

# Planificación inteligente para búsqueda de personas basada en sensores mediante un robot móvil autónomo

Francisco Rosas-Rebolledo, Antonio Marín-Hernández,  
Sergio Hernández-Méndez, Roberto Cruz-Estrada

Universidad Veracruzana,  
Instituto de Investigaciones en Inteligencia Artificial,  
México

frosasreb@gmail.com,  
{anmarin, sergihernandez, rcruz}@uv.mx

**Resumen.** En tareas de búsqueda y rescate el tiempo es vital para la atención de las víctimas. En un ambiente interior como un edificio público, la atención temprana para la búsqueda de personas puede ser compleja debido a la estructura de los espacios y a la poca información que se puede tener del lugar. En este trabajo se propone utilizar un robot para explorar un espacio interior conocido en busca de personas, basándose en la información actual de la ocupación de los espacios. Conocer la información sobre la ocupación de estos espacios ayudaría a generar una planificación adecuada que priorice buscar en los espacios con mayor cantidad de personas, procurando igualmente hacerlo minimizando la distancia de recorrido. La planificación se generará de acuerdo al lugar donde se encuentre el robot y mediante el algoritmo de la colonia de hormigas. Para la medición de ocupación de los espacios se ha considerado una red heterogénea de sensores, la cual se encuentra en una fase de desarrollo. Esta red permitiría estimar la cantidad de personas en un espacio de manera alternativa a las técnicas de conteo mediante visión por computadora, evitando así una invasión a la privacidad.

**Palabras clave:** Robots de rescate, internet de las cosas, planificación, búsqueda de personas.

## Intelligent Planning for Sensor-Based Person Search Using an Autonomous Mobile Robot

**Abstract.** In search and rescue tasks, time is vital for the victims' attention. In an indoor environment, such as a public building, early attention for the search of people can be complex due to the structure of the spaces and the limited information that can be obtained from the place. In this paper, we propose using a robot to explore a known indoor space in search of people, based on current information of indoor occupancy. Knowing information about space occupancy would help generate adequate planning that prioritizes searching in spaces with a higher number of people, while also minimizing travel distance. The search plan will be generated according to the location of the robot and using the ant

colony optimization algorithm. For measuring indoor occupancy, a heterogeneous sensor network has been considered, which is currently under development. This network would estimate the number of people in a space in an alternative way to counting techniques using computer vision, thus avoiding an invasion of privacy.

**Keywords:** Rescue robots, internet of things, planning, person search.

## 1. Introducción

En el momento de que ocurre algún desastre o una situación de riesgo, la atención temprana es crucial; siendo la prioridad principal la de salvaguardar la integridad de las personas mediante acciones de búsqueda, rescate y atención hospitalaria.

Dentro del contexto de estas tareas de búsqueda y rescate de personas o atención a situaciones de riesgo, los robots son útiles tanto para la atención temprana de alguna eventualidad o emergencia como para las tareas posteriores al imprevisto.

De igual manera, bajo el concepto de las ciudades y edificios inteligentes se puede aprovechar la información que pueden generar un conjunto de dispositivos inteligentes para una mejor toma de decisiones logísticas en situaciones de búsqueda y rescate.

Entendiéndose a los dispositivos inteligentes como aquellas herramientas que están conectadas a internet y tienen la capacidad de recopilar, procesar, transmitir datos y, en algunos casos, tomar decisiones y acciones en función de esos datos.

Este trabajo está enfocado a la generación inteligente de planes de búsqueda de personas para un robot móvil autónomo, esto bajo un esquema similar al problema del agente viajero con ganancias. El plan de búsqueda definirá, de acuerdo a la ubicación del robot, los espacios donde convendría explorar en un ambiente definido y cerrado para encontrar la mayor cantidad de personas con la menor distancia recorrida posible. Esto se hace mediante la información de ocupación del lugar, obtenida mediante la propuesta del uso de módulos de sensores que permitirían contabilizar las personas en el espacio.

Los objetivos de trabajo se sintetizan en dos puntos: el primero va hacia la propuesta de un modelo para generar planificaciones inteligentes basadas en información proveniente de la red heterogénea de sensores para así mejorar el tiempo de respuesta de un robot móvil autónomo en la búsqueda de personas en espacios cerrados; y la segunda está en discutir el planteamiento para la implementación de técnicas no invasivas a la privacidad para contabilizar personas en espacios interiores. Este último punto implica el restringir el uso de técnicas de visión por computadora para dicha estimación.

Para validar la implementación y su utilidad, se ha decidido diseñar escenarios de simulación. Igualmente, se contempla el desarrollo con un robot físico, mostrado en la figura 1, cuyo espacio de trabajo será una de las plantas de nuestra institución. En ambos casos, en esta etapa preliminar del trabajo, se plantean en simulación el nivel de ocupación de los espacios, emulando así la información de los sensores.

El presente artículo consiste de diversas secciones que explican el desarrollo del trabajo. Primero se habla de antecedentes referentes al uso de la robótica en tareas de búsqueda de personas y en el uso de sensores distribuidos para el conteo de personas.



**Fig. 1.** Robot a utilizar en la implementación.

En las siguientes secciones se habla sobre las técnicas a utilizar para generar los planes de búsqueda y sobre el ambiente de pruebas a trabajar. Finalmente, se muestran algunos planes generados junto con ciertas discusiones sobre los resultados y mejoras a futuro.

## 2. Trabajos relacionados

Los robots en tareas de búsqueda y rescate comienzan a tener un nivel de relevancia después de su utilidad en desastres como en 9/11, el huracán Katrina y el terremoto del 2011 en Japón. El manejo de este tipo de robots puede ser remota a través de la teleoperación, permitiendo a los operadores humanos interactuar con entornos peligrosos de manera segura.

Sin embargo, la teleoperación puede ser limitada en situaciones donde la conectividad es limitada o nula, lo que hace que un cierto nivel de autonomía del robot sea importante para mejorar la efectividad y el tiempo de respuesta de las posibles tareas. Para dotar de autonomía a los robots se integran sensores, sistemas de planificación y control, así como técnicas de aprendizaje automático y visión por computadora [12, 11].

Igualmente, tecnologías como el Internet de las Cosas o IoT (por sus siglas en inglés, Internet of Things) pueden apoyar en estas tareas de rescate mediante el uso de redes de sensores distribuidos para conocer el contexto de los espacios. Un caso común es utilizar una red de sensores en los espacios interiores para detectar la presencia de personas o detectar peligros como fuego o gases.

Este tipo de trabajos utilizan la información de los sensores para la coordinación de los equipos de rescate, tanto haciendo un monitoreo del equipo como con actualizaciones sobre la situación del entorno.

Sabiendo del crecimiento del uso de dispositivos remotos conectados a internet, como en la tendencia de las ciudades inteligentes, la información que se puede obtener de los diferentes sensores permitirán conocer mejor el contexto del ambiente a trabajar [10, 3].

Para la búsqueda de personas utilizando robots generalmente se combinan técnicas de exploración junto con métodos para la detección de personas. En [6] se hace referencia a un robot que utiliza la técnica de exploración de frontera y técnicas de visión para identificar a las personas en un mapa que se crean mientras se explora.

Por otro lado, en el trabajo de [2] se genera un mapa con un robot en la que se localizan a las personas y posibles peligros, generando después una ruta para llegar a esas personas, evitando las zonas de riesgo.

La búsqueda de personas puede ser hecha igualmente basada en información previa. Un ejemplo de ello es el trabajo de [9], el cual inicia haciendo una petición de búsqueda de ciertos usuarios, y tomando la probabilidad de que estos usuarios se encuentren en diversas habitaciones, genera un plan de búsqueda basada en el Agente Viajero Selectivo u OP (por sus siglas en inglés, Orienteering Problem).

El trabajo de [5] propuso utilizar igualmente el OP para la búsqueda de personas, utilizando las probabilidades a priori de encontrar a los usuarios en ciertas zonas, con la diferencia de hacer la implementación en un espacio abierto.

Directamente en situaciones de búsqueda y rescate, se han desarrollado soluciones basadas en variantes del problema del agente viajero, como el problema de ruta de vehículos. Estos trabajos van buscando solucionar problemas como el definir los mejores lugares para albergues, distribución de bienes en ciertos centros y atención de emergencias [1].

Dentro del tema referente al conteo de personas en un espacio cerrado, comúnmente se toman técnicas de conteo basadas en visión por computadora o en la localización de dispositivos individuales debido a que son las que generan mayor precisión. El problema de utilizar estos métodos está relacionado con la posible invasión a la privacidad que se puede tener.

La utilización de elementos como cámaras en espacios cerrados; si bien puede justificarse en ciertos casos, puede generar algunos conflictos, que van desde cuestiones de incomodidad por parte de las personas, hasta generar problemas legales por la autorización de las personas de ser grabadas u observadas. Es por eso que existen estudios referentes a técnicas alternas para el conteo de personas [7].

Entre las técnicas que se encuentran podemos encontrar aplicaciones que contabilizan el paso de personas en un punto. Ya sea en la puerta de una habitación o un pasillo. Esta solución puede definir si una persona entra o sale utilizando sensores en dos puntos estratégicos, y dependiendo de que punto pase primero la persona se defina la entrada o salida [15].

Los sensores que generalmente son utilizados son los pasivos infrarrojos o PIR, sensores infrarrojos, ultrasónicos y sensores de tiempo de vuelo.

Como punto de atención, estos métodos tienen la dificultad de definir si la detección fue provista por un humano o algún otro objeto [7].

Otra manera de definir la cantidad de personas es mediante la medición de cambios en el ambiente y generación de inferencias basadas en esas mediciones. Las variables que pueden medirse pueden ser referentes a la humedad relativa, presión atmosférica, temperatura, medición de algunos gases como  $CO_2$ , entre otros [14].

Otra manera es utilizar sensores PIR análogos que permita no solo medir la presencia de personas sino la posible cantidad de las mismas [8]. En ambos casos, se etiquetaron de antemano los datos y se utilizaron técnicas de Aprendizaje Máquina para generar la inferencia. Estas técnicas pueden estar limitadas a cambios muy repentinos de aforo o a errores de medición en aforos muy grandes, además de ser sensibles a posibles ruidos de las condiciones del ambiente [7].

### **3. Propuesta conceptual**

Para la implementación se deben definir dos elementos relevantes: el plan de búsqueda y los módulos para el conteo de personas. El plan de búsqueda debe dar prioridad de búsqueda a lugares con mayor cantidad de personas, tomando en cuenta la distancia con respecto a la ubicación del robot.

Los módulos contadores de personas deben generar un estimado de la presencia y cantidad de personas en los espacios, esto tomando en cuenta sus distintos diseños y tamaños de los espacios.

#### **3.1. Problema del agente viajero**

El problema del agente viajero es, en síntesis, es un problema de optimización combinatoria en el que se busca encontrar el camino más corto que visita un conjunto de ciudades dadas y regresa a la ciudad de origen.

Comúnmente se agregan ciertas restricciones o se agregan ganancias a las ciudades para adaptar el problema a diversas situaciones reales. Para su aplicación generalmente se diseña un grafo, cuyos nodos representan las ciudades a visitar y las aristas representan un camino entre un nodo y otro.

En esta implementación cada nodo representa un espacio de interés y tiene asociada una ganancia, la cual hace referencia a la probable cantidad de personas que hay en ese espacio. Las aristas tienen asociado un costo que representa la distancia que hay entre esos espacios. Esta distancia está dada por el recorrido que un robot podría hacer para llegar de un espacio al otro.

Este problema es considerado NP-duro, por ende no existe una solución algorítmica eficiente para resolverlo en todos los casos, por lo que se utilizan diversas técnicas para encontrar soluciones aproximadas.

Mientras que los algoritmos con enfoque heurístico busca generar una solución aceptable en menor tiempo. En la mayoría de los casos se asume que las ganancias de los nodos son fijas, aunque se han hecho alternativas con pesos dinámicos [13].

El algoritmo de optimización por colonia de hormigas o ACO (por sus siglas en inglés, Ant Colony Optimization) es escogido para la generación del plan de búsqueda

debido a su facilidad de implementación, facilidad de modificación para agregar restricciones, facilidad para lidiar con diversos escenarios, y su costo bajo de recursos computacionales con respecto a otras soluciones. Debido a su enfoque heurístico, con ACO se puede tener menor precisión para encontrar una ruta óptima, pero permite obtener soluciones funcionales.

ACO utiliza una colonia de hormigas artificiales que se mueven dentro del grafo. Cada hormiga sigue una heurística y deja feromonas en su camino, lo que permite a otras hormigas decidir su siguiente movimiento.

En el problema del agente viajero con ganancias se busca minimizar la distancia a recorrer maximizando la ganancia. Por lo tanto, cada hormiga realiza un recorrido de acuerdo con una función de probabilidad que considera tanto la distancia como la ganancia. La feromona depositada por cada hormiga se actualiza en función del beneficio obtenido en cada ciudad visitada.

Al final de cada iteración, las feromonas son actualizadas para reflejar el mejor camino encontrado hasta ese momento. El proceso se repite hasta que se alcanza el límite de iteraciones [4]. Los parámetros principales para modular el comportamiento del algoritmo son:

- **Número de hormigas:** La cantidad de hormigas a utilizar. Cada hormiga construirá una posible solución.
- $\alpha$ : El nivel de importancia del rastro de la feromona cuando la hormiga escoja el siguiente nodo a visitar.
- $\beta$ : El nivel de importancia de la heurística (en este caso, la ganancia de cada nodo) cuando la hormiga escoja el siguiente nodo a visitar.
- $\rho$ : La velocidad a la que se evapora la feromona entre iteraciones.
- **Número de iteraciones:** El número de iteraciones en las que se ejecutará el algoritmo.

### 3.2. Conteo de personas

Los módulos de conteo de personas para espacios cerrados son de utilidad en muchas situaciones que van desde apoyo en el uso eficiente de energía de edificios (como con el control de los sistemas de aire acondicionado), estudios de mercado en plazas comerciales, salud (COVID-19), seguridad y logística en situaciones de emergencia.

Ciertas líneas de trabajo procuran utilizar sensores que logren una buena precisión en la estimación y permitan el respeto a la privacidad. Estas estimaciones pueden ser refinadas mediante técnicas de aprendizaje automático y fusión de sensores.

Una primera propuesta de módulo consiste en utilizar sensores PIR para detectar la presencia de personas y se utiliza un algoritmo de conteo distribuido para estimar la cantidad total de personas en el área [15]. Este trabajo presentó tanto los resultados de simulación como datos en ambientes reales, pudiendo proporcionar una estimación con una precisión del 97 % en promedio.

La segunda propuesta presenta un enfoque para estimar los niveles de ocupación en espacios cerrados mediante variables ambientales [14].

Trabajando en escenarios reales como un gimnasio y una sala de estar, se midieron variables como la temperatura, la humedad y el CO<sub>2</sub>.

A partir de estos datos, desarrollan modelos de aprendizaje automático para generar una inferencia. Se utilizaron dos algoritmos de aprendizaje automático: Regresión Lineal Múltiple y Máquinas de Soporte Vectorial para estimar los niveles de ocupación.

La tercera propuesta es utilizar un PIR análogo para un espacio cerrado. A diferencia de un PIR digital en la que la respuesta del sensor es si hay presencia o no, el PIR análogo puede tener variaciones de acuerdo a la cantidad de personas dentro de su rango de detección.

Para implementarlo se utiliza un modelo de Markov oculto infinito para segmentar y filtrar los datos del sensor PIR, y luego se utiliza un modelo de regresión para predecir la ocupación. El procesamiento y predicción se hace internamente en un microcontrolador [8].

## **4. Implementación**

Para los experimentos se contemplan diversos escenarios simulados y una implementación real dentro del edificio de la universidad. Utilizando el caso de búsqueda de personas en situaciones de riesgo, este proyecto asume algunos puntos importantes sobre el ambiente a trabajar:

- Se asume que el suelo en el que el robot navegará es plano y firme.
- Existe un mapa previo definido del ambiente a trabajar.
- Cada habitación está representada como un nodo de un grafo.

Para alistar la utilización de los mapas de simulación y el ambiente real, se deben definir cuántos y cómo los nodos van a representar los espacios de interés. En la mayoría de los casos una habitación representará un nodo, aunque habrán casos, debido a su complejidad o que la representación de una parte del espacio pueda promover una posible invasión a la privacidad, varios espacios estarán conjuntados con un nodo.

### **4.1. Plan de búsqueda**

El plan de búsqueda será hecho basado en el algoritmo Ant Colony Optimization. El código es hecho en Python para la toma de decisiones. Se tienen definidas las distancias entre los nodos. Se tiene de igual manera una lista con las ganancias asociadas a cada nodo, siendo estas la representación de la cantidad de personas que se estiman dentro de la habitación.

El algoritmo tendrá como entrada el nodo de donde debería comenzar el plan de búsqueda, la matriz de las distancias entre nodos, la lista con la cantidad de personas en cada nodo y los parámetros de ACO. La salida representa una lista en la que se ordena el orden de visita de las habitaciones sugerida para el robot.

Se tiene como entrada del algoritmo el nodo inicial debido a que se busca simular diversos escenarios en donde se deba planificar una búsqueda basada en la ubicación actual del robot, dándole así un cierto dinamismo.

#### **4.2. Robot móvil autónomo**

Se utiliza un robot con una plataforma móvil diferencial, el cual tendrá como objetivo llegar a los nodos definidos por el plan de búsqueda. El robot tiene bumpers, sensores ultrasónicos, laser, cámara RGB y una unidad de procesamiento Intel NUC.

Aunque el contexto sea sobre búsqueda en situaciones de riesgo, no se contempló hacer adaptaciones mecánicas al robot para que navegue en terrenos sinuosos o rugosos, así como tampoco algún sistema de control que apoye para este tipo de navegación. Igualmente, la interacción con las personas estará limitada a evitar colisiones con las personas.

Se utiliza Gazebo, el cual es un simulador de robótica 3D de código abierto que permite simular el comportamiento de robots y ambientes en tiempo real. Trabaja con ROS (por sus siglas en inglés, Robot Operating System) y se utiliza para probar implementaciones con robots en un entorno seguro y controlado.

Se plantean en Gazebo tanto los escenarios de simulación como una evaluación del comportamiento en el entorno real definido. Se utiliza ROS para trabajar lo referente a las paqueterías de navegación autónoma del robot. Se enviarán una serie de objetivos de navegación del robot de acuerdo al plan de búsqueda.

Todos los posibles objetivos están referenciados como un punto definido en el mapa, al cual se le enviará al robot como una meta en el orden que el plan de búsqueda lo tenga.

#### **4.3. Construcción de los módulos**

Los módulos que se encuentran en desarrollo para el conteo de personas se compondrán de estos elementos básicos:

- Módulo WiFi ESP32.
- Batería de litio con cargador USB para la batería.
- Regulador de voltaje.
- Sensores.

Para el módulo que trabaja con los sensores PIR digitales, se necesitan un par de sensores HC-SR501. El segundo módulo trabaja con el sensor BME280. El PIR análogo a utilizar en la tercera propuesta es el AMN21112.

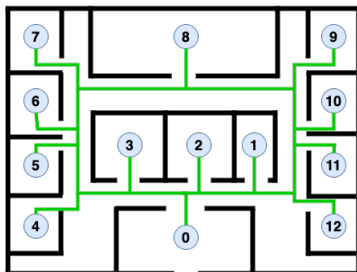
#### **4.4. Entorno de pruebas**

Se contempla una serie de simulaciones mediante 3 mapas con diseños distintos entre sí para validar la utilidad que puede dar el plan de búsqueda. Se definen para cada mapa las zonas de interés y la distancia que puede haber entre los puntos, para así construir un grafo representativo de cada ambiente.

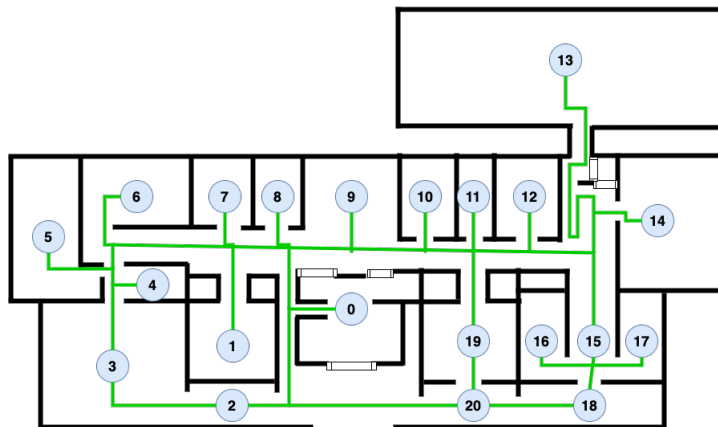
Se generaron representaciones de todos los escenarios a trabajar en Gazebo para la simulación. Para cada mapa se define el camino por el cual un robot pueda navegar para llegar a los nodos.

El desarrollo para el ambiente real es hecho en uno de los pisos de nuestro instituto. Para esto se definieron las zonas en las que el robot podría moverse, omitiendo así lugares como escaleras, por ejemplo.

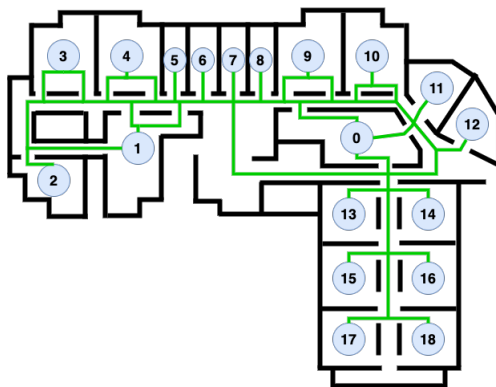




(a)

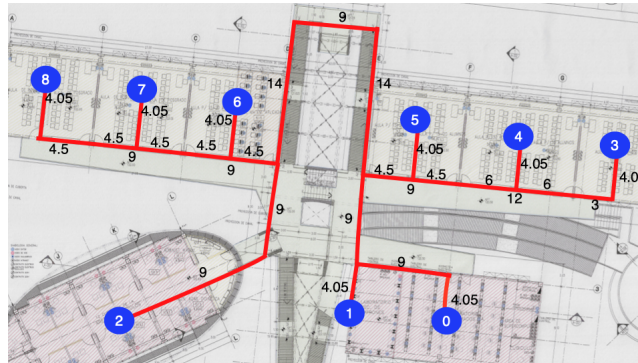


(b)



(c)

Fig. 2. Mapas de entorno de simulación.



**Fig. 3.** Representación del ambiente real.

En los mapas se puede notar esta referencia, tanto en la figura 2 para los ambientes de simulación, como en 3 para el entorno real. Los mapas tienen dibujadas líneas que conectan a los nodos, estas líneas fueron usadas como referencia para estimar la posible distancia entre los nodos.

En la definición de los espacios de interés se contemplaron los salones individualmente; mientras que espacios más grandes como el centro de cómputo o la zona de cubículos se toman como uno solo, para así reducir la complejidad del análisis. En el caso de la zona de cubículos, teniendo énfasis que uno de los objetivos del proyecto es el respeto a la privacidad, agrupar toda la zona como un solo punto de interés ayuda a preservar la privacidad de los profesores en sus espacios de trabajo.

## 5. Resultados

En el ambiente de simulación, la estimación de cantidad de personas en los espacios de interés serán números arbitrarios que nos permitan visualizar la utilidad de la implementación. Mientras que en el ambiente real se busca poner a prueba el trabajo de la toma de decisiones con información real de por medio, simulando que los sensores están en funcionamiento.

Para la experimentación se tendrá como base iniciar el recorrido en el nodo 0, y se decidirá generar otro plan de búsqueda definiendo un nodo inicial distinto, dando a entender que el robot se encuentra en ese momento cerca de ese nodo en el momento de la planificación. Con esto se busca mostrar los diferentes cambios de prioridades del plan de búsqueda de acuerdo a su ubicación.

Para cada mapa se muestra una tabla, la cual se compone de dos secciones: lista de ganancias y ruta de nodos. En la sección lista de ganancias se muestra una lista que hace alusión a las ganancias de cada nodo, simulando que esta sea la cantidad de personas que hay en la habitación.

Esta lista está ordenada representando la ocupación desde el nodo 0. Por otro lado, en la sección “Ruta de nodos” se muestra una lista que da el orden de visita de los nodos sugerido por el algoritmo. La numeración a la que se hace referencia en la ruta de nodos está dada por la representación del espacio a visitar.

**Tabla 1.** Simulación en mapa 2a.

Lista de ganancias	Ruta de nodos
[11 3 14 11 6 6 5 4 8 5 7 8 9]	0, 2, 3, 12, 11, 10, 9, 8, 5, 4, 6, 7, 1
[11 3 14 11 6 6 5 4 8 5 7 8 9]	10, 2, 0, 3, 12, 11, 8, 5, 4, 6, 7, 9, 1
[3 9 5 4 3 14 6 5 8 12 2 5 4]	0, 5, 7, 9, 1, 8, 6, 3, 2, 11, 12, 4, 10
[3 9 5 4 3 14 6 5 8 12 2 5 4]	6, 5, 9, 11, 1, 12, 8, 7, 2, 3, 0, 10, 4
[3 9 5 4 3 14 6 5 8 12 2 5 4]	1, 9, 8, 5, 6, 7, 2, 11, 12, 3, 0, 4, 10

**Tabla 2.** Simulación en mapa 2b.

Lista de ganancias	Ruta de nodos
[1 9 0 9 2 8 9 8 4 5 1 4 4 2 5 4 14 2 6 4 2]	0, 16, 18, 14, 5, 3, 8, 1, 7, 6, 9, 11, 19, 12, 15, 17, 20, 4, 13, 10, 2
[1 9 0 9 2 8 9 8 4 5 1 4 4 2 5 4 14 2 6 4 2]	11, 16, 14, 1, 7, 6, 3, 9, 5, 4, 18, 15, 12, 19, 10, 8, 20, 0, 17, 13, 2
[1 14 6 11 13 9 11 10 7 10 13 12 13 14 2 14 9 11 12 11 9]	0, 1, 4, 3, 6, 5, 10, 11, 20, 15, 12, 9, 19, 18, 17, 13, 16, 7, 8, 2, 14
[1 14 6 11 13 9 11 10 7 10 13 12 13 14 2 14 9 11 12 11 9]	16, 15, 17, 19, 11, 10, 20, 18, 12, 13, 1, 5, 4, 3, 6, 7, 9, 8, 2, 14, 0
[1 14 6 11 13 9 11 10 7 10 13 12 13 14 2 14 9 11 12 11 9]	2, 3, 4, 1, 7, 10, 11, 12, 15, 18, 17, 13, 19, 20, 16, 9, 5, 8, 6, 14, 0

Para las simulaciones se tienen las siguientes configuraciones:

- Número de hormigas: Igual a la cantidad de nodos de cada mapa.
- Número total de iteraciones: 1000
- $\alpha$ : 2
- $\beta$ : 3
- $\rho$ : 0.7

Estos parámetros de ACO han dado, de acuerdo a diversas pruebas, un balance entre dar prioridad a los lugares con más cantidad de personas y buscar rutas más cortas para explorar todos los espacios. Los parámetros tanto en los entornos de simulación como en el escenario real se mantienen iguales.

En la figura 4 se pueden apreciar algunos ejemplos de las simulaciones hechas en Gazebo, en la que se tiene el modelo del robot recorriendo los objetivos. La figura 4a tiene como mapa una representación del ambiente real, mientras que la figura 4b es una representación del mapa 2b.

### 5.1. Simulaciones

La tabla 1 da referencia al mapa de la figura 2a, la tabla 2 al mapa de la figura 2b y la tabla 3 al mapa de la figura 2c. Como se puede notar, la ruta propuesta da prioridad a ir a los nodos con mayor ganancia, aun si el recorrido pueda no ser óptimo.

Los parámetros definidos para el ACO tienen un balance prioritario para buscar los nodos con mayor ganancia, pero sin dejar atrás el factor de la distancia.

**Tabla 3.** Simulación en mapa 2c.

Lista de ganancias	Ruta de nodos
[11 13 10 7 11 14 13 0 0 12 3 6 14 9 8 8 11 11 1]	0, 9, 5, 6, 1, 4, 12, 14, 16, 17, 13, 15, 2, 3, 11, 10, 18, 7, 8
[11 13 10 7 11 14 13 0 0 12 3 6 14 9 8 8 11 11 1]	7, 1, 5, 6, 16, 14, 12, 17, 0, 9, 4, 2, 3, 13, 15, 11, 10, 18, 8
[4 1 0 4 11 9 13 6 13 13 4 10 8 5 14 10 6 5 1]	0, 14, 8, 9, 6, 4, 7, 5, 11, 12, 15, 16, 13, 17, 10, 3, 1, 18, 2
[4 1 0 4 11 9 13 6 13 13 4 10 8 5 14 10 6 5 1]	5, 6, 8, 9, 14, 15, 11, 12, 4, 7, 16, 13, 0, 17, 10, 3, 1, 18, 2
[4 1 0 4 11 9 13 6 13 13 4 10 8 5 14 10 6 5 1]	13, 14, 9, 8, 6, 4, 5, 11, 12, 15, 16, 17, 7, 0, 10, 3, 1, 18, 2

**Tabla 4.** Resultados del ambiente real.

Lista de ganancias	Ruta de nodos
[0 7 10 1 1 3 6 1 10]	0, 1, 2, 8, 6, 5, 4, 3, 7
[10 8 1 11 12 6 13 2 13]	0, 4, 3, 6, 8, 1, 5, 7, 2
[10 8 1 11 12 6 13 2 13]	5, 4, 3, 6, 8, 0, 1, 7, 2
[5 13 9 5 11 4 1 14 5]	0, 1, 7, 4, 3, 2, 8, 6, 5
[5 13 9 5 11 4 1 14 5]	2, 7, 1, 4, 3, 5, 0, 8, 6
[5 13 9 5 11 4 1 14 5]	3, 4, 0, 1, 7, 2, 6, 8, 5

Es por eso que, generalmente, si el nodo con la mayor ganancia está relativamente cerca, el algoritmo buscará ir a ese nodo desde el principio.

Sin embargo, como se puede observar en la tabla 3 con el caso 4, después del nodo inicial 5 el algoritmo procura buscar en nodos más cercanos con una buena cantidad de ganancias en lugar de buscar en el nodo 14, el cual es el que tiene la mayor ganancia. Este mismo fenómeno se presentan en distintos casos mostrados.

Aun con la observación previa, en todos los casos existe un cierto nivel de coincidencia entre los primeros nodos que el algoritmo toma como prioritarios y los nodos que se dejan hasta el final del plan. Es más notoria esta coincidencia con los nodos que están al fondo de la lista.

## 5.2. Ambiente real

Para tener el entorno listo se genera una lista con la descripción de la cantidad de personas que hay en cada nodo, haciendo la simulación del funcionamiento de la red de sensores.

Con la lista hecha se genera el plan de búsqueda y se estará mandando los puntos objetivo al robot para que visite los espacios, simulando así una búsqueda. La tabla 4 muestra los planes de búsqueda referentes al ambiente real, representado en la figura 3.

Tanto en los entornos de simulación como en el ambiente real se observan fenómenos similares en los planes de búsqueda. Independientemente del diseño

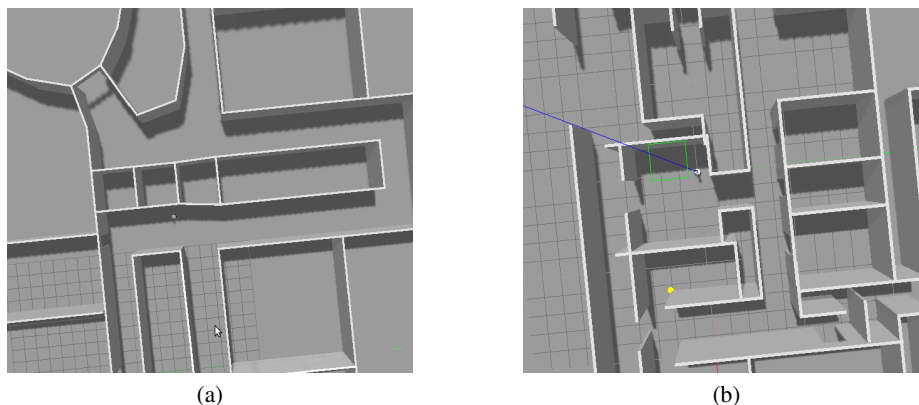


Fig. 4. Simulaciones en Gazebo.

distintivo de cada espacio, se logra ver que el plan de búsqueda prioriza los espacios con mayor cantidad de personas.

## 6. Conclusiones y trabajos futuros

La implementación del algoritmo ACO para resolver el problema del agente viajero con ganancias resulta útil para generar una planificación de rutas inteligente, en la que se priorice buscar en los espacios donde haya la mayor cantidad de personas procurando una distancia de recorrido baja.

Tener una red heterogénea de sensores mediante técnicas alternativas a la visión por computadora podría permitir que la implementación se adapte a los diferentes tipos de espacios y lidiar con sus complejidades, además de evitar invadir la privacidad de las personas. Este desarrollo puede ser ideal para el manejo de situaciones de atención temprana de una crisis, o para complementar la tarea de rescatistas mediante la información del entorno.

Como trabajo futuro se plantean diversas mejoras. Una de ellas es referente a evaluar nuevos métodos de conteo de personas y hacer una combinación de las mismas para mejorar la precisión.

Otro punto de mejora es referente a una replanificación reactiva de acuerdo a las mediciones de los sensores y las condiciones que se tengan, para así actuar con mayor inmediatez a escenarios reales. Igualmente, será relevante tomar en consideración diferentes características de los espacios para ayudar a determinar su prioridad en la búsqueda. Con respecto al robot, se propone agregar técnicas de exploración e interacción con personas para su atención y auxilio en las situaciones de crisis.

## Referencias

1. Baxter, A. E., Wilborn Lagerman, H. E., Keskinocak, P.: Quantitative modeling in disaster management: A literature review. *IBM Journal of Research and Development*, vol. 64, no. 1/2, pp. 3:1–3:13 (2020) doi: 10.1147/JRD.2019.2960356

2. Bock, A., Kleiner, A., Lundberg, J., Ropinski, T.: An interactive visualization system for urban search and rescue mission planning. In: IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp. 1–7 (2014) doi: 10.1109/SSRR.2014.7017652
3. Dimou, A., Kogias, D. G., Trakadas, P., Perossini, F., Weller, M., Balet, O., Patrikakis, C. Z., Zahariadis, T., Daras, P.: FASTER: First responder advanced technologies for safe and efficient emergency response. *Technology Development for Security Practitioners*, pp. 447–460 (2021) doi: 10.1007/978-3-030-69460-9\\_26
4. Dorigo, M., Birattari, M., Stutzle, T.: Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 28–39 (2006) doi: 10.1109/MCI.2006.329691
5. Guitouni, A., Masri, H.: An orienteering model for the search and rescue problem. *Computational Management Science*, vol. 11, no. 4, pp. 459–473 (2014) doi: 10.1007/s10287-013-0179-1
6. Kohlbrecher, S., Meyer, J., Graber, T., Petersen, K., Klingauf, U., von Stryk, O.: Hector open source modules for autonomous mapping and navigation with rescue robots. In: *RoboCup 2013: Robot World Cup XVII*. vol. 8371, pp. 624–631 (2014) doi: 10.1007/978-3-662-44468-9\\_58
7. Kouyoumdjieva, S. T., Danielis, P., Karlsson, G.: Survey of non-image-based approaches for counting people. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 1305–1336 (2020) doi: 10.1109/COMST.2019.2902824
8. Leech, C., Raykov, Y. P., Ozer, E., Merrett, G. V.: Real-time room occupancy estimation with Bayesian machine learning using a single PIR sensor and microcontroller. In: *2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp. 1–6 (2017) doi: 10.1109/SAS.2017.7894091
9. Mohamed, S. C., Rajaratnam, S., Hong, S. T., Nejat, G.: Person finding: An autonomous robot search method for finding multiple dynamic users in human-centered environments. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 433–449 (2020) doi: 10.1109/TASE.2019.2928774
10. O’Flynn, B., Brahmi, I., Oudenhoven, J., Nackaerts, A., Pereira, E., Agrawal, P., Fuchs, T., Braun, T., Lang, K. D., Dils, C., Walsh, M.: First responders occupancy, activity and vital signs monitoring - SAFESENS. *International Journal on Advances in Networks and Services*, vol. 11, no. 1-2, pp. 22–32 (2018)
11. Russell, S., Norvig, P.: *Artificial intelligence, a modern approach*. Pearson Education (2021)
12. Siciliano, B., Khatib, O.: *Springer handbook of robotics*. Springer (2008)
13. Vansteenwegen, P., Gunawan, A.: *Orienteering problems: Models and algorithms for vehicle routing problems with profits*. Springer (2019)
14. Vela, A., Alvarado-Uribe, J., Davila, M., Hernandez-Gress, N., Ceballos, H. G.: Estimating occupancy levels in enclosed spaces using environmental variables: A fitness gym and living room as evaluation scenarios. *Sensors*, vol. 20 (2020) doi: 10.3390/s20226579
15. Wahl, F., Milenkovic, M., Amft, O.: A distributed PIR-based approach for estimating people count in office environments. In: *2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering*, pp. 640–647 (2012) doi: 10.1109/ICCSE.2012.92