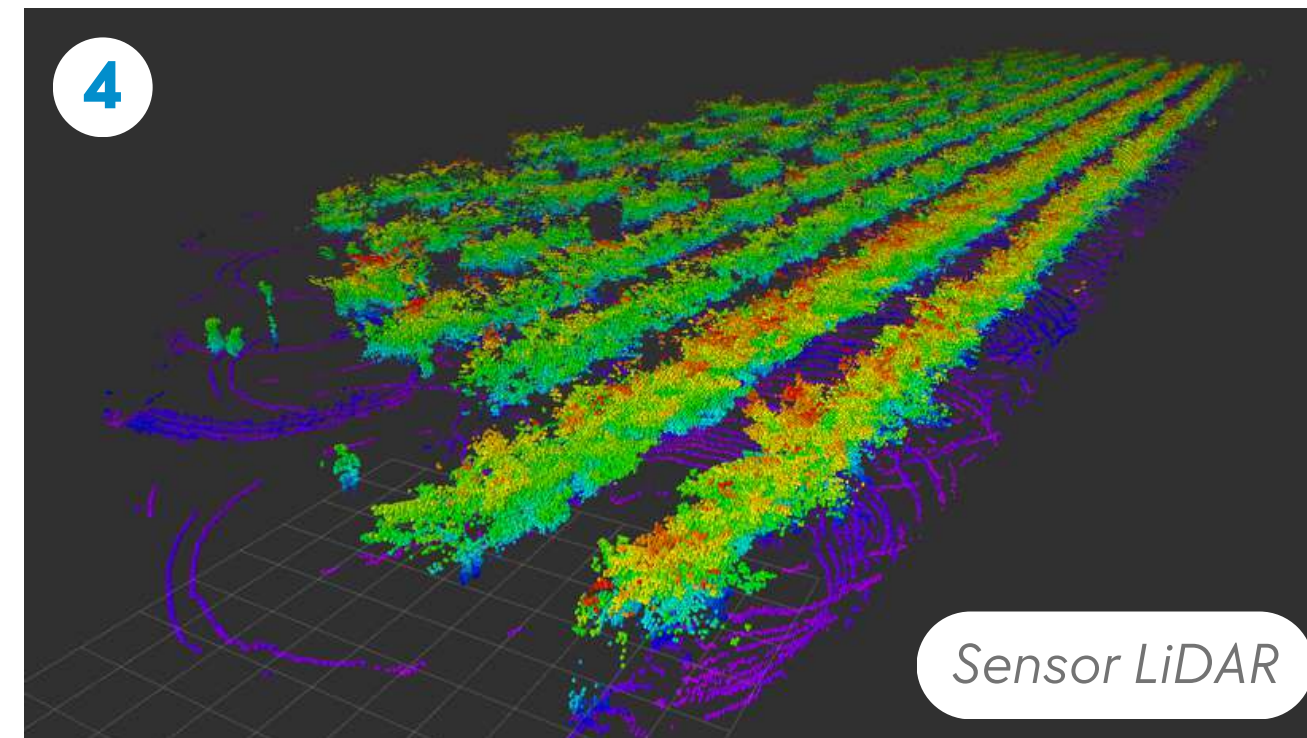
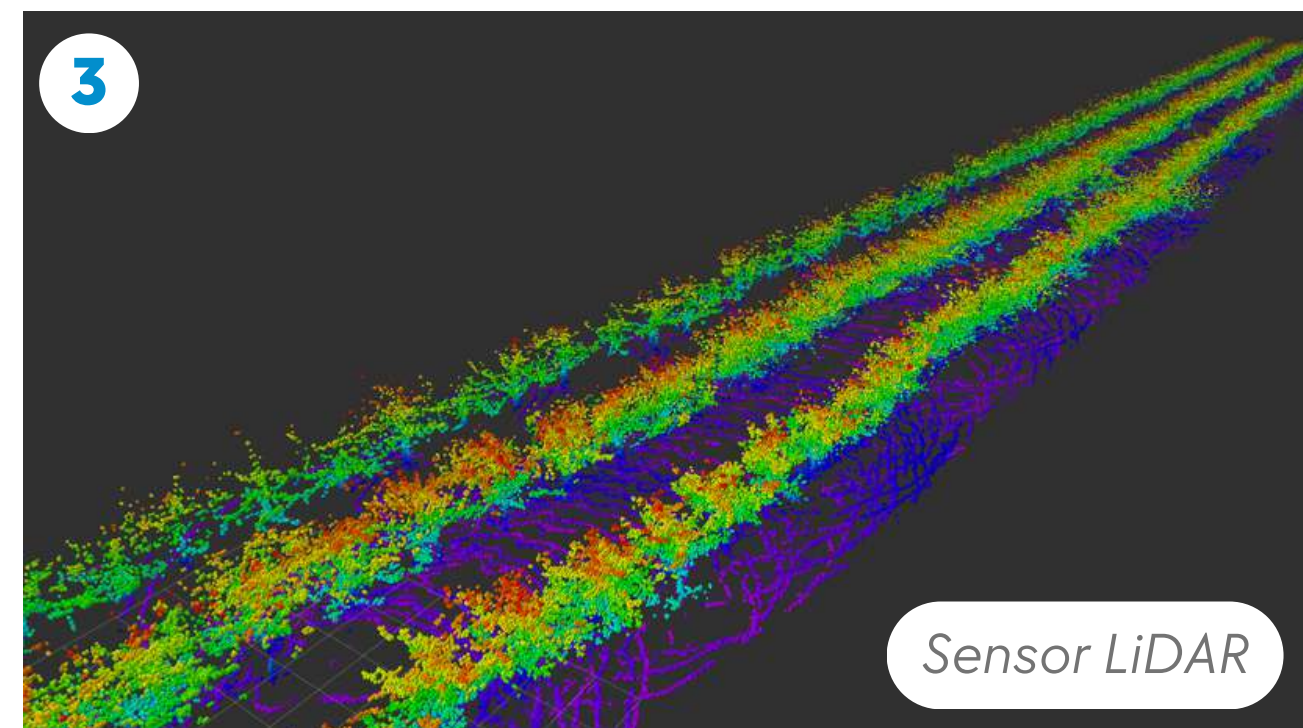
# MAPEO EN ENTORNO REAL



13 - 09 - 2023

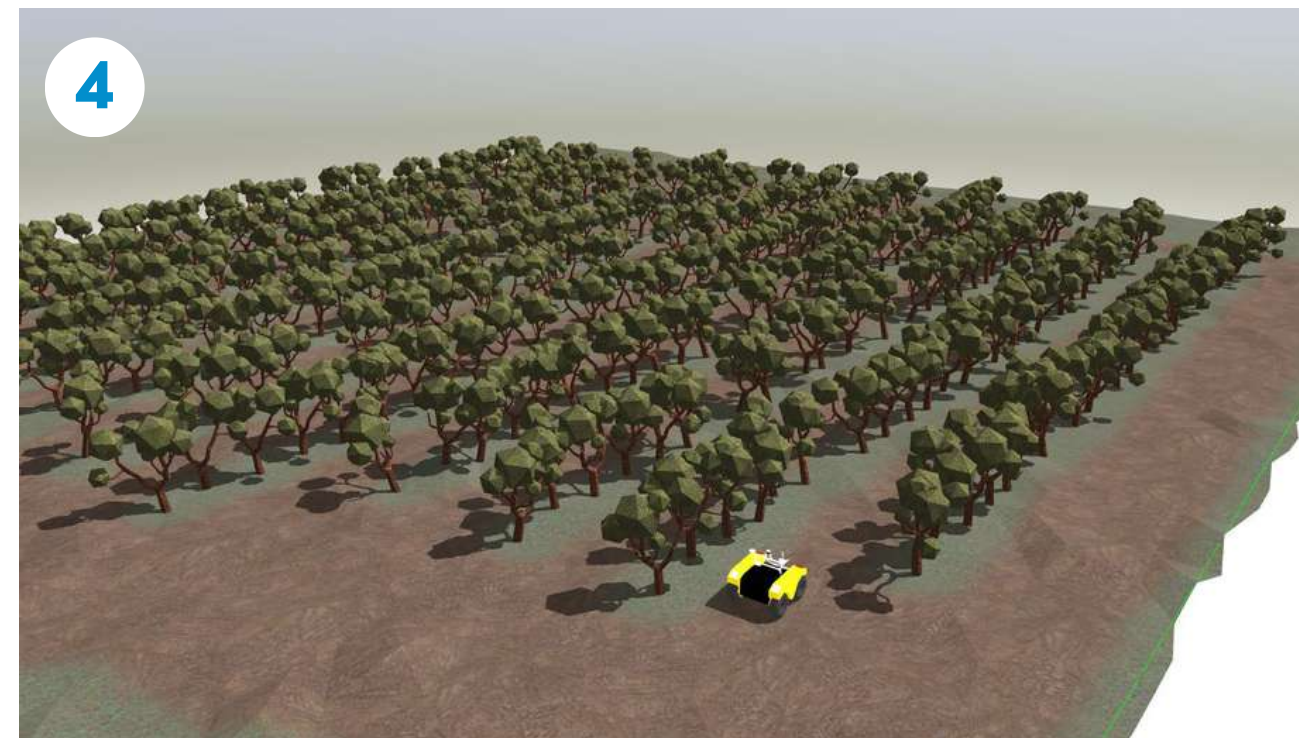
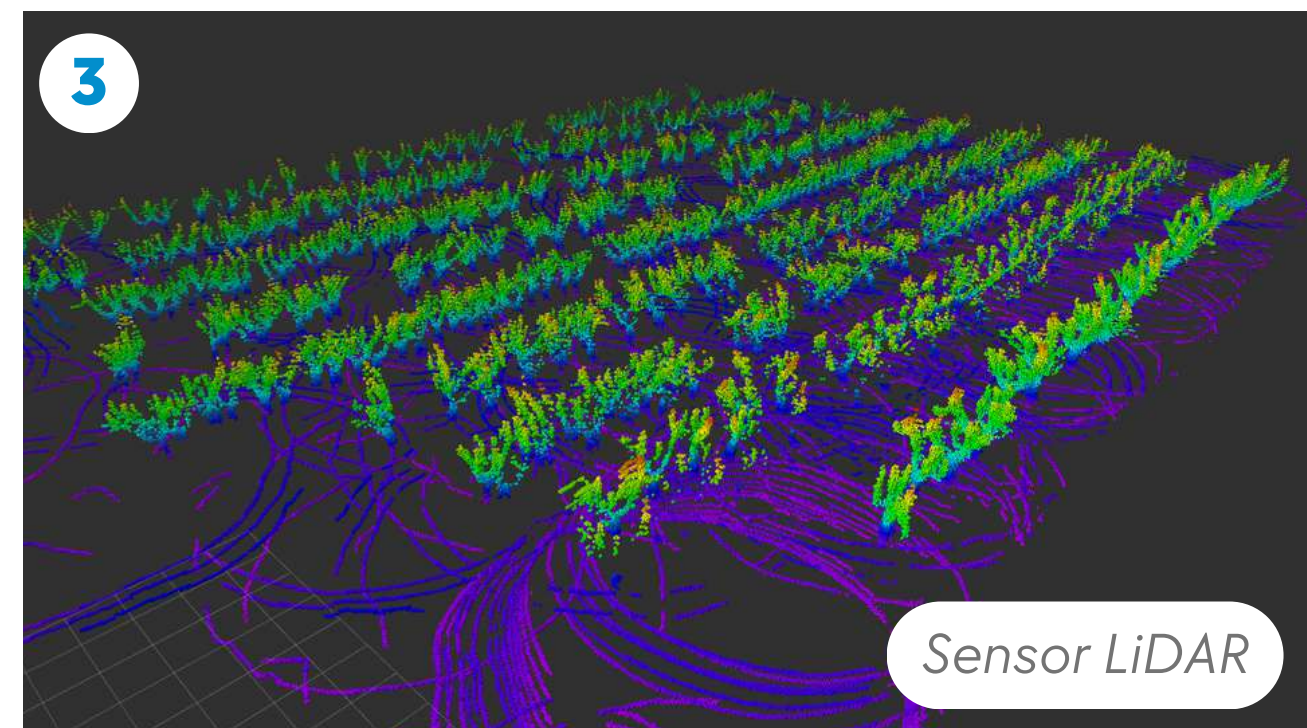
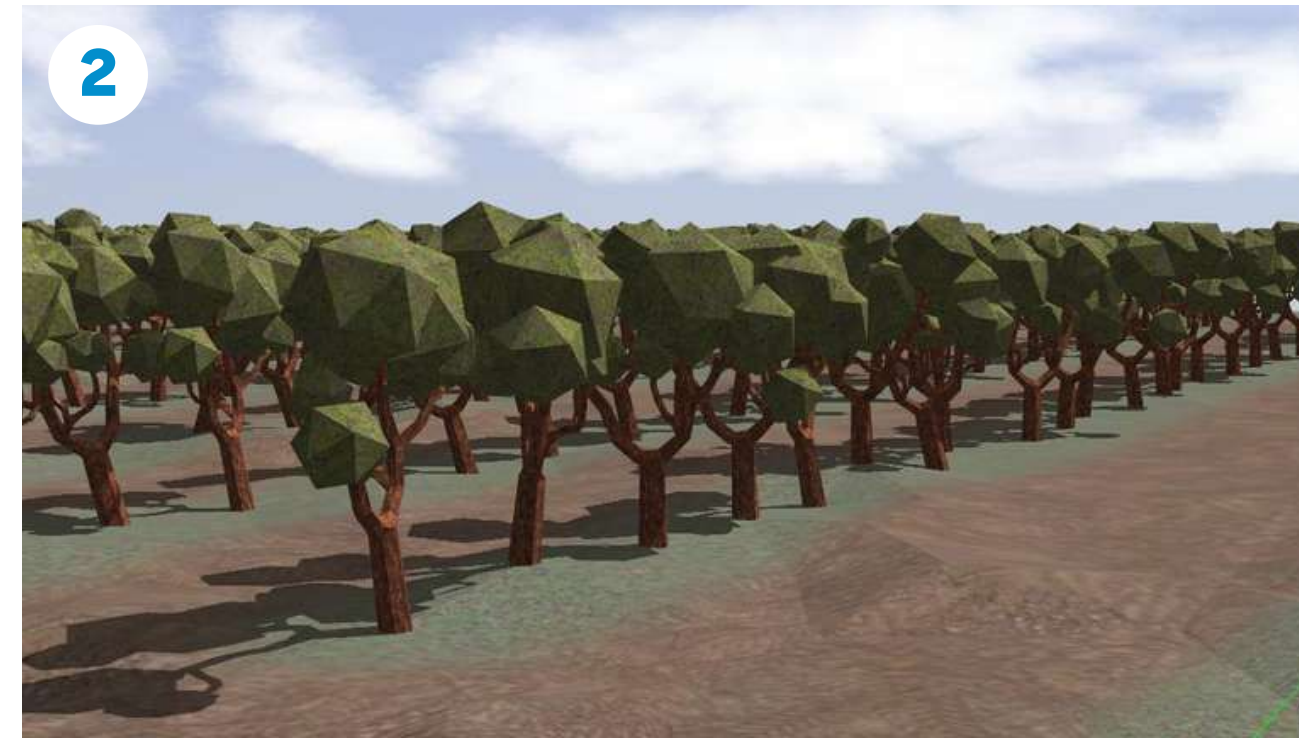
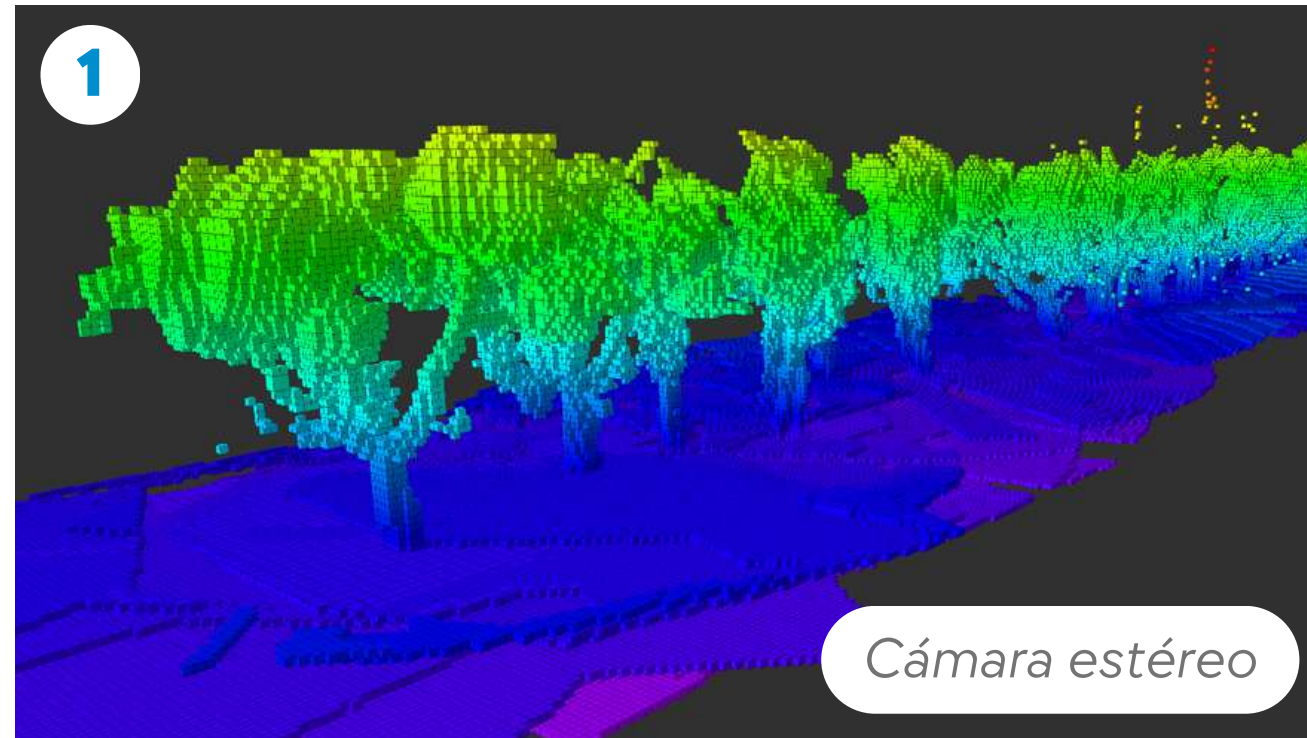


24 - 11 - 2023



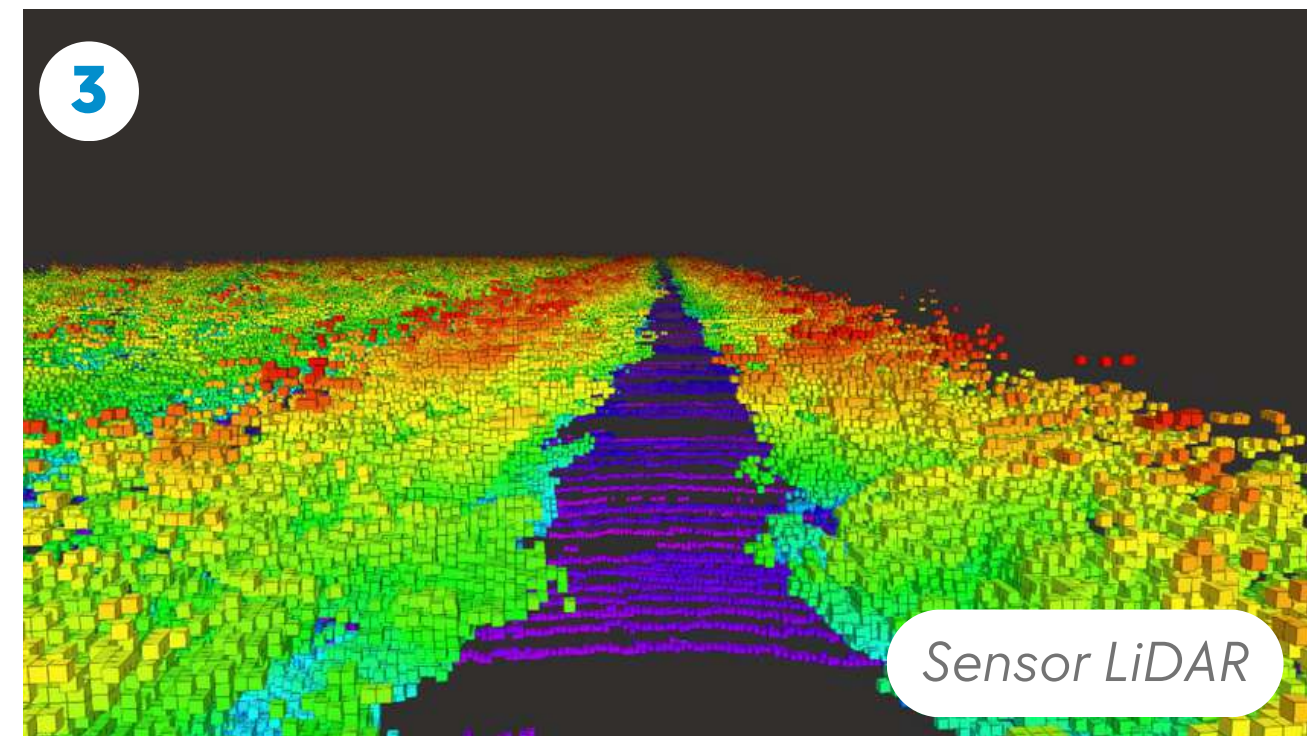
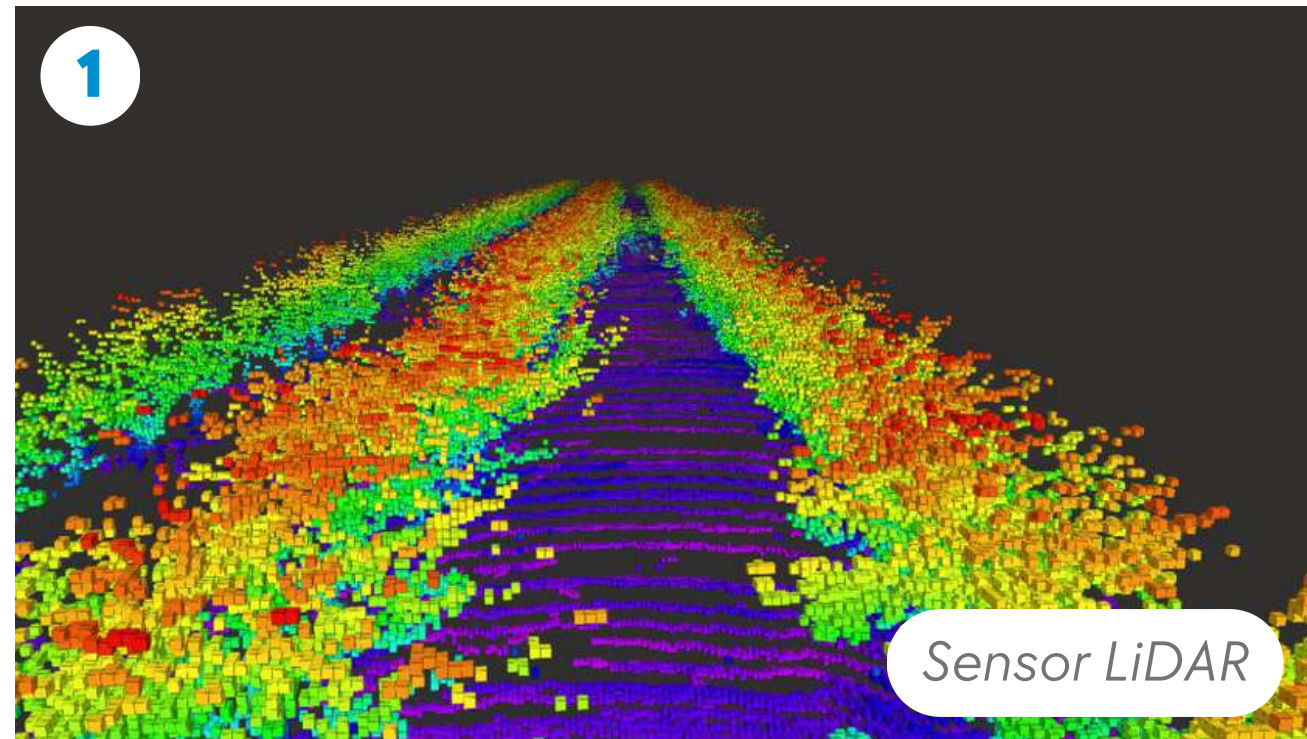


# EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL ALGORITMO DE MAPEO - SIMULACIÓN





# EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL ALGORITMO DE MAPEO - ENTORNO REAL





# EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL ALGORITMO DE MAPEO

Monitorización de procesos: **HTOP**



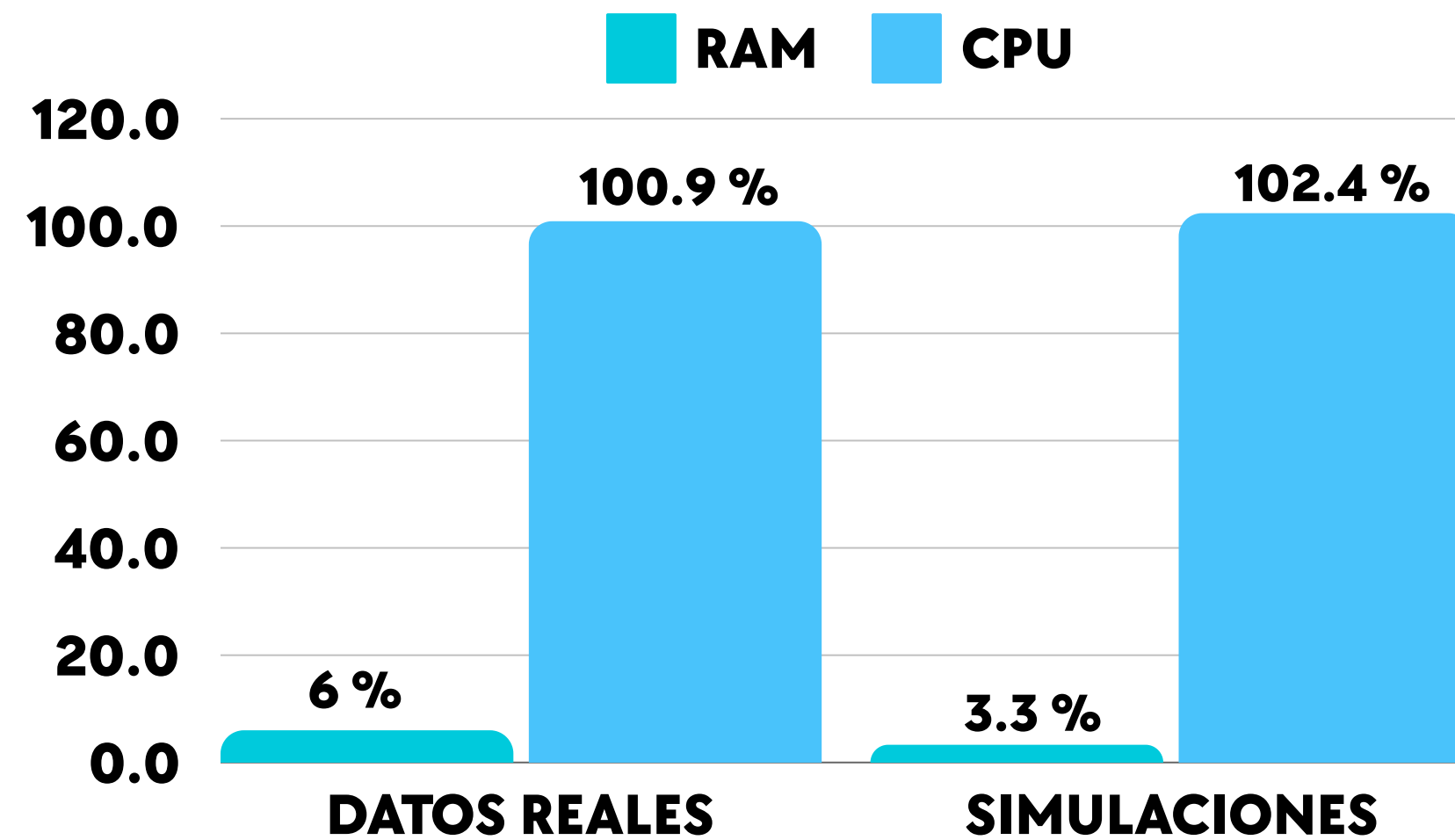
| Sensor utilizado | Datos reales           |       |                        |       |                        |       | Simulación |       |        |       |
|------------------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------|-------|--------|-------|
| -                | TOMA 1<br>(13-09-2023) |       | TOMA 1<br>(24-11-2023) |       | TOMA 2<br>(24-11-2023) |       | TOMA 1     |       | TOMA 2 |       |
|                  | RAM                    | CPU   | RAM                    | CPU   | RAM                    | CPU   | RAM        | CPU   | RAM    | CPU   |
| Sensor LiDAR     | 6,1                    | 100,8 | 4,6                    | 100,8 | 7,3                    | 101,3 | 2,1        | 102,1 | 4,6    | 102,6 |
| Cámara estéreo   | 4,0                    | 100,8 | 3,3                    | 97,3  | 3,8                    | 98,1  | 2,0        | 113,3 | 3,2    | 111,2 |

Fuente: elaboración propia

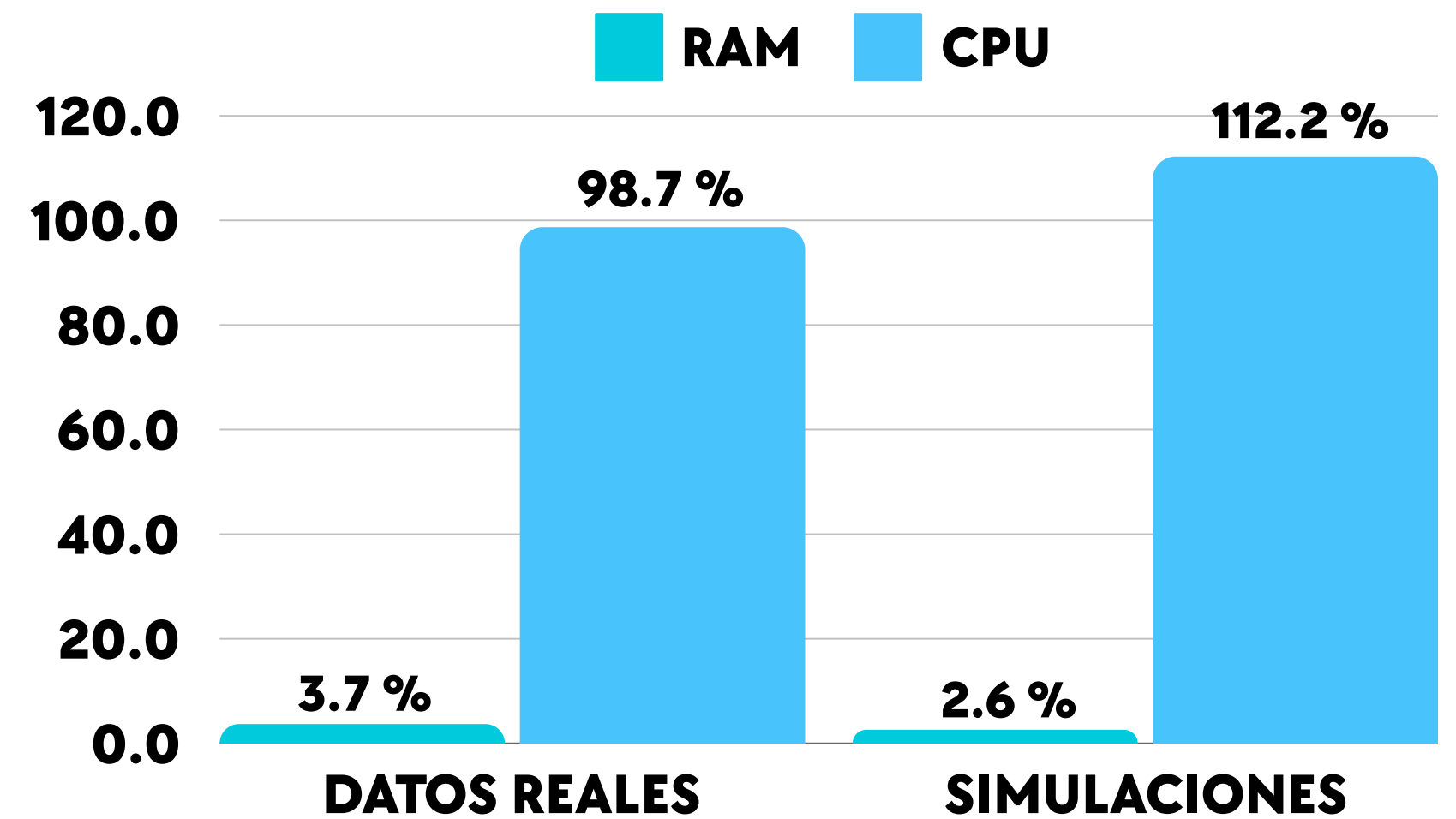
# EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL ALGORITMO DE MAPEO



**SENSOR LIDAR**

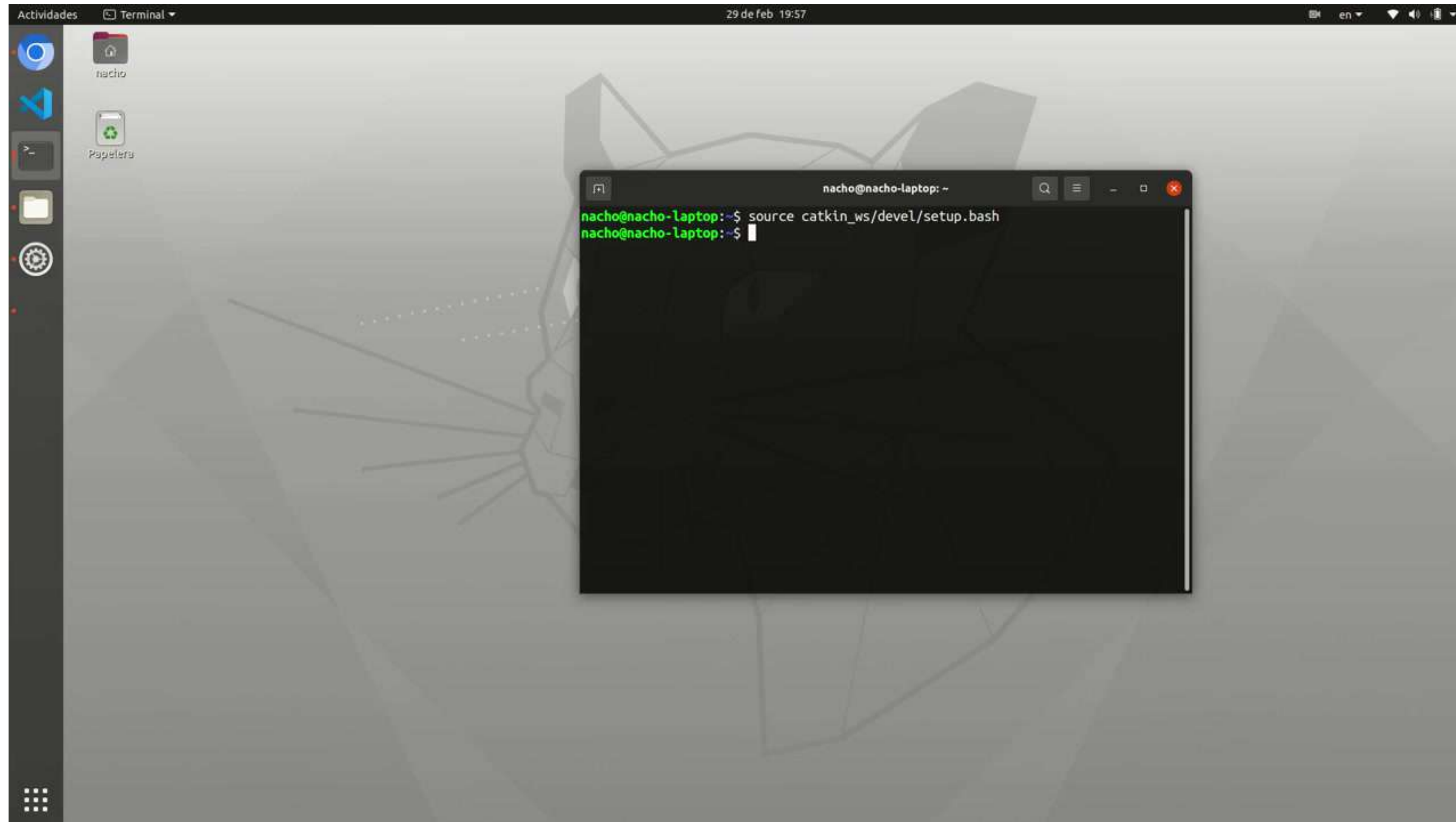


**CÁMARA ESTÉREO**





# HERRAMIENTA DE VISUALIZACIÓN



Fuente: elaboración propia

# CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

- **Importancia de la odometría:**
  - Entrada del algoritmo de mapeo.
  - Necesidad de abordar el problema de rotación.
- **Calibración de sensores:**
  - Crucial para obtener resultados precisos y confiables.
- **Adquisición de datos:**
  - Implementación offline de algoritmos.
  - Base para trabajos futuros.
- **Algoritmo de mapeo:**
  - Capacidad de generar mapas en entornos frutícolas.
  - Complejidad del mundo real se ve reflejada en resultados.
  - Alto porcentaje de uso de CPU por cantidad de datos.
- **Aporte a la agricultura de precisión:**
  - Permite a los agricultores comprender patrones y tomar decisiones estratégicas en la gestión de cultivos.

## PROPUESTA 1 - ODOMETRÍA (IMU)

## PROPUESTA 2 - POSICIONAMIENTO DE SENSORES

## PROPUESTA 3 - ALGORITMO DE MAPEO RGB

# REFERENCIAS

- Botta, A., Cavallone, P., Baglieri, L., Colucci, G., Tagliavini, L., & Quaglia, G. (2022). A Review of Robots, Perception, and Tasks in Precision Agriculture. En *Applied Mechanics* (Vol. 3, Número 3, pp. 830–854). MDPI. <https://doi.org/10.3390/applmech3030049>
- Chen, M., Tang, Y., Zou, X., Huang, Z., Zhou, H., & Chen, S. (2021). 3D global mapping of large-scale unstructured orchard integrating eye-in-hand stereo vision and SLAM. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106237>
- Gil, G., Casagrande, D. E., Cortés, L. P., & Verschae, R. (2023). Why the low adoption of robotics in the farms? Challenges for the establishment of commercial agricultural robots. *Smart Agricultural Technology*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100069>
- Han, B., Wei, J., Zhang, J., Meng, Y., Dong, Z., & Liu, H. (2023). GardenMap: Static point cloud mapping for Garden environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107548>
- Hornung, A., Wurm, K. M., Bennewitz, M., Stachniss, C., & Burgard, W. (2013). OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 34(3), 189–206. <https://doi.org/10.1007/s10514-012-9321-0>
- Informe de Cuentas Nacionales de Chile primer trimestre de 2023—Banco Central de Chile. (s. f.). Recuperado 23 de septiembre de 2023, de <https://www.bcentral.cl/contenido/-/detalle/informe-de-cuentas-nacionales-de-chile-primer-trimestre-de-2023>
- Kamegawa, T., Akiyama, T., Sakai, S., Fujii, K., Une, K., Ou, E., Matsumura, Y., Kishutani, T., Nose, E., Yoshizaki, Y., & Gofuku, A. (2020). Development of a separable search-and-rescue robot composed of a mobile robot and a snake robot. *Advanced Robotics*, 34(2), 132–139. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1691941>
- Kang, H., & Chen, C. (2019). Visual Perception and Modelling in Unstructured Orchard for Apple Harvesting Robots. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984556>
- Kim, W. S., Lee, D. H., Kim, Y. J., Kim, T., Lee, W. S., & Choi, C. H. (2021). Stereo-vision-based crop height estimation for agricultural robots. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105937>
- Rahman, M., Liu, H., Cardenas, I. D., Starr, A., Hall, A., & Anderson, R. (2021). Towards an Autonomous RIRS: Design, Structure Investigation and Framework. 2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, ICMRE 2021, 164–168. <https://doi.org/10.1109/ICMRE51691.2021.9384846>
- Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. En *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 207). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>
- Rovira-Más, F., Zhang, Q., & Reid, J. F. (2008). Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(2), 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.07.007>
- Szrek, J., Jakubiak, J., & Zimroz, R. (2022). A Mobile Robot-Based System for Automatic Inspection of Belt Conveyors in Mining Industry. *Energies*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/en15010327>
- Vieira, D., Orjuela, R., Spisser, M., & Basset, M. (2022). Positioning and Attitude determination for Precision Agriculture Robots based on IMU and Two RTK GPSs Sensor Fusion. *IFAC-PapersOnLine*, 55(32), 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.115>
- Wang, B. H., Diaz-Ruiz, C., Banfi, J., & Campbell, M. (2021). Detecting and Mapping Trees in Unstructured Environments with a Stereo Camera and Pseudo-Lidar. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2021-May, 14120–14126. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9562056>
- Wang, H., Zhang, C., Song, Y., Pang, B., & Zhang, G. (2020). Three-Dimensional Reconstruction Based on Visual SLAM of Mobile Robot in Search and Rescue Disaster Scenarios. *Robotica*, 38(2), 350–373. <https://doi.org/10.1017/S0263574719000675>



UOH

**ANEXOS**

# APLICACIONES Y USOS DE PLATAFORMAS ROBÓTICAS MÓVILES

## MINERÍA Y RESCATE

- Uso de robots móviles en inspección de cintas transportadoras en minas subterráneas (**Szerk et al., 2022**).
- Combinación de robots móviles y serpientes en tareas de búsqueda y rescate (**Kamegawa et al., 2020**).
- Propuesta de plataforma móvil para reconstrucción tridimensional (**Wang et al., 2020**).

## MANTENIMIENTO FERROVIARIO

- Robots móviles benefician la automatización en ferrocarriles.
- Propuesta de Sistema Autónomo de Inspección y Reparación Robótica (RIRS) (**Rahman et al., 2021**).

## AGRICULTURA DE PRECISIÓN

- Utilización de UGV robóticos en tareas agrícolas diversas (**Botta et al., 2022**).
- Aplicación en monitoreo y sensado remoto en agricultura.
- Ejemplos notables como Husky, BoniRob, Robotanist y Thorvald (**Gil et al., 2023**).
- Contribución a la optimización en la agricultura de precisión.

# ESTADO DEL ARTE - MAPEO DEL ENTORNO



1

Recolección de frutas con robots, utilizando aprendizaje profundo y "OctoMap" para la percepción visual y modelado de frutas en huertos no estructurados (**Kang y Chen, 2019**).

2

Estrategia de detección y mapeo de árboles en entornos forestales con cámaras estéreo. Utilizaron detector de objetos en 3D para identificar árboles (**Wang et al., 2021**).

3

Enfoque en percepción 3D y cartografía global en huertos no estructurados utilizando visión estéreo "eye-in-hand" y SLAM (**Chen et al., 2021**).

4

Propuesta del algoritmo "GardenMap" para mapear nubes de puntos estáticos en jardines, mejorando la localización y navegación de robots en entornos de jardines (**Han et al., 2023**).

5

Investigación sobre mapas semánticos en agricultura de precisión. Propusieron un método para la creación de mapas semánticos 3D en huertos de cítricos en tiempo real (**Xiong et al., 2023**).



# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CALIBRACIÓN DE CÁMARA

- Parámetros de calibración:

**D** **Coeficientes de distorsión:** Incluye  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  y  $k_3$ , utilizados para corregir distorsiones en la imagen.

**R** **Matriz de rectificación:** Se utiliza en cámaras estéreo para alinear el sistema de coordenadas de la cámara con el plano de imagen estéreo ideal (cámaras estéreo).

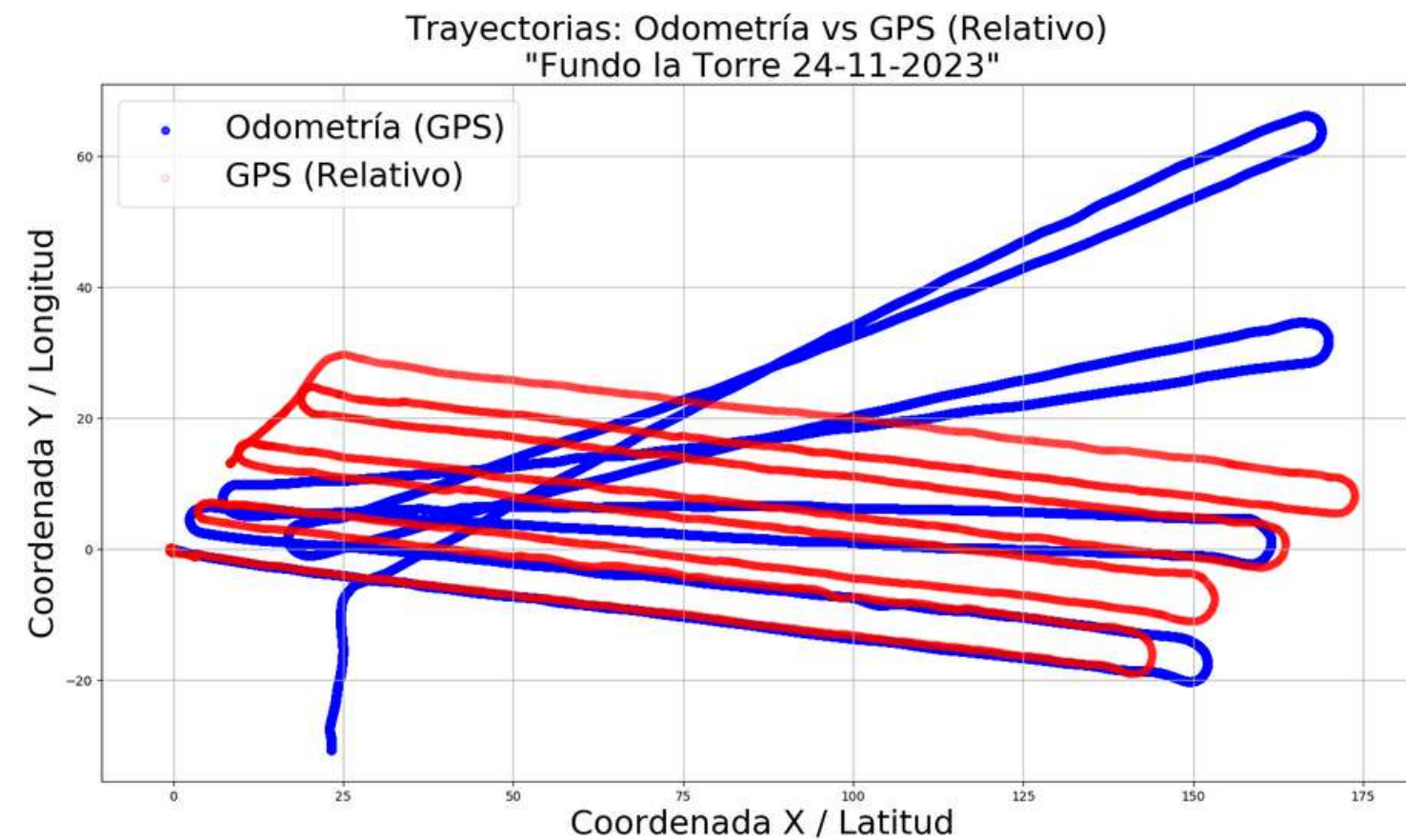
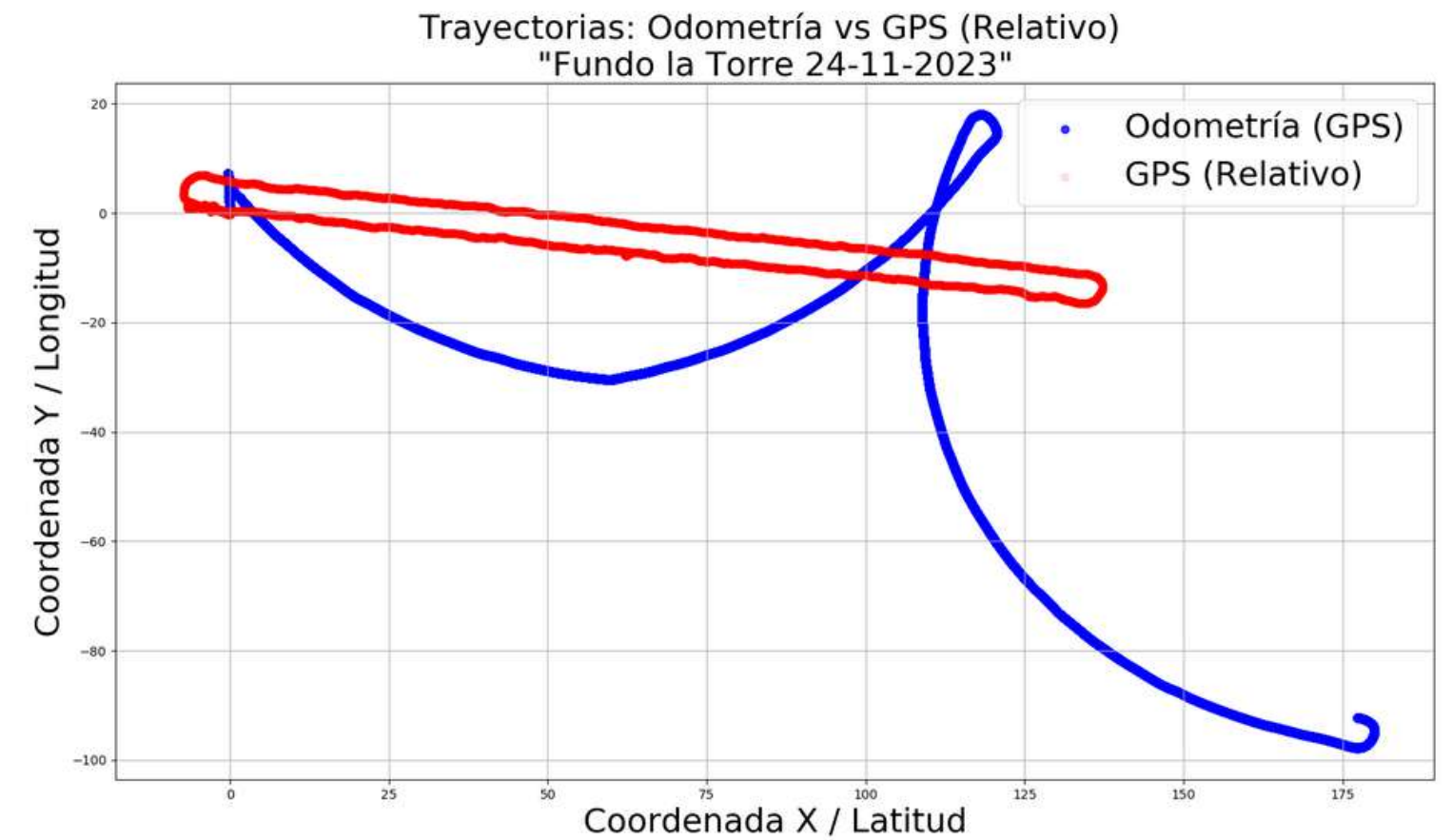
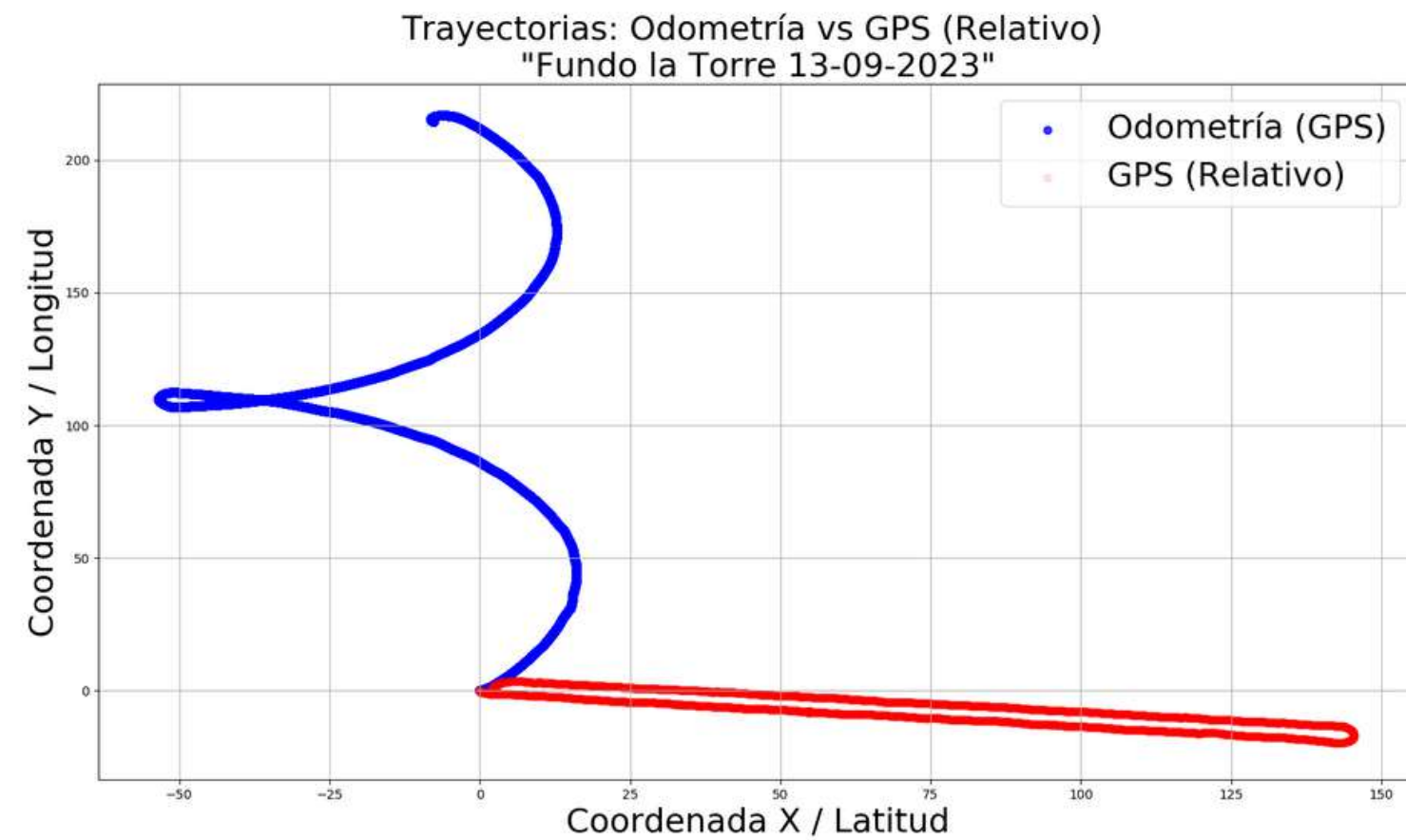
$$K = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**K** **Matriz de cámara intrínseca:** Contiene elementos esenciales como distancias focales y el centro óptico de la cámara en la imagen.

**P** **Matriz de proyección/cámara:** Esencial en cámaras estéreo para proyectar puntos 3D en coordenadas de píxeles 2D.

$$P = \begin{bmatrix} fx' & 0 & cx' & Tx \\ 0 & fy' & cy' & Ty \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

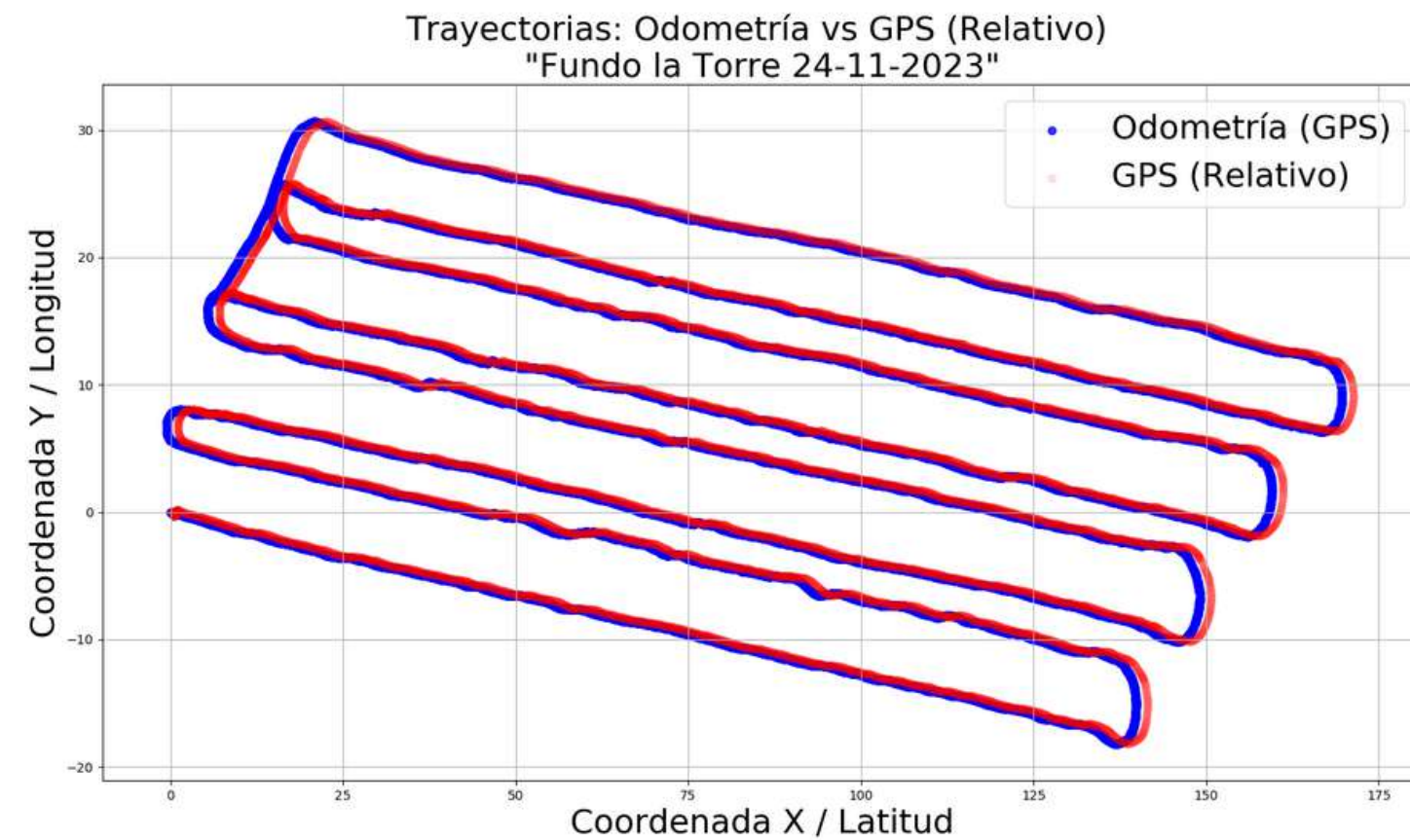
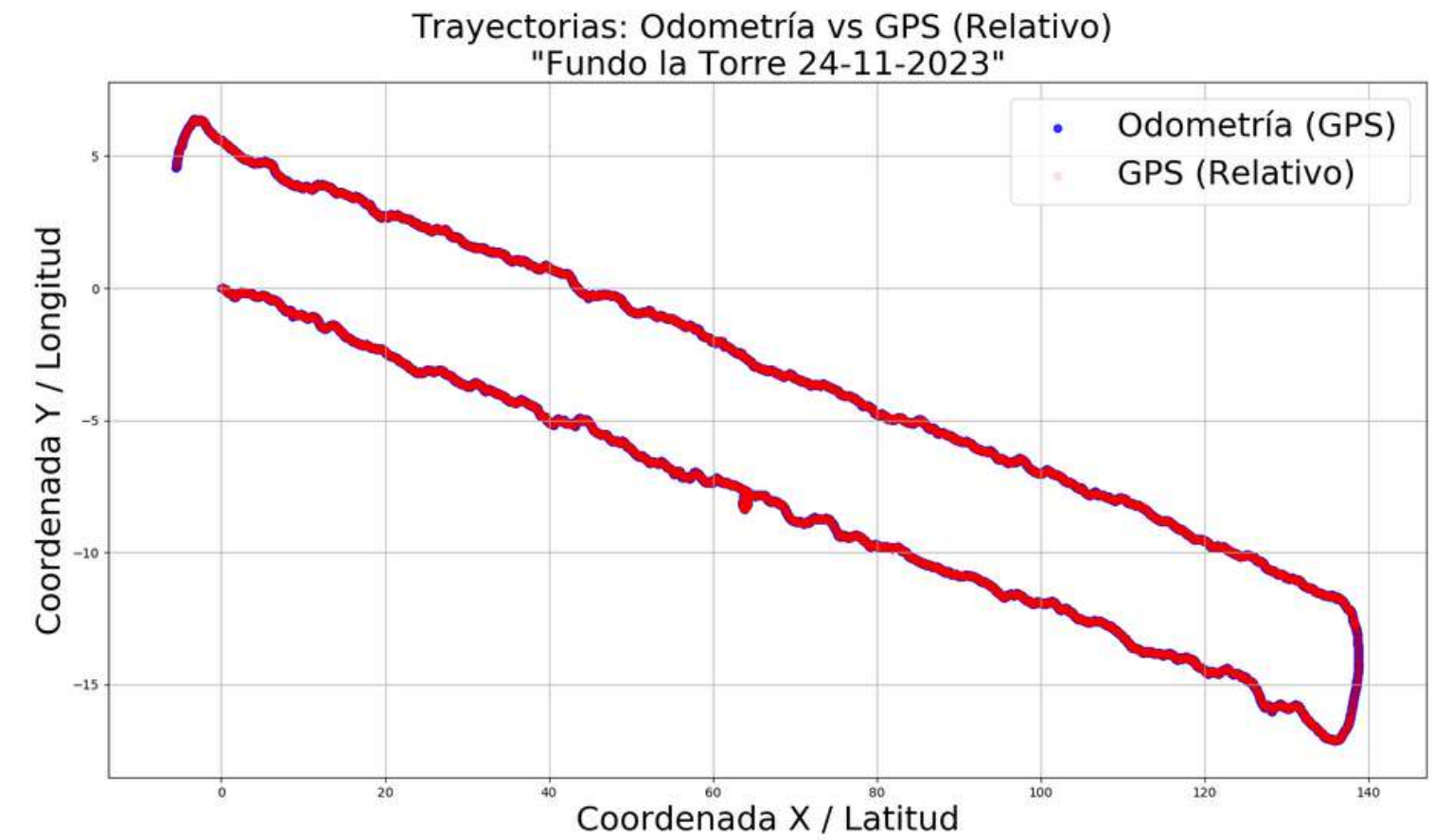
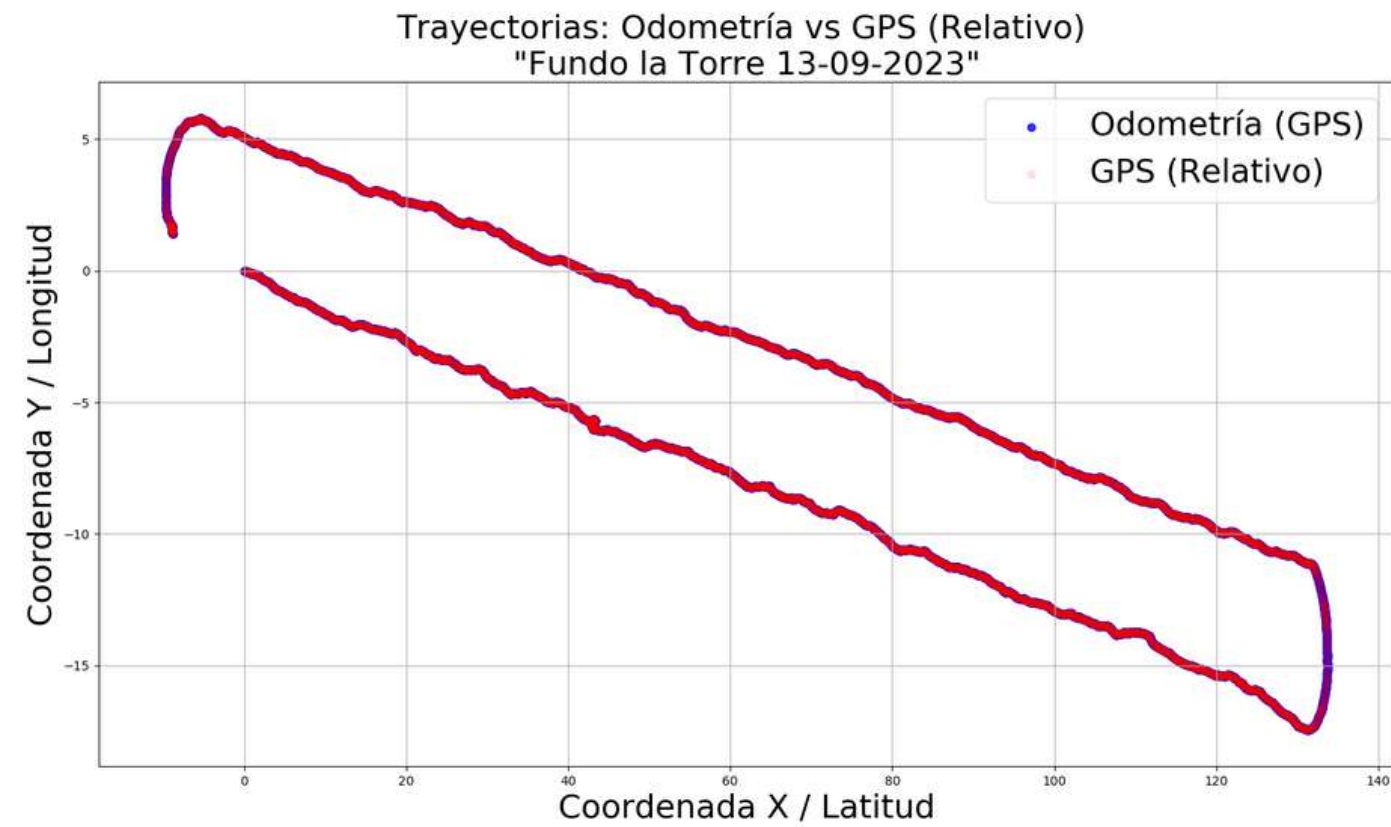
# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN ODOMETRÍA



*Fuente: elaboración propia*



# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN ODOMETRÍA



*Fuente: elaboración propia*

# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CONFIGURACIÓN "MANUAL"

| Sensor          | Traslación (x y z) [m] |           |          | Rotación (roll pitch yaw) [°] |   |     |
|-----------------|------------------------|-----------|----------|-------------------------------|---|-----|
| Antena          | -0.05579               | 0.35807   | 0.21     | 0                             | 0 | 0   |
| Swiftnav Antena | -0.02                  | -0.425    | 0.29816  | 0                             | 0 | 0   |
| Duro RTK        | -0.0525                | -0.326075 | -0.06471 | 0                             | 0 | 0   |
| Blackfly S      | -0.02                  | -0.008    | 0.31809  | 0                             | 0 | 0   |
| ZED 2           | -0.01                  | -0.188    | 0.339    | 0                             | 0 | 0   |
| VLP-16          | -0.02                  | 0         | 0.40451  | 0                             | 0 | 0   |
| FLIR A400       | 0.0038                 | 0         | 0.21328  | 0                             | 0 | 90  |
| IMU UM7         | 0.227                  | 0         | -0.02    | 0                             | 0 | -90 |

*Fuente: elaboración propia*

| Sensor     | Traslación (x y z) [m] |         |         | Rotación (roll pitch yaw) [°] |   |    |
|------------|------------------------|---------|---------|-------------------------------|---|----|
| ZED 2      | 0.1765                 | 0.41011 | 0.27816 | 0                             | 0 | 90 |
| Blackfly S | -0.01                  | 0.37191 | 0.2753  | 0                             | 0 | 90 |



# CALIBRACIÓN Y CONFIGURACIÓN

## CALIBRACIÓN DE CÁMARA

**K** Matriz de cámara intrínseca  $K = \begin{bmatrix} 1085.131537 & 0.000000 & 1149.659319 \\ 0.000000 & 1081.897829 & 642.082505 \\ 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix}$

**D** Coeficientes de distorsión  $D = [-0.006433 \quad 0.018901 \quad -0.001205 \quad 0.000886 \quad 0.000000]$

**R** Matriz de rectificación  $R = \begin{bmatrix} 1.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 1.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 \end{bmatrix}$

**P** Matriz de proyección/cámara  $P = \begin{bmatrix} 1112.624146 & 0.000000 & 1148.601028 & 0.000000 \\ 0.000000 & 1108.668091 & 638.554862 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 1.000000 & 0.000000 \end{bmatrix}$

# ADQUISICIÓN DE DATOS

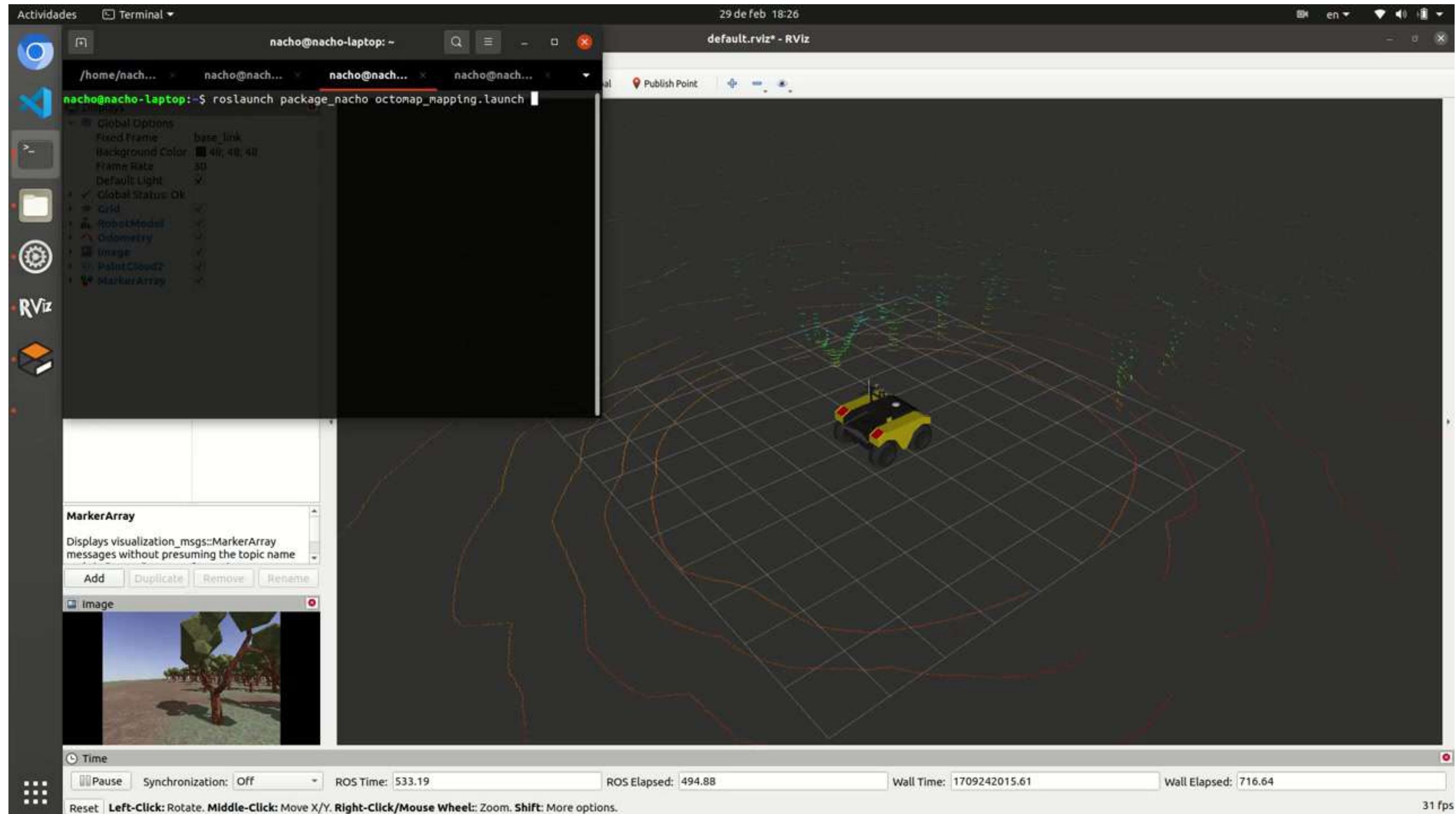
| Lugar / Fecha                               | Nombre del archivo | Tamaño   | Descripción  |
|---|--------------------|----------|--|
| Fundo la Torre,<br>Rengo-Chile / 13-09-2023 | toma1.bag          | 50,2 GB  | Ida y vuelta por hilera 66 desde el este.                                    |
|   | toma_camara.bag    | 64,1 GB  | Ida y vuelta por hilera 66 desde el este.                                    |
|   | giro.bag           | 17,3 GB  | Giro sobre propio eje de Warthog.  |
| Fundo la Torre,<br>Rengo-Chile / 24-11-2023 | toma1.bag          | 91,0 GB  | Ida y vuelta por hilera 66 desde el este. 0.32 m/s a 1,3 m de distancia.     |
|   | toma2.bag          | 121,0 GB | Recorrido por hileras 66 a 73. 0.5 m/s aproximadamente a 1,5 m de distancia. |

Fuente: elaboración propia



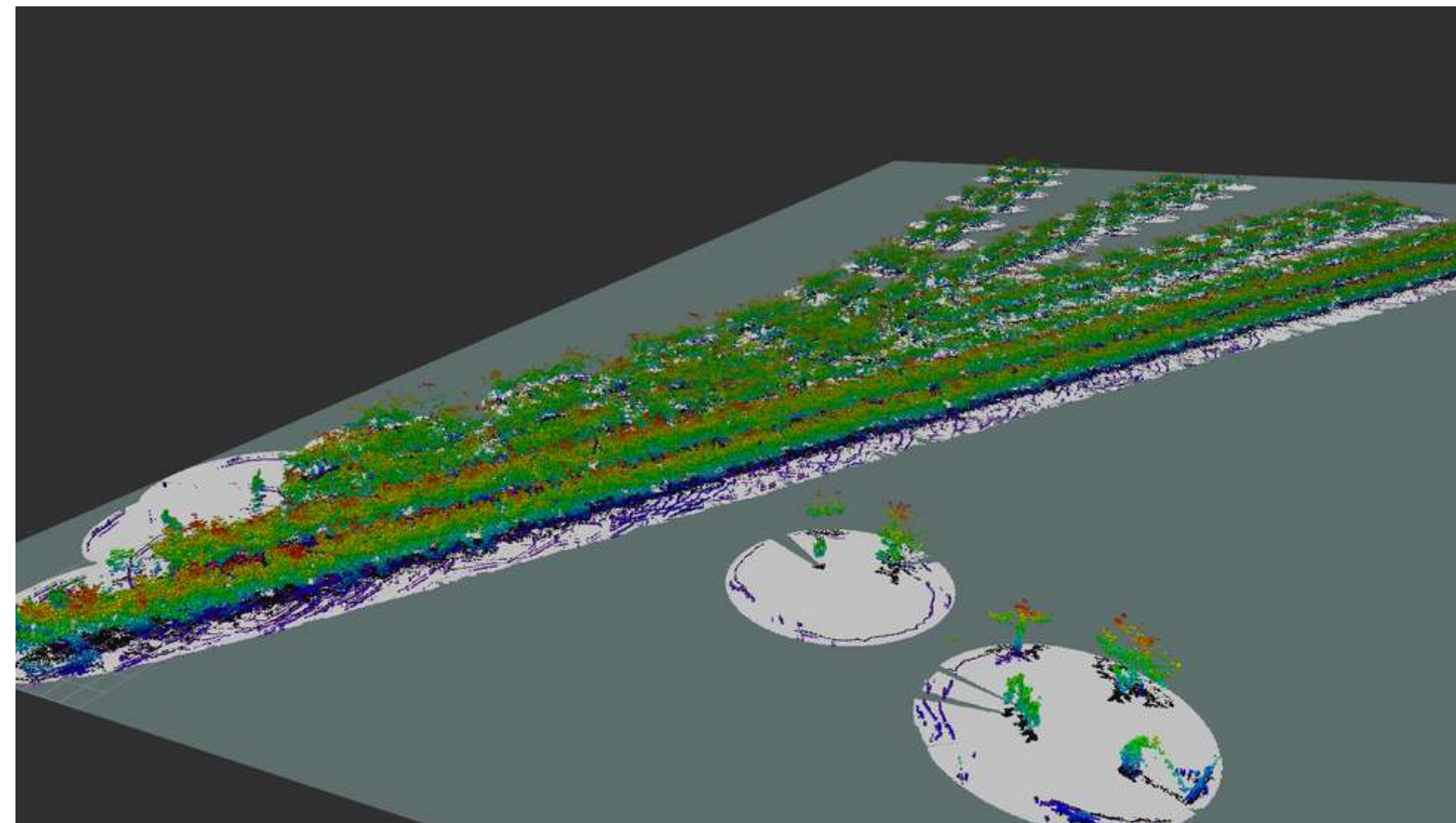
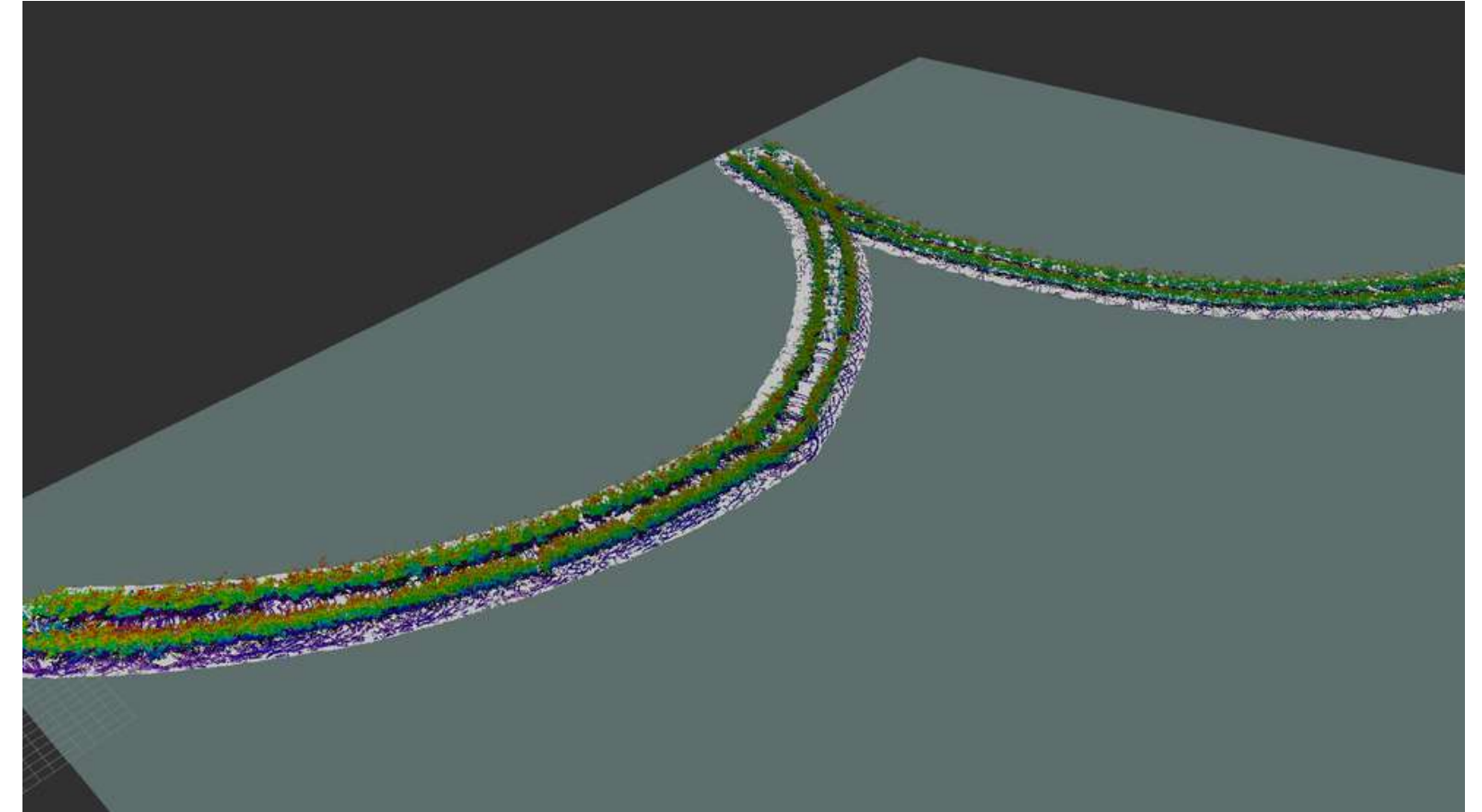
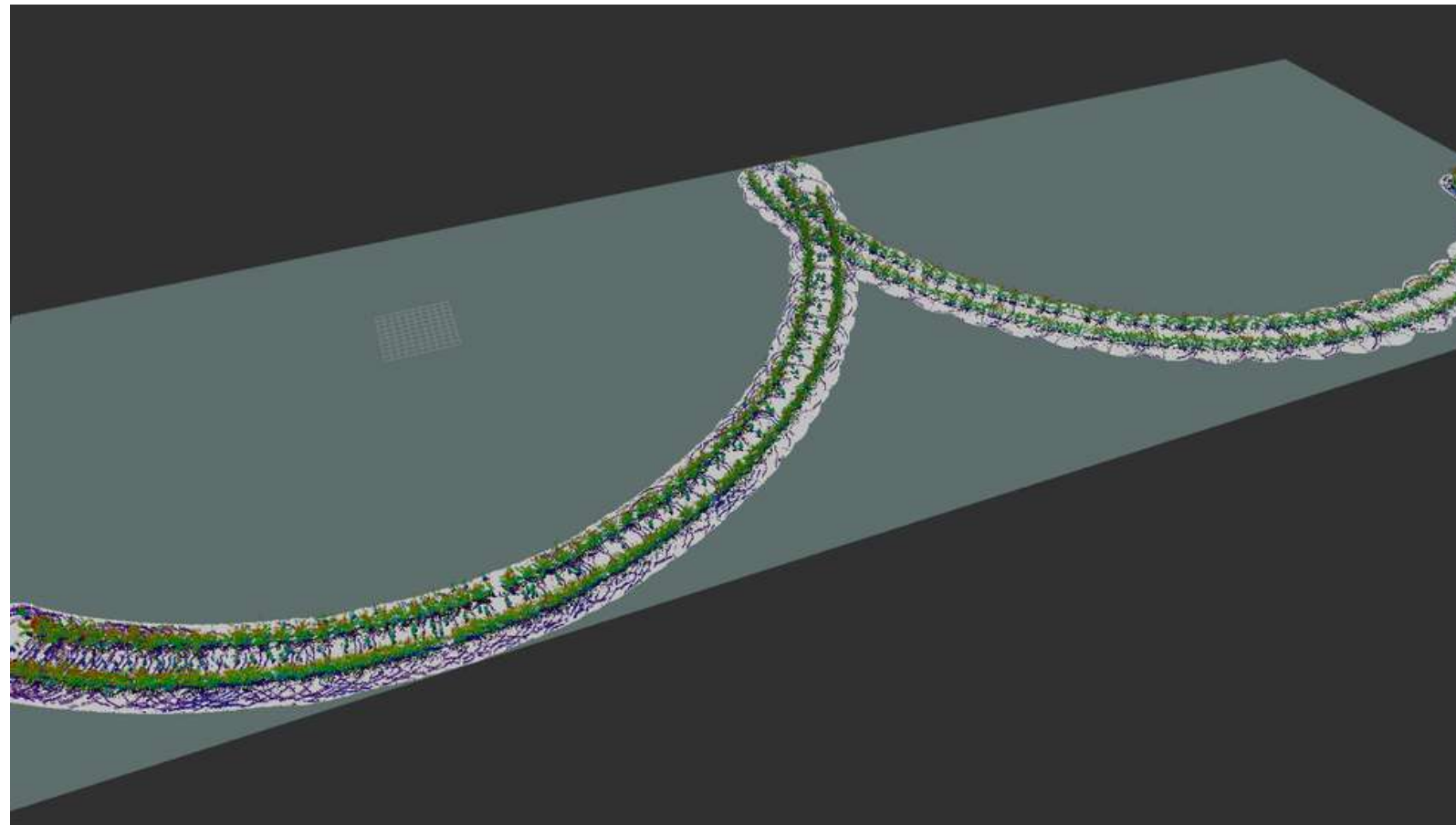


# ALGORITMO DE MAPEO "OCTOMAP"



Fuente: elaboración propia

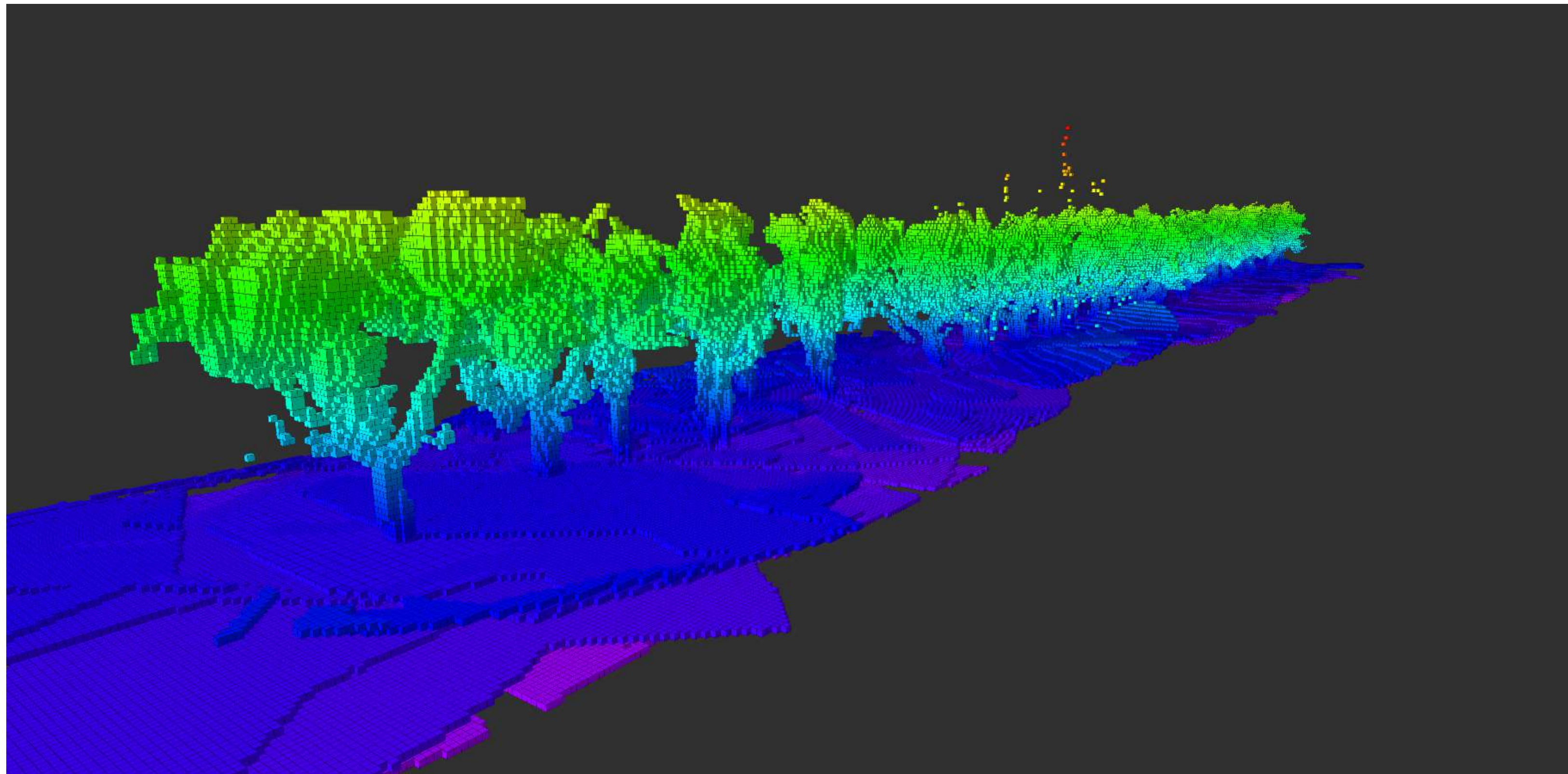
# MAPAS GENERADOS CON ODOMETRIA ERRÓNEA



*Fuente: elaboración propia*



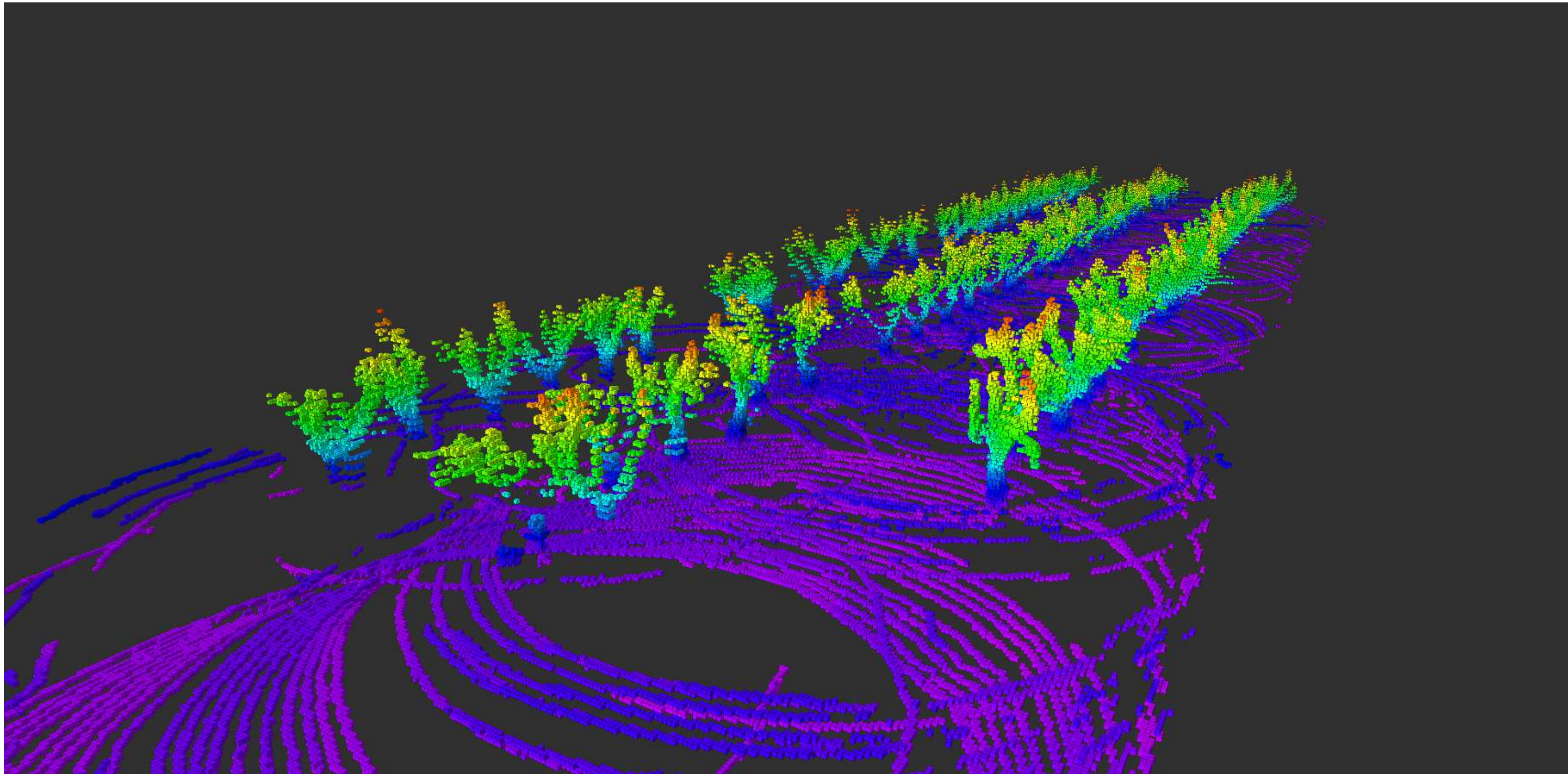
# SIMULACIÓN MAPEO SOBRE UNA HILERA - CÁMARA ESTÉREO



*Fuente: elaboración propia*



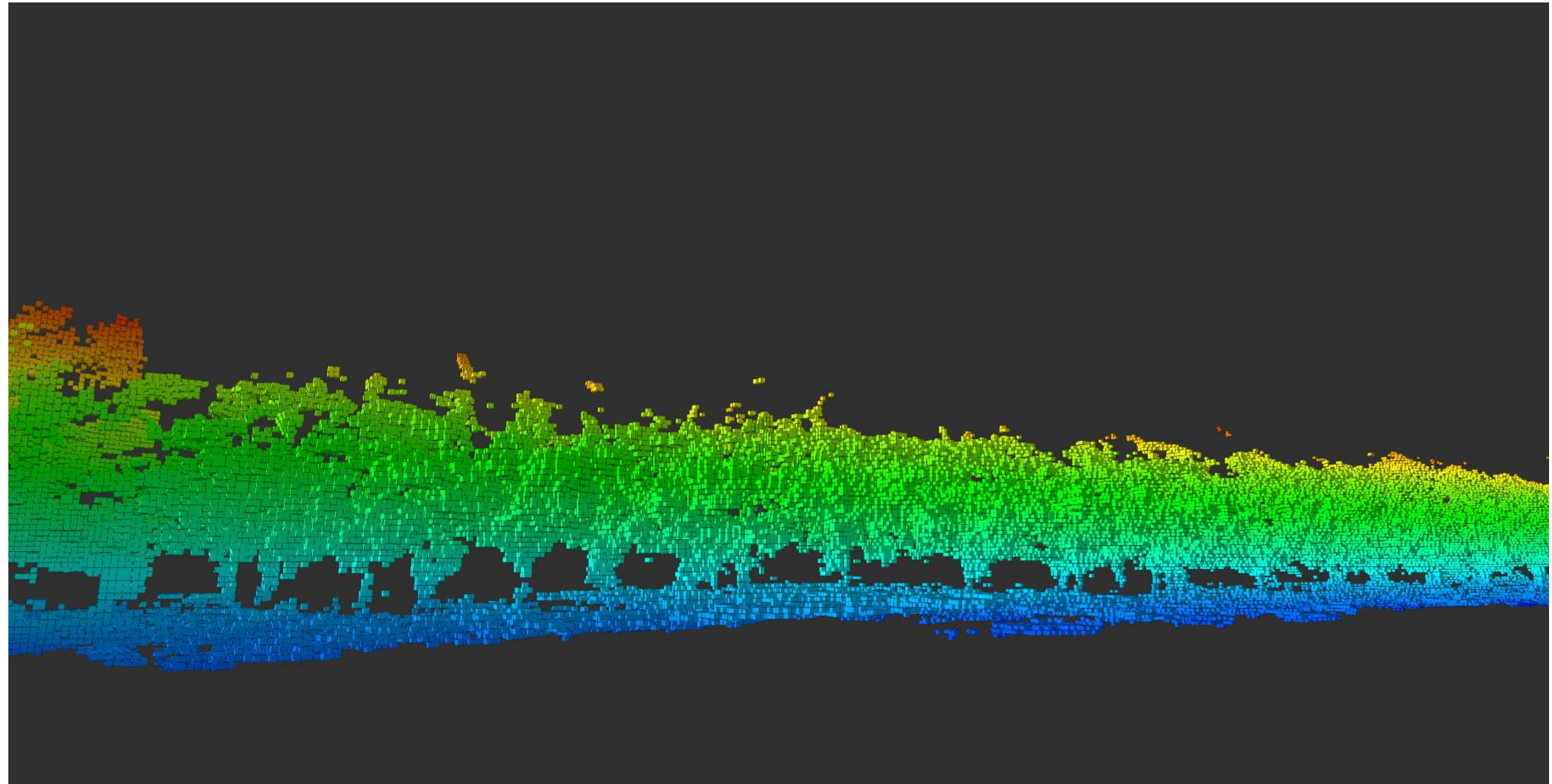
# SIMULACIÓN MAPEO SOBRE UNA HILERA - SENSOR LIDAR



*Fuente: elaboración propia*



**DATOS SALIDA A TERRENO / 24-11-2023**  
**MAPEO SOBRE UNA HILERA - CÁMARA ESTÉREO**

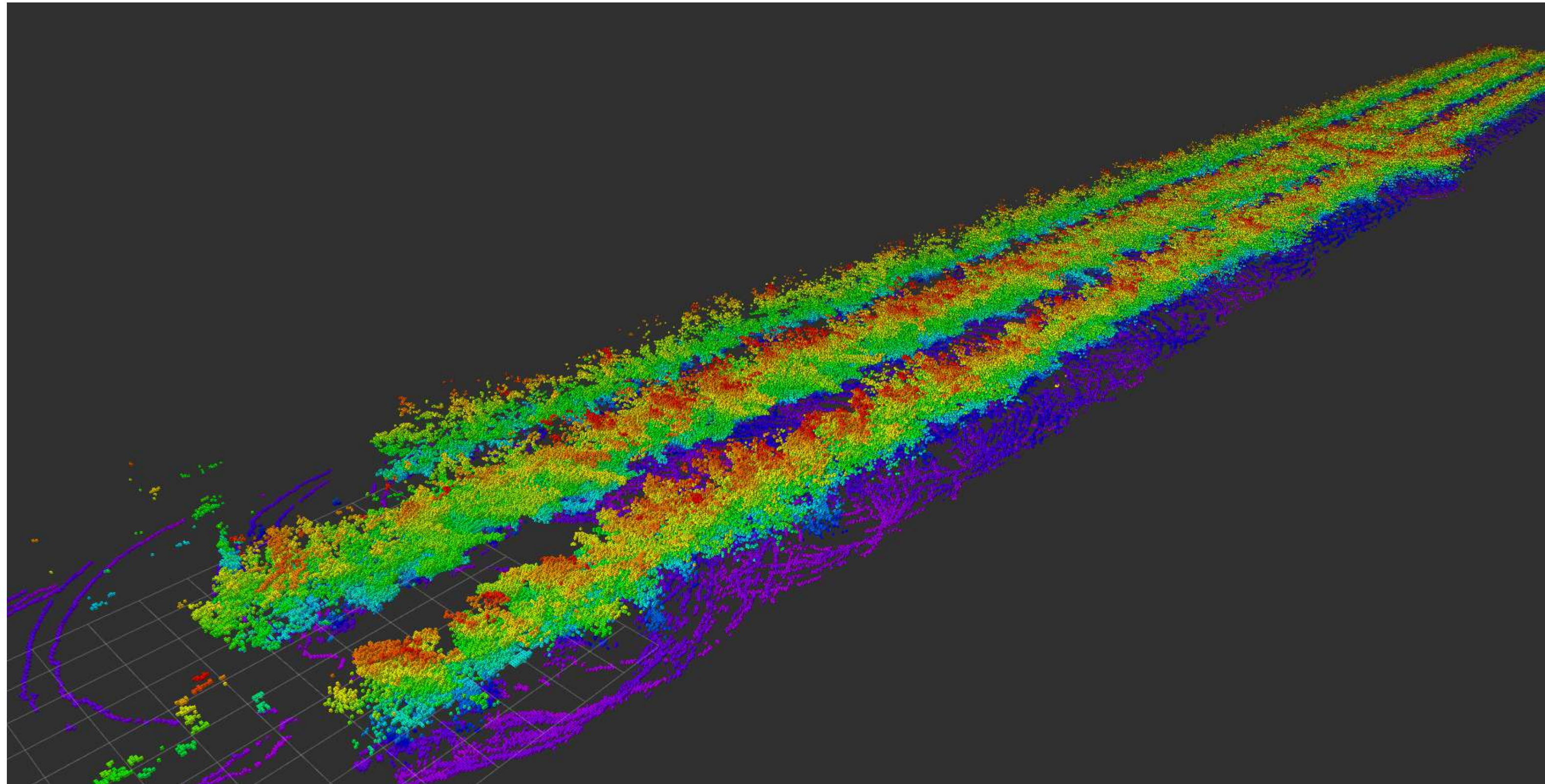


*Fuente: elaboración propia*



# DATOS SALIDA A TERRENO / 24-11-2023

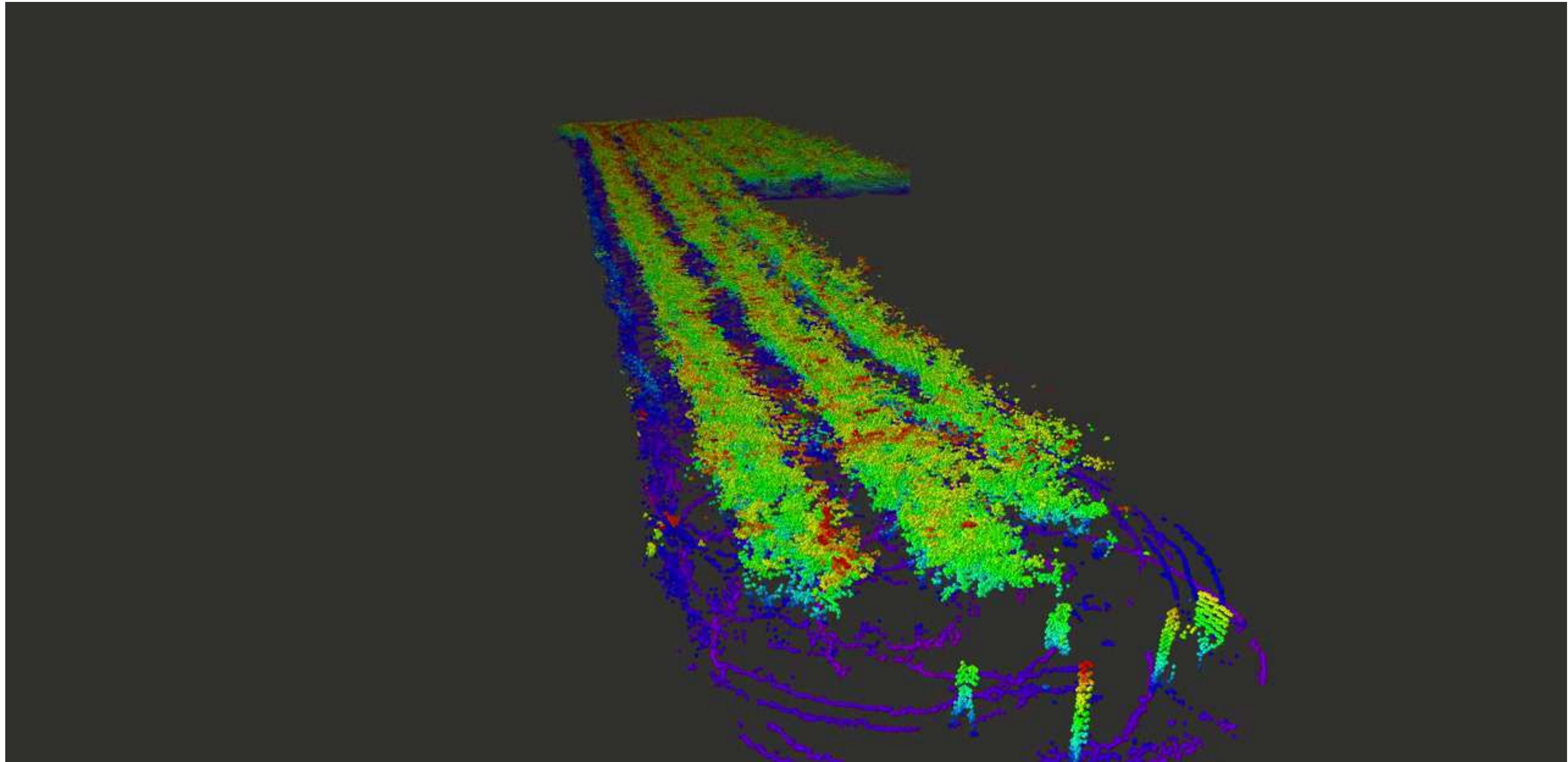
## MAPEO SOBRE UNA HILERA - SENSOR LIDAR



*Fuente: elaboración propia*



# VIDEO DE MAPA GENERADO



*Fuente: elaboración propia*

RANCA GUA, 05-03-2024

PRESENTACIÓN DE TRABAJO DE TÍTULO:

**IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE HERRAMIENTA  
DE MAPEO DE ENTORNOS FRUTÍCOLAS  
MEDIANTE SENSOR LIDAR Y CÁMARA ESTÉREO  
MONTADOS EN PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL  
WARTHOG**

Ignacio Andrés Vásquez Vásquez

Profesor guía: Rodrigo Verschae

Profesor co-guía: Robert Guamán

Comisión evaluadora: Luis Cossio, Alfonso Ehijo, Christopher Flores

