

# Localizando elementos de interés mediante vehículos operados remotamente para la explotación sostenible de granjas acuícolas.

F. Gómez-Bravo<sup>1</sup>, A. Garrocho-Cruz<sup>1</sup>, J. C. Gutiérrez-Estrada<sup>2</sup>, I. Pulido-Calvo<sup>2</sup>,  
J. Castro-Gutiérrez<sup>2</sup>, A. Peregrín-Rubio<sup>3</sup>, S. López-Domínguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva

<sup>3</sup>Departamento de Tecnologías de la Información, Universidad de Huelva

## Resumen

*Este artículo describe una propuesta para modificar la arquitectura de control de un Vehículo Operado Remotamente (ROV) destinado a la toma de datos e inspección de granjas acuícolas. La propuesta se basa en incluir un nuevo módulo de Localización, encargado de posicionar distintos tipos de elementos que se encuentren alrededor del ROV y puedan ser de interés para la explotación de la instalación. El proceso de localización se basa en el uso de un sensor de ultrasonido en conjunción con un sistema de localización del ROV, cuya combinación posibilita el posicionamiento local y global de los elementos de interés. El artículo describe el método de localización desarrollado y presenta resultados experimentales que validan la propuesta.*

**Palabras clave:** Acuicultura sostenible, Vehículos Operados a Distancia, Arquitectura GNC, Sistemas de Localización Submarina.

## 1 Introducción

De acuerdo con el plan propuesto por la Unión Europea "Blue Growth Plan" [5], la explotación de los recursos pesqueros, basada en una acuicultura inteligente, sostenible y con una producción inclusiva, jugará un papel fundamental en el futuro y constituirá un recurso relevante de alimentos para la población europea. Por tanto, es fundamental utilizar diferentes soluciones tecnológicas que apoyen la explotación sostenible de las granjas acuícolas y garantizar su viabilidad [1].

Durante los últimos años, la modernización de la acuicultura se ha implementado particularmente en la estimación de la biomasa, del crecimiento de la misma [7] y de los parámetros físico-químicos que caracterizan el ecosistema [3]. Sin embargo, aún quedan mejoras por desarrollar. Entre las tecnologías emergentes más prometedoras a aplicar cabe destacar el uso de Vehículos Subacuáticos Autónomos (AUV) y Vehículos Submarinos Operados Remotamente (ROV), gracias a su capacidad para obtener información utilizando técnicas

no destructivas y mínimamente intrusivas [6].

La utilidad de estos vehículos en tareas de mantenimiento y explotación de instalaciones acuícolas es múltiple. Entre sus diferentes aplicaciones cabe destacar la localización de elementos de interés, es decir: peces, cardúmenes (concentraciones grandes de peces) u otro tipo de objetos, de naturaleza variada, cuya presencia en el estanque de la granja pueda condicionar su explotación y cuya localización y visita resulten de interés para la adecuada gestión de la misma.

Cuando se trata de explotar granjas en entornos naturales o al aire libre, es normal que el agua presente un alto grado de turbidez, lo que perjudica la visión submarina e impide, por tanto, que las cámaras, que tradicionalmente portan los ROVs, generen información útil. Por este motivo, la detección de elementos de interés en estas circunstancias requiere el uso de sensores de proximidad, tales como sonares, que proporcionen al operador información sobre el entorno que rodea al ROV.

En particular, este trabajo tiene como objetivo proponer una nueva metodología para identificar y localizar distintos tipos de elementos dentro de estanques donde puede operar un ROV destinado a apoyar las labores de explotación de una estación piscícola, utilizando para ello información proporcionada por un sensor de ultrasonido.

Esta investigación se ha realizado en el marco del Proyecto KTTSeaDrones, financiado por la Unión Europea a través del Programa Interreg V-A España-Portugal, (POCTEP), y liderado por la Universidad de Huelva.

El artículo se estructura de la siguiente forma. Tras la introducción, la sección 2 presenta la modificación propuesta en la arquitectura de control para incorporar en las tareas de operación la información computada. Posteriormente, la sección 3 está dedicada a describir las características del sensor utilizado para localizar elementos. En la sección 4 se detalla la metodología de localización desarrollada, y en la sección 5 se proponen distintas alternativas para que el ROV navegue rumbo a los elementos de interés seleccionados. El artículo

termina con las secciones dedicadas a los resultados experimentales y a las conclusiones.

## 2 Arquitecturas de Control

Las arquitecturas de control tradicionales asociadas con las embarcaciones autónomas están vinculadas a los conceptos GNC (Guiado, Navegación y Control) [8], ver Figura 1. En este ámbito, el módulo de guiado es responsable de proporcionar referencias de posicionamiento al módulo de control, mientras el módulo de navegación proporciona estimaciones del estado y la posición del vehículo. Desde el punto de vista del usuario, estos vehículos presentan un comportamiento autónomo, es decir, una vez que el usuario establece una misión deseada, el sistema evoluciona de forma independiente. Los AUV cuentan con este tipo de arquitectura que ilustra la figura 1.

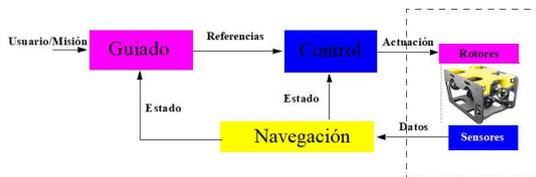


Figura 1: Arquitectura GNC.

Por el contrario, la arquitectura de control de los ROV, figura 2, se caracteriza por reemplazar el módulo de guiado por un dispositivo que sirve de interfaz de usuario. De modo que el vehículo es guiado por un operador mediante realimentación visual directa o mediante cámara. Eventualmente, el controlador puede recibir realimentación de algunos elementos sensoriales para mantener el rumbo o la profundidad.

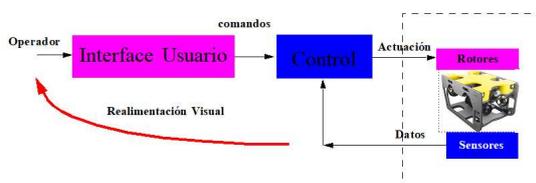


Figura 2: Arquitectura de los ROVs.

Sin embargo, hay situaciones en las que la turbidez del agua impide la realimentación visual. En estos casos es necesario añadir a la arquitectura de control elementos adicionales que auxilien al operador en su actividad o que incluso permitan dar cierto margen de autonomía al ROV.

El objetivo del presente trabajo es modificar la arquitectura para controlar ROVs agregando un

nuevo módulo, (Localización de Elementos), ver figura 3. Este módulo está orientado a dar información al usuario sobre los elementos que se encuentran alrededor del ROV proporcionando su localización dentro de la instalación explotada y marcando el rumbo necesario para visitar las proximidades del elemento. El módulo, también puede proporcionar información al controlador de manera que este pueda programarse para dirigirse al objetivo de interés seleccionado por el operador del ROV.

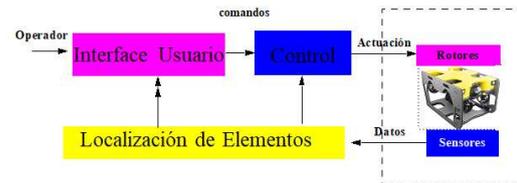


Figura 3: Arquitectura propuesta.

La metodología propuesta en este artículo se está implantando en dos ROV comerciales, figura 4. Ambos vehículos han sido equipados con sensores que permiten la ejecución de tareas en un estanque piscícola, estando preparados para tomar valores físico-químicos del ecosistema, adquirir valores telemétricos (controlador de vuelo), percibir información del entorno (sonar Ping360) y establecer la pose del vehículo mediante un sistema de posicionamiento submarino (WaterLinked). El análisis de los datos adquiridos mejorará la explotación de la piscifactoría.



Figura 4: BlueROV2 y SibiuPro.

## 3 Sonar Ping360

Los sensores SONAR (SOund Navigation And Ranging) son un tipo de sonar activo que funciona transmitiendo pulsos de sonido al agua y registrando la intensidad de los ecos que se devuelven a medida que cada pulso de sonido se refleja en los objetos frente a él. La intensidad de pulso reflejado dependerá de la densidad del material reflectante.

Los sonares de barrido se definen por tener un haz acústico en forma de “abanico” con un haz vertical ancho y un haz horizontal estrecho para obtener secciones transversales acústicas del entorno, figura 5, para luego mostrar las secciones transversales como una sola imagen [4].

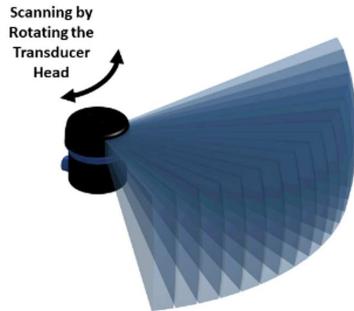


Figura 5: Escaneo del sonar Ping360 [4].

Al combinar la velocidad conocida del sonido en el agua (SSW) con el tiempo en que se recibieron los ecos (TTR), el sonar puede calcular la distancia (D) que ha viajado el sonido. La ecuación (1) determina la distancia recorrida por el sonido:

$$D = SSW \left( \frac{TTR}{2} \right) \quad (1)$$

Por lo general, la velocidad del sonido en agua salada es de aproximadamente 1500 m/s, pero esto puede variar según la temperatura del agua, la salinidad y la profundidad de funcionamiento del sonar.

Ese transductor se encuentra fijado en la parte superior del ROV (ver figura 6) y está montado en un motor que lo gira en incrementos de 0.9 grados y, mientras lo hace, permite generar una imagen circular de los alrededores con un alcance máximo de 50 metros.



Figura 6: Ping360 sobre el ROV.

La representación de estos datos proporciona un resultado similar al que se podría ver en un radar

meteorológico o al representar los datos de un Lidar sobre un robot autónomo, ver figura 7.

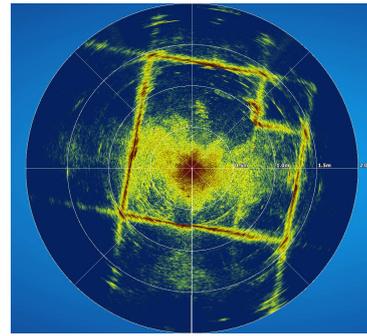


Figura 7: Representación datos Ping360 en PingViewer.

Los obstáculos con densidades de material muy diferentes a las del agua (como gas, roca, hormigón o metal) serán muy reflectantes y tendrán fuertes ecos. Los ecos de materiales como barro, limo, arena y plantas tendrán ecos más débiles, ya que tienen una densidad similar a la del agua o absorben energía acústica. Para cada ángulo, se obtienen 1200 valores con la fuerza del eco recibida desde distintas distancias. Estos valores se encuentran entre 0 y 255 (sin rebote e intensidad máxima, respectivamente), los cuales se muestran en el interfaz a través de una paleta de colores, teniendo un color diferente dependiendo de la fuerza del rebote. En la figura 7 se muestra la representación típica de los datos proporcionados por este sensor utilizando el programa comercial PingViewer.

Para comunicarnos con el Ping360, es necesario establecer un mensaje con una configuración determinada, de forma que estén incluidos, por un lado, los valores de las variables modificables: la ganancia (baja, normal o alta), el ángulo del rotor deseado, la duración de la transmisión acústica y el periodo de cada muestra. Y por otro lado las variables fijas: la frecuencia, el número de muestras (1200 datos para cada ángulo) y la transmisión automática de los datos tras cada toma.

Se ha implementado esta comunicación utilizando Matlab. Para ello se ha realizado un estudio previo (byte a byte) del funcionamiento del protocolo de comunicación PingProtocol que usa el sonar Ping360. Gracias a esto, se ha podido generar un array de valores que se envían al dispositivo a través de una comunicación Ethernet, utilizando particularmente el protocolo UDP.

Mediante la modificación de las variables habilitadas para ello, podemos optimizar la forma de obtener los datos para cada situación en la que se encuentre el ROV. Siendo posible restringir la

toma de datos a un sector angular concreto si fuese de interés para la tarea de exploración.

La utilización del sonar Ping360 para la localización de objetivos requiere tener en cuenta varias cuestiones. En primer lugar es necesario adecuar la velocidad de barrido con el fin de procesar adecuadamente los datos, caracterizando la naturaleza de los objetos reflectantes e identificando los posibles elementos de interés. Por último es necesario vincular las medidas de distancia y ángulo con la posición de los elementos en los sistemas de referencia donde se haya definido la tarea. Este aspecto se aborda en la siguiente sección.

## 4 Localización de elementos de interés

### 4.1 Localización del ROV: WaterLinked

Para la localización del vehículo, se hace uso del sistema de localización WaterLinked Underwater GPS Explorer Kit WL-11001, el cual está formado por una maleta de superficie, cuatro receptores, que se distribuyen en el entorno a explorar, y el localizador que se encuentra en la parte superior del ROV. A su vez, la maleta de superficie, está compuesta por varios elementos, como son un receptor GPS y una unidad de medición inercial (IMU). En ella, reside el sistema que permite estimar la posición del ROV y establecer la configuración del sistema de referencia local de la instalación a explorar.

El sistema de localización submarino se basa en la técnica de posicionamiento acústico Short Baseline (SBL) [2]. El localizador colocado en el ROV funciona como una baliza que envía un pulso acústico que reciben los cuatro receptores sumergidos en el agua. El tiempo de llegada a cada receptor se utiliza para calcular la posición del localizador. Los sistemas SBL, en comparación con los sistemas Ultra-Short BaseLine (USBL), tienen la ventaja de funcionar bien en aguas poco profundas y en entornos acústicos reflectantes, como en jaulas para peces, cerca de instalaciones portuarias, cerca de cascos de barcos, dentro de tanques de agua, etc.

A partir del posicionamiento local, y teniendo en cuenta el posicionamiento global de la estación, proporcionado por el receptor GPS, el sistema WaterLinked estima el posicionamiento global del ROV. Este dato se puede obtener al abrir una comunicación a través del protocolo MavLink con la controladora de vuelo del ROV (Pixhawk), mediante el cual podemos solicitar toda la información disponible en él.

Con esta información y junto con los datos de

la orientación del vehículo proporcionados por la IMU que incorpora la controladora de vuelo, es posible determinar la pose global del ROV y la matriz de transformación del sistemas de referencia local del ROV al sistema de referencia global ( ${}^G T_R$ ).

Para obtener el posicionamiento relativo del sistema local (WaterLinked) respecto del sistema global (visión satélite), se utiliza un proceso de calibración en el que se tienen en cuenta los datos del receptor GPS, la orientación de la IMU del WaterLinked y el mapa de la instalación. Esta operación permite determinar la matriz de transformación del sistema local al sistema global ( ${}^G T_L$ ).

Estas matrices son fundamentales para obtener la matriz de transformación que nos permite transformar coordenadas desde el sistema de referencia del ROV al sistema local de la instalación ( ${}^L T_R$ ) y, con ello, posicionar los objetivos identificados con los datos del sonar Ping360 en el mapa de la misma.

La relación existente entre estas matrices puede describirse mediante la expresión (2):

$${}^L T_R = ({}^G T_L)^{-1} \cdot {}^G T_R \tag{2}$$

En la figura 8 se puede observar el funcionamiento de este método de forma gráfica.

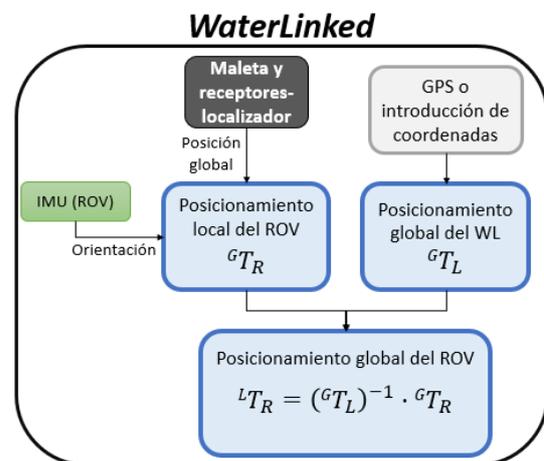


Figura 8: Localización del ROV con WaterLinked.

### 4.2 Posicionamiento de elementos de interés

Los datos adquiridos por el sonar Ping360 proporcionan información del entorno del ROV. Esta información, al incluir datos redundantes y ruido, necesita ser filtradas para identificar los posibles objetivos a seguir. Por este motivo, en primer lu-

gar, se realiza un procesamiento que se compone de una serie de etapas:

- Eliminación de datos inferiores a un límite, despreciando así todos los datos que hacen referencia a rebotes con una intensidad menor, parecida a la que devuelve el agua.
- Eliminación de ruido de proximidad (datos cercanos a la posición del ROV).
- Identificación de elementos tomando como característica la intensidad del eco devuelto (clustering).

Una vez efectuado el procesamiento, conocida la distancia a cada elemento identificado y el sector donde se encuentra, será posible obtener la posición de cualquiera de ellos referida al sistema local del ROV ( $P_{ob|R}$ ). Todo este proceso se resume en la figura 9.

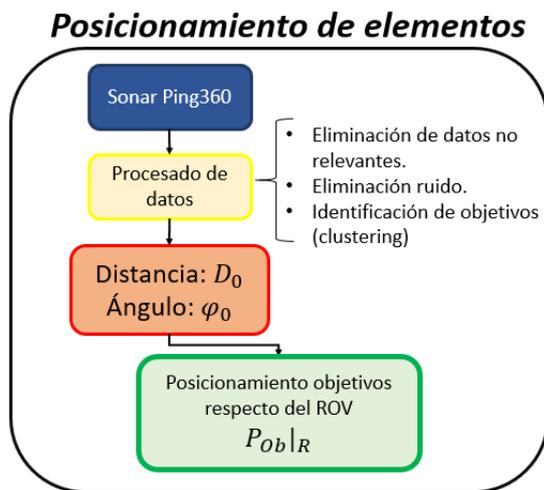


Figura 9: Posicionamiento de elementos.

La finalidad última es encontrar la posición del elemento que se desea localizar respecto a los sistemas de referencia local ( $P_{ob|L}$ ) y global ( $P_{ob|G}$ ). Para ello, se utilizan las matrices cuyo cálculo se describió en el apartado anterior y se utilizan las expresiones (3) y (4):

$$P_{ob|L} = {}^L T_R \cdot P_{ob|R} \tag{3}$$

$$P_{ob|G} = {}^G T_R \cdot P_{ob|R} \tag{4}$$

### 5 Identificación del rumbo de navegación

Una vez determinadas las posiciones de los distintos elementos de interés, es posible que el oper-

ador del ROV esté interesado en visitar las proximidades de uno o varios de ellos. En ese momento, los elementos seleccionados se convierten en objetivos de navegación. Con el fin de identificar el rumbo que ha de seguir la nave para acercarse a esos objetivos, es imprescindible priorizar el orden de visita de los mismos. La priorización puede hacerse atendiendo a diversos criterios, bien pueden establecerse de forma personal por el operador, o de forma automática, atendiendo a los datos registrados anteriormente. En este sentido el criterio más inmediato podría ser la intensidad de la señal devuelta, aunque este aspecto es un campo de investigación aún abierto.

A partir de esta selección, los datos a tener en cuenta para tomar rumbo hacia un objetivo son: el ángulo relativo entre éste y el ROV y la distancia entre el ROV y el objetivo. Ambos están relacionados con la posición del objetivo en el sistema local del ROV. Una vez determinado el rumbo, el vehículo puede ser conducido manualmente, o de forma autónoma. En este último caso esta tarea recaerá en el controlador de vuelo, que para acercar la nave al objetivo deseado modulará las velocidades de avance y de giro en función de estas magnitudes, ver figura 10.

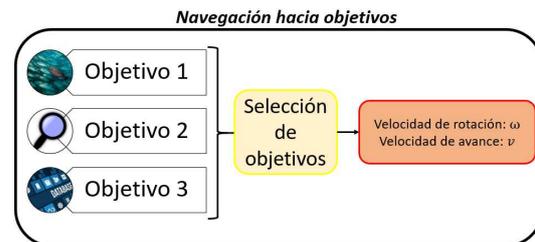


Figura 10: Navegación hacia objetivos.

## 6 Experimentación

La experimentación en interiores se llevó a cabo en la piscina municipal de Isla Cristina (Huelva), ver figura 11, y los experimentos en exteriores se efectuaron en la piscina del Club de golf de Bellavista (Aljaraque, Huelva), ver figura 12.

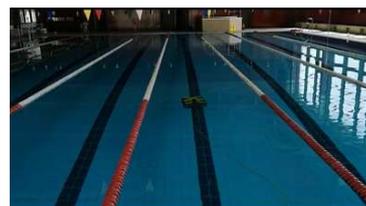


Figura 11: Experimentos en interior, piscina de Isla Cristina.

En ambos casos el objetivo fue implementar el pro-



Figura 12: Experimentos en exterior, piscina de Bellavista.

cedimiento para la localización de objetos y personas en posiciones estáticas y conocidas, donde se comprobó las diferencias entre la información obtenida a partir del sonar y las medidas realizadas manualmente. A partir de esta identificación se representaron los datos tanto en el sistema de referencia local como, si era posible, en el global (visión satélite).

En la piscina interior no se dispuso de señal GPS por parte del sistema de posicionamiento, por tanto, las pruebas consistieron en identificar localmente la posición de los objetos y personas situados en el interior de la piscina considerando diferentes situaciones y diferentes objetos. En la figura 13 podemos ver una representación de los datos del sensor utilizando el software PingViewer.

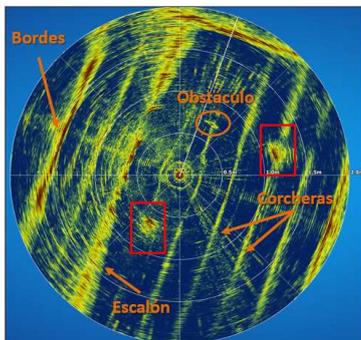


Figura 13: Experimentos en interiores: visualización de datos del Ping360 en PingViewer.

En esta figura, se puede observar la ubicación de las personas que se encontraban alrededor del ROV (recuadros rojos) así como los límites de la piscina, corcheras y un objeto de menor tamaño.

En referencia a los experimentos realizados en la piscina exterior, a partir de la señal GPS y del procedimiento de calibración, fue posible localizar globalmente los objetos y obtener la representación de los mismos en la vista satélite.

En la figura 14 se muestran las posiciones, medidas manualmente, del ROV, la maleta de superficie del WaterLinked, sus receptores, el sistema

de referencia local y los objetos a localizar en los experimentos realizados.

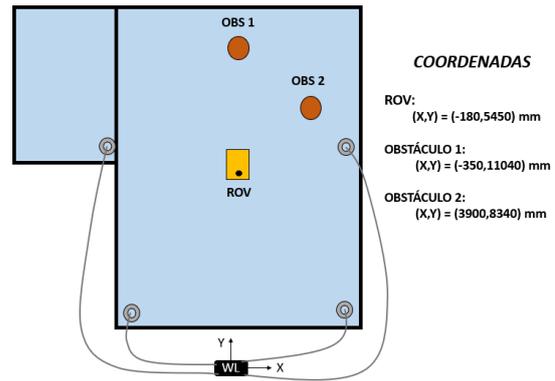


Figura 14: Experimentos en exteriores: disposición de los elementos.

En la figura 15 se muestran los datos capturados por el sensor utilizando una interfaz especialmente diseñada para este proyecto. Los datos son representados una vez han sido procesados. Los elementos identificados están marcados con círculos rojos. Además, en esta interfaz se ha disminuido el rango de la paleta de colores, provocando una mejor diferenciación del color entre valores próximos. Se puede comprobar la mejoría del sistema de representación creado comparando las figuras 7 y 15, que se realizaron en la misma piscina y condiciones.

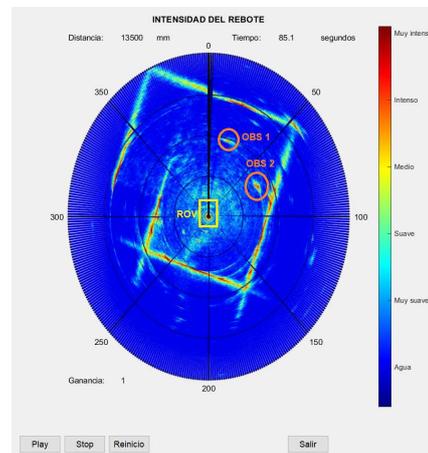


Figura 15: Experimentos en exteriores: representación de datos del Ping360 en el interfaz desarrollado en el proyecto.

En la representación local, que se ilustra en la figura 16, se muestran las coordenadas medidas del perímetro de la piscina (línea roja), los obstáculos y el maletín de superficie (cuadrados negros), mientras que los datos, ya tratados, del sonar han sido especificados con asteriscos.

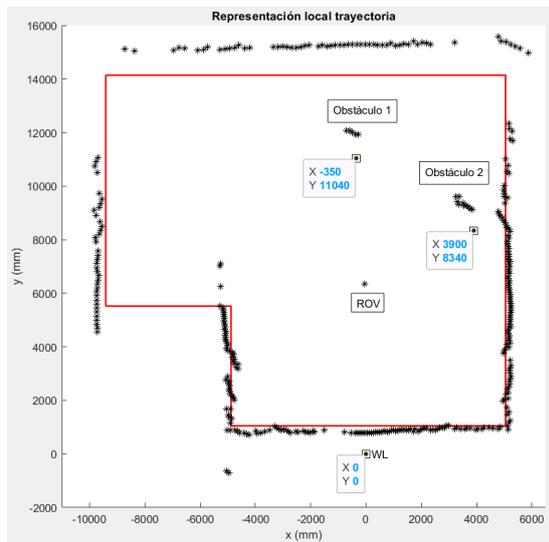


Figura 16: Experimentos en exteriores: representación local.

Por otro lado, en la figura 17, se muestra una visión satélite de la instalación dónde se realizaron los experimentos en exteriores. En esta imagen, pueden observarse las dimensiones reales de la piscina y sobrepuestas a la misma, se han representado las disposiciones de los objetos a localizar. Concretamente, se muestran: en verde los datos filtrados del sonar; en negro las posiciones medidas de los objetos; y con líneas rojas el perímetro con las dimensiones medidas de la piscina.

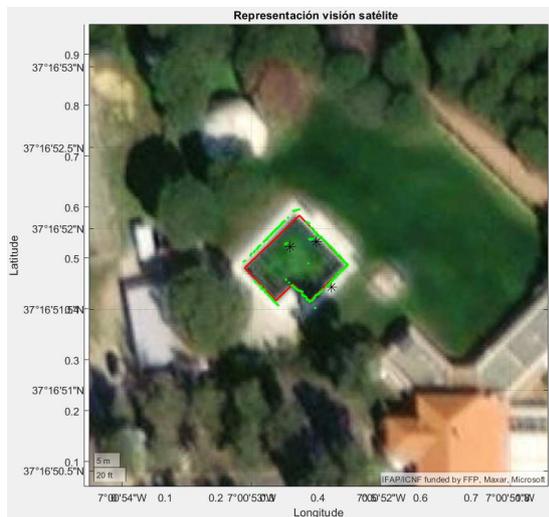


Figura 17: Experimentos en exteriores: visión satélite.

La comparación de los datos obtenidos utilizando el proceso de localización con los valores medidos manualmente, proporciona un error medio  $\bar{E}=0.81$  m, y una desviación estándar  $\sigma=0.15$  m. Lo que indica que la precisión es suficiente para afrontar la tarea de navegar hacia el elemento

identificado o incluirlo en el mapa de la instalación.

## 7 Conclusiones

En este artículo se propone un procedimiento para hacer posible que ROVs comerciales, destinados a la toma de datos e inspección de granja acuícolas, sean capaces de localizar elementos de interés para la explotación de la granja. Para ello se ha desarrollado una metodología de localización de elementos en base a los datos adquiridos por un sensor SONAR de barrido. El método propuesto utiliza un procesamiento previo de los datos y tiene en cuenta la información de la telemetría y el posicionamiento del ROV proporcionado por un sistema de localización subacuática. En condiciones conocidas, se han realizado pruebas para comprobar la precisión de los datos computados, demostrándose la viabilidad de la metodología propuesta.

## Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado en el contexto del Proyecto KTTSeaDrones ('Conocimiento y transferencia de tecnología sobre vehículos aéreos y acuáticos para el desarrollo transfronterizo de ciencias marinas y pesqueras 0622-KTTSEADRONES-5-E') financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020. Los autores quieren agradecer al Ayuntamiento de Isla Cristina (Huelva) y al Club de Golf de Bellavista (Aljaraque, Huelva) que hayan permitido utilizar sus instalaciones para realizar la experimentación presentada.

## English summary

**Locating items of interest by using remotely operated vehicles for the sustainable exploitation of fish farms**

## Abstract

*This article describes a new approach to modifying the control architecture of a remotely operated vehicle (ROV) dedicated to data collection and inspection of fish farms. The proposal is based on including a new Identification and Location module, capable of positioning different types of elements around the ROV. The localization process is based on the use of an ultrasonic*

*sensor in conjunction with a localization system. By combining both systems, local and global positioning of different elements of interest is possible. The article describes the localization methodology and presents experimental results that validate the approach.*

**Keywords:** Sustainable Aquaculture, Remotely Operated Vehicles, GNC Architecture, Underwater Location Systems.

## Referencias

- [1] Balaban, M.O., Soriano, M.G., Ruiz, E.G.: Using image analysis to predict the weight of Alaskan salmon of different species. *Journal of Food Science* 75, 157–162 (2010).
- [2] Christ, R. D., & Wernli Sr, R. L. (2011). *The ROV manual: a user guide for observation class remotely operated vehicles*. Elsevier.
- [3] Gutiérrez-Estrada, J.C., de Pedro, E., López-Luque, R., Pulido-Calvo, I.: Comparison between traditional methods and artificial neural networks for ammonia concentration forecasting in an eel intensive rearing system. *Aquacultural Engineering* 31: 183-203 (2004).
- [4] Página web de BlueRobotics: <https://bluerobotics.com/learn/understanding-and-using-scanning-sonars/>. Accedida 19/07/2021.
- [5] Página oficial de la Unión Europea: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_12\\_955](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_12_955). Accedida 19/07/2021.
- [6] Huvenne, V.A.I., Robert, K., Marsh, L., Iacono, C.L., Bas, T.L., Wynn, R.B.: ROVs and AUVs. In: *Submarine geomorphology*, Springer International Publishing, 93-108 (2018).
- [7] Serpa, D., Ferreira, P., Ferreira, H., Fonseca, L.C., Dinis, M.T., Duarte, P.: Modelling the growth of white seabream and gilthead seabream in semi-intensive earth production ponds using the Dynamic Energy Budget approach. *Journal of Sea Research* 76: 135–145 (2013).
- [8] Petillot, Y. R., Antonelli, G., Casalino, G., & Ferreira, F.: Underwater robots: From

remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 26(2), 94-101 (2019).



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).