



INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A LA GUERRA DE MINAS NAVALES

José María LIARTE ROS



El que gobierna el mar gobierna todo.
Temístocles (524-460 a. de C.)



ÁS de dos mil años han transcurrido desde la victoria griega sobre Persia en las batallas navales de Artemisio y Salamina, y la frase atribuida a Temístocles parece no perder actualidad.

No es necesario que haya un conflicto o una guerra abierta para evidenciar las consecuencias de la paralización de la actividad humana en el mar. Un simple accidente, como el sufrido por el portacontenedores *Ever Given* (fletado por la compañía naviera de transportes taiwanesa Evergreen), que el

pasado 23 de marzo de 2021, en su tránsito desde Malasia a Róterdam (Holanda), encalló en el canal de Suez, paralizando el tráfico marítimo mundial durante semanas y cuyos efectos económicos se dejaron sentir en los puertos europeos hasta pasados unos meses.

En el plano militar, el incremento de actividad en las operaciones de denegación de acceso y negación de área (A2/AD, por sus siglas en inglés) ha devuelto una mayor relevancia al mantenimiento de las capacidades que permiten asegurar la libertad de acción. Sin embargo, hasta hace unos pocos años existía una tendencia generalizada que parecía dejar en el olvido, como algo pasado de moda, el impacto que tendría la presencia de minas navales en el área de operaciones, obviando que estas minas (desde la más avanzada tecnológicamente hasta la de mecanismo más básico) siguen siendo un arma atractiva y al alcance de cualquier actor, sea estatal o no.

La sofisticación de la amenaza de minas y la facilidad de fabricación de artefactos explosivos improvisados de cualquier tipo en el ámbito marítimo (W-IED) (1) han provocado el interés de los países aliados en la potenciación de las capacidades de guerra de minas, especialmente para mantener disponibles y libres de obstáculos las líneas de tráfico marítimo.

En este artículo se presenta la situación y la tendencia en el empleo de la inteligencia artificial aplicada a la guerra de minas navales (AI4MW) (2) en lo que se refiere a lo particular y exclusivo de las operaciones Medidas Contra Minas (MCM).

¿Quo vadis MCM?

El *NATO Future Naval Mine Warfare Vision Paper* (3) presenta una visión de la guerra de minas (minado y MCM) común entre las naciones OTAN que sirva para orientar la transformación hasta 2040, reclamando a los aliados un esfuerzo por desarrollar las capacidades necesarias en algunos campos de las tecnologías emergentes, como sistemas autónomos, *big data* e inteligencia artificial (IA). Entre los objetivos que se deben cumplir en estos desarrollos, destacan: reducir la presencia del hombre en el campo minado, que su operación sea discreta, segura, rápida y eficiente y que sean utilizables en ambientes permisivos o bajo amenaza.

La IA permite desarrollar modelos que procesan grandes volúmenes de datos a gran velocidad para anticiparse con precisión y de forma automatizada a diferentes situaciones, cambios del entorno y acciones de los adversarios en el

(1) <https://www.lavanguardia.com/internacional/20170508/422394913671/la-coalicion-arabe-detecta-minas-flotantes-en-la-costa-yemeni-del-mar-rojo.html>

(2) Siglas no oficiales.

(3) *NATO Future Naval Mine Warfare Vision Paper*, IMSM-0088-2021, vol. 16, marzo de 2021.

espacio de batalla. Es esencial para acelerar los procesos de decisión y así ganar la superioridad de la información (4).

Nuestros aliados han optado por una aproximación pragmática para el futuro de las MCM. Así, Reino Unido y Francia parecen estar poniendo todos los huevos en la cesta de los vehículos autónomos en un proyecto conjunto (5), mientras que Holanda, Italia, Bélgica y Noruega (países con un excelente pedigrí de MCM) apuntan a plataformas tripuladas desde las que desplegar los sistemas autónomos (6).

A nivel nacional, el documento *Aproximación conceptual a la Fuerza MCM 2040* (7), alineado con la visión OTAN, presenta un análisis de la capacidad futura MCM de la Armada. Este concepto se centra principalmente en los pilares de material y de gestión de la información de los factores MIRADO-I.

En sí misma, esta perspectiva nacional supone avanzar en un nuevo paradigma en el que las personas minimicen su presencia en las zonas minadas con el desarrollo de sistemas complejos basados en vehículos autónomos no tripulados (AUV) y de control remoto (ROV), manteniendo a la vez el uso de los cazaminas clase *Segura* y gestionando de la manera más automática posible la gran cantidad de datos que generen estos sistemas.

Por el momento...

Cualquier operación MCM es la suma de una serie de técnicas, tácticas y procedimientos que básicamente tratan de realizar secuencial y ordenadamente las siguientes acciones: detección, clasificación de los contactos, identificación y eliminación de la amenaza si así se ordena (8). En algunas ocasiones, una vez confirmada la presencia de minas en una zona, las operaciones MCM finalizan cuando se haya definido un canal seguro o una ruta alternativa que simplemente evite la amenaza. En otras no será posible esa diversión y será necesario eliminar la amenaza, lo que exigirá una evaluación completa, tanto del riesgo que estamos dispuestos a aceptar durante la ejecución de las tareas como del riesgo remanente que asumirán las fuerzas amigas una vez concluidas. Los escenarios de guerra, crisis y paz en este caso son diferentes.

(4) Norma Permanente 6/2021, del almirante segundo jefe del Estado Mayor de la Armada, por la que se establecen las responsabilidades funcionales del Centro de Inteligencia Artificial de la Armada (CIA2) y las normas y procedimientos para la realización de estudios, proyectos y colaboraciones en materia de inteligencia artificial en la Armada.

(5) *UK Armed Forces Commentary: Towards unmanned, stand-off maritime mine counter measures.*

(6) CARRUTHERS, Tony: *Navy Lookout*, 18 de agosto de 2021, www.navylookout.com.risk-by-business-royal-navy-goes-all-in-with-autonomous-mine-warfare.

(7) COMTEMECOM, 23 de julio de 2020.

(8) Por contraminado, neutralización o puesta en seguro, saturación de los sensores de actuación de la mina, remoción o recuperación para su posterior estudio.



Cazaminas *Segura*. (Foto: Armada)

Además, el tipo de fondo, la clase de mina y el tiempo disponible son los principales condicionantes a la hora de elegir la técnica MCM para cumplir la misión (9). El tipo de fondo y el número de unidades MCM disponibles nos determinan el tiempo que será necesario emplear para alcanzar un determinado nivel de riesgo remanente (porcentaje de limpieza alcanzado); otras veces simplemente se dispone de un tiempo limitado para realizar estas tareas (10).

Los cazaminas clase *Segura* son uno de los mejores exponentes del concepto de guerra de minas desde una plataforma (11), predominante hasta la actualidad, que obliga al hombre a adentrarse en el campo minado, aprovechando su baja firma acústica y magnética y la capacidad de detección y clasificación de su sonar de profundidad variable SQQ-32. La capacidad de identificación y neutralización descansa en el empleo del vehículo *Pluto* + o de buceadores MCM.

Sin embargo, el uso habitual de vehículos autónomos (aéreos, de superficie y submarinos) y ROV, sus capacidades crecientes y el empleo de la IA han permitido incorporarlos a las tareas de guerra de minas y los han convertido en el

(9) «Caza donde puedas, rastrea donde debas». Vieja sentencia MCM.

(10) Operaciones *Time Constraints (limit time known/unknown)* debidas a factores externos o a los requerimientos de la misión.

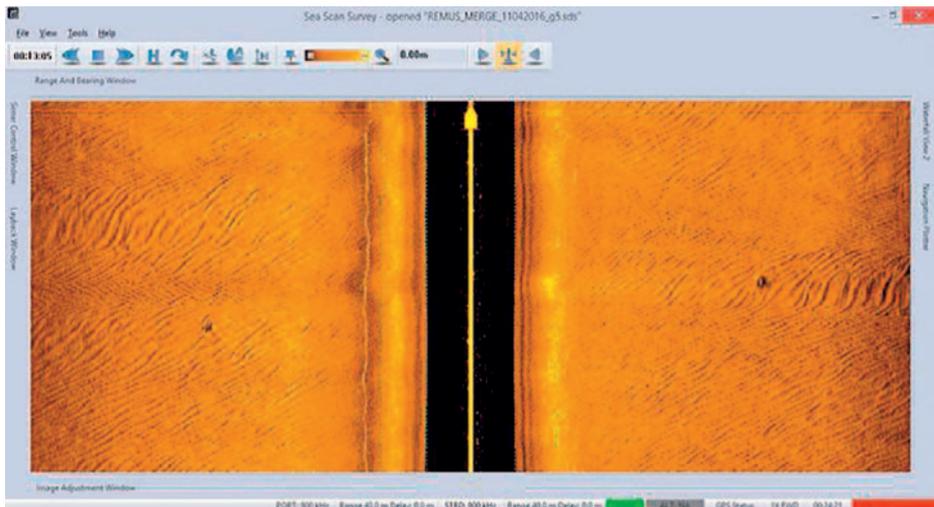
(11) STACK, J. R., et al. (2012): *Transitioning mine warfare to network-centric sensor analysis: future PMA technologies & capabilities*. *Proceedings*, abril de 2009.

centro de los programas de modernización de las capacidades MCM de los países de nuestro entorno (12).

El desarrollo de sistemas complejos basados en vehículos no tripulados y de control remoto supone un nuevo paradigma que aleja al ser humano de las zonas minadas y se anticipa como la opción de futuro más adecuada. De todos estos tipos de vehículos, los que cobran especial preponderancia son los vehículos submarinos autónomos (AUV).

El uso de los AUV con sonar de barrido lateral (SBL) como sensor principal es en el corto/medio plazo la opción complementaria más recomendable, ya que puede ejecutar parte de las tareas (detección y clasificación) de manera automática. Sin embargo, no constituyen por sí solos una capacidad operativa plena, pues para las etapas de identificación y neutralización necesitan de técnicas tradicionales de MCM o del apoyo de ROV u otros tipos de vehículos autónomos (aéreos y de superficie).

Actualmente el empleo de estos AUV se limita a operaciones MCM pasivas (13) para localización de la amenaza y establecimiento de los límites de un campo



Contactos en un sonar de barrido lateral. (Imagen facilitada por el autor)

(12) Por ejemplo, la iniciativa REP-MUS (*Recognized Environmental Picture-Maritime Unmanned Systems*), que lidera Portugal, está considerada por los principales actores de la comunidad marítima —marinas aliadas, centros de investigación como el Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE) o empresas navales— de gran interés en sus diversos campos de aplicación.

(13) ATP-6, volumen I (D), versión II.

minado, una posible ruta de diversión, reducción de riesgo o preparación del espacio de batalla (operaciones de vigilancia de rutas), reconocimiento, exploratorias o de comprobación (14).

Por tanto, suponen un multiplicador de fuerza, ya que por un lado aumentan la seguridad previa en operaciones MCM, y por otro, combinados con los sistemas actuales, permiten alcanzar un mayor porcentaje de limpieza en cobertura múltiple.

En el corto plazo, se podrá realizar el ciclo de tarea completo (detección, localización, identificación y neutralización) combinando varios de estos sistemas. Este es el caso del Reino Unido, que está desarrollando (de momento sin IA) sistemas de misión con los siguientes componentes:

- Un centro de operaciones desplegable en un buque madre.
- Un buque autónomo de superficie.
- Un sonar remolcado.
- Un sistema de neutralización de minas.
- Varios vehículos submarinos autónomos.
- Un sistema autónomo de rastreo.

¿El fin de los cazaminas?

El profesor Daniel Susskind (15), de la Universidad de Oxford, en referencia a la influencia que la IA y los robots tendrán en la ejecución de tareas en los futuros empleos (16), afirma que «un estudio reciente de la consultora McKinsey sobre 820 profesiones concluye que solo el 5 por 100 pueden ser totalmente automatizadas... No cante victoria, porque el 60 por 100 de las ocupaciones están compuestas de tareas que sí pueden ser automatizadas. En otras palabras, la mayoría de los trabajos tienen un componente significativo que ya lo pueden hacer las máquinas. Así que la cuestión no va a ser cuáles serán los empleos que no serán automatizados, sino qué tareas dentro de áreas de trabajo podrán seguir desempeñando los humanos».

(14) Para comprobar que el enemigo no ha vuelto a minar una zona que ya fue limpiada de minas previamente.

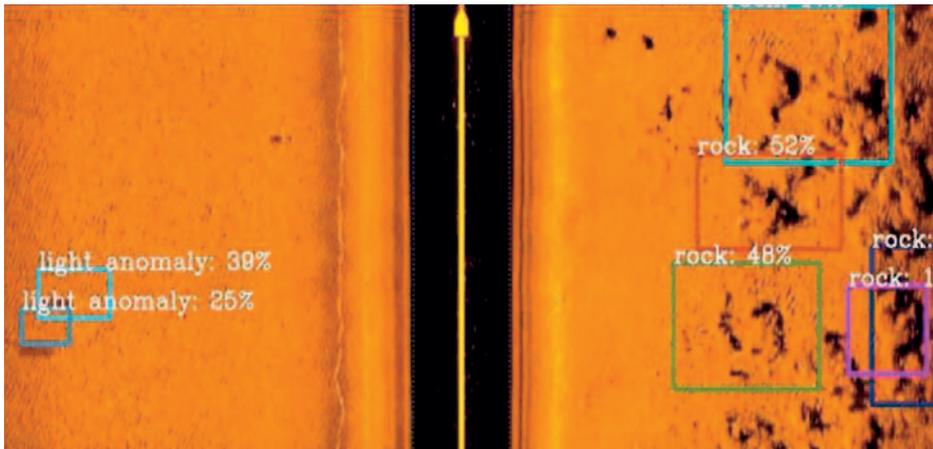
(15) Profesor de Economía de la Universidad de Oxford y exasesor del Gobierno británico, Daniel Susskind se dio a conocer con *El futuro de las profesiones* (Editorial TEEL), donde trata la progresiva sustitución del ser humano en el trabajo por robots. Fue seleccionado por *Financial Times* y *New Scientist* como uno de los mejores libros de 2018. Este año ha publicado *A world without work* (sin edición en español).

(16) MANUEL SÁNCHEZ, Carlos: «Daniel Susskind: La tecnología va a hacernos más prósperos que nunca», <https://www.abc.es/xlsemanal>, 7 de enero de 2022.

Como norma general, el tiempo empleado por parte de un operador cualificado en el análisis posmisión (PMA) (17) de los datos obtenidos por los AUV es el mismo que el tiempo de operación del propio vehículo, por lo que para obtener una ratio de caza o exploración (horas necesarias para limpiar una milla cuadrada) similar a la de los cazaminas será necesario utilizar muchos vehículos y muchos analistas durante mucho tiempo.

La gran cantidad de datos que generan los AUV ha requerido redefinir la capacidad necesaria para su análisis, almacenamiento, explotación y gestión, de tal manera que contribuyan de manera eficiente a la superioridad en la información en favor de la superioridad en el enfrentamiento.

Las capacidades de reconocimiento automático de objetos sumergidos (*Automatic Target Recognition*, ATR) a partir de imágenes de SBL han evolucionado de manera muy prometedora de la mano de la IA, ya que permite en cuestión de segundos la realización del análisis posmisión y la clasificación de los contactos, ahorrando casi en su totalidad el tiempo de análisis, que pasa de horas a minutos. Para tal fin se emplean algoritmos de detección de objetos, siendo el más prometedor para la detección de minas el denominado YOLO (*You Only Look Once*) (18), el cual permite crear, mediante la técnica de *Deep Learning*, una red neuronal para la detección de contactos que muestren anomalías con respecto al fondo marino, basada en la intensidad (luz u oscuridad) de píxeles de las imágenes y con pocas falsas alarmas.



Ejemplo de clasificación de imágenes por clases. (Imagen facilitada por el autor)

(17) *Post Mission Analysis*.

(18) EINSIDLER, Dylan: *Deep learning approach to target recognition in side-scan sonar imagery*. Florida Atlantic University, mayo 2018.

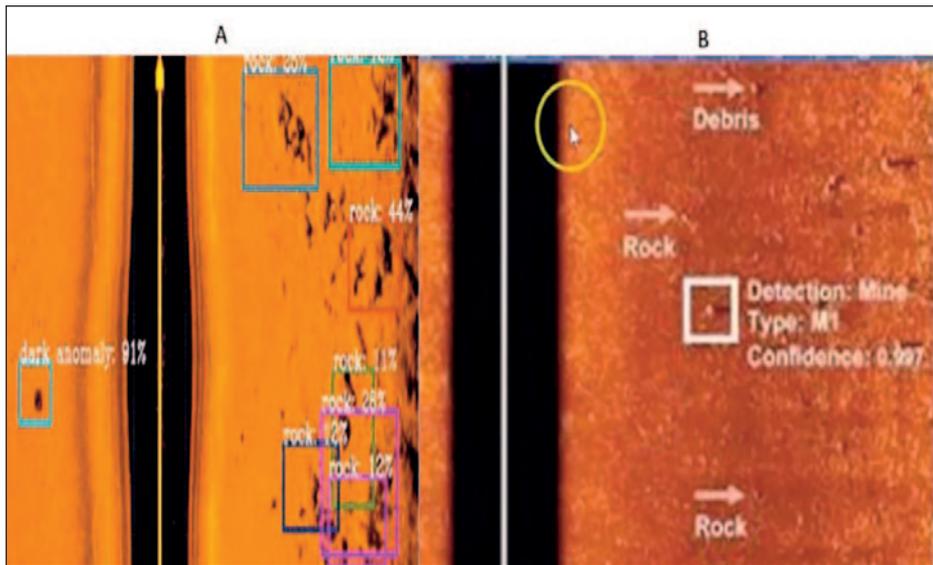
Lo primero que hace el algoritmo es procesar la imagen, pasándola a escala de grises y detectando los bordes de los objetos con un filtro. Los pasos que siguen consisten en reducir la imagen a un problema de clasificación de clases y enmarcar el objeto identificado en una caja. Para esto, el algoritmo trata de enmarcarlo en varias cajas, que luego reduce al candidato que mejor lo ubique.

Estas redes neuronales necesitan datos de entrenamiento, test y validación. Alrededor de 100 imágenes de entrenamiento serían inicialmente suficientes para iniciar el proceso y obtener una precisión alta. Posteriormente, hay que conseguir unas imágenes (distintas) con las que se pueda validar el modelo y otras de test o prueba final.

En las primeras redes neuronales que se usaron para ATR se necesitaba gran número de imágenes de ejemplo del objeto que se pretendía que identificase. Actualmente, con este tipo de algoritmos se puede empezar a entrenar desde 50 imágenes hasta un número óptimo de 1.000.

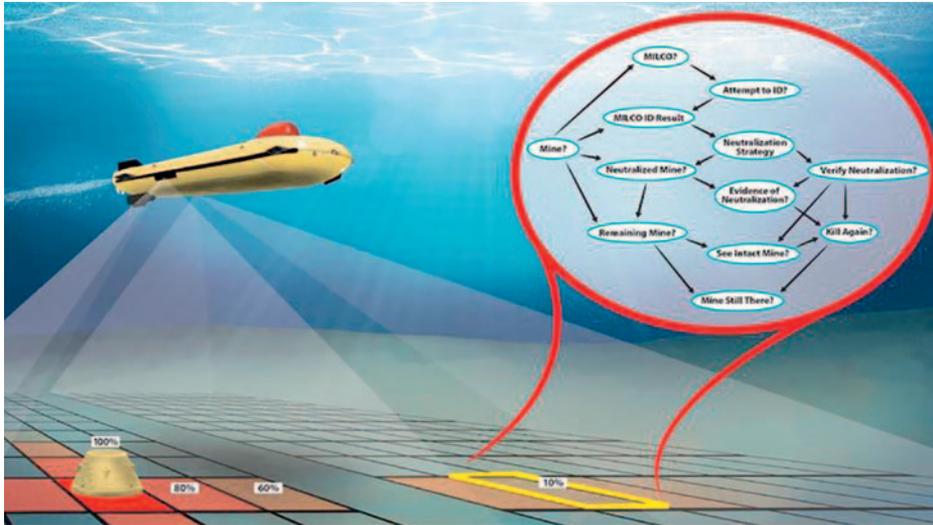
En nuestro caso, es preciso crear una base de datos de imágenes de SBL con diferentes tipos de minas en diferentes tipos de fondo y desde diferentes aspectos (profundidad y distancia a la mina) para crear el conjunto de datos de entrenamiento (80 por 100 del total de los datos de entrenamiento) y de test (20 por 100).

Las últimas pruebas para el desarrollo de ATR utilizando las versiones mejoradas de YOLO concluyen que es posible la detección en tiempo real de cualquier



Ejemplo de clasificación de imágenes por clases aplicadas a contactos submarinos.
(Imagen facilitada por el autor)

objeto en el lecho marino a partir de imágenes en cascada de un SBL (19), llegando a clasificarlos y a distinguir entre los diferentes tipos —mina de fondo, orinque, no mina—, permitiendo por tanto establecer con claridad una zona donde no haya minas, aunque no logre por sí sola efectuar limpieza de minas.



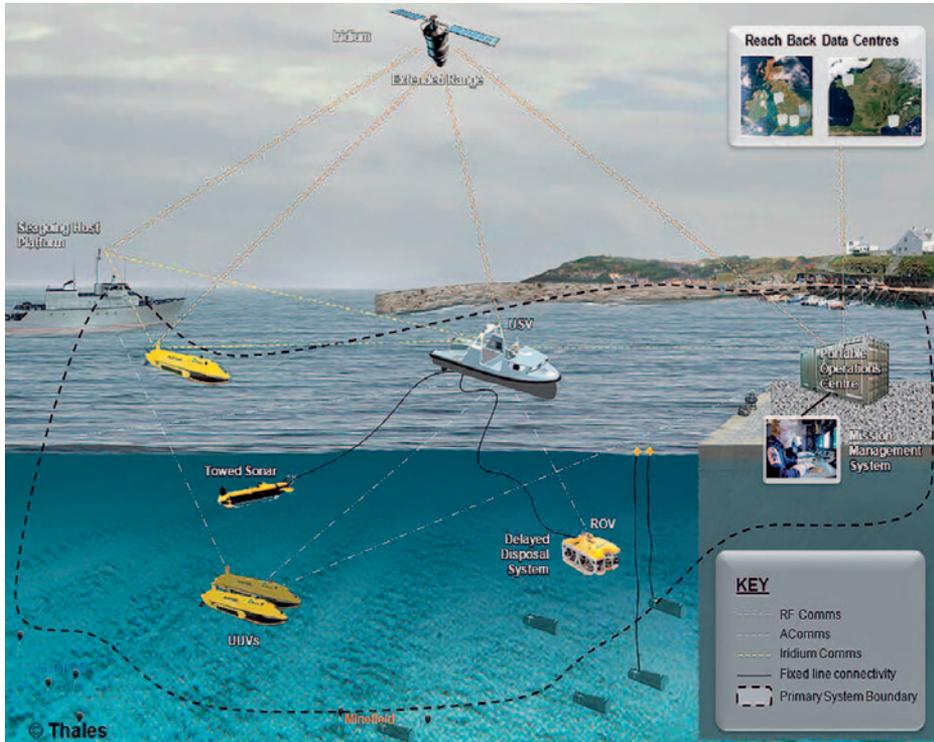
Representación gráfica de ATR (20)

Una aplicación podría ser en misiones cooperativas de varios AUV. Por ejemplo, un AUV equipado con ATR y SBL manda una señal acústica a un AUV cooperativo equipado con otro sensor que confirme la detección (21) y lo identifique, o a un vehículo autónomo de superficie (USV) dotado con un sistema de rastreo de minas y al mismo tiempo se trasmite la información a un vehículo autónomo aéreo (UAV) o al buque madre y que a su vez la retransmita al resto de la fuerza, al Centro de Datos de Guerra de Minas (CDGM) o que esté disponible en una nube táctica.

(19) YU, Yongcan; ZHAO, Jianhu; GONG, Quanhua; HUANG, Chao; ZHENG, Gen, y MA, Jinye: «Real-Time Underwater Maritime Object Detection in Side-Scan Sonar Images Based on Transformer-YOLOv5», *MDPI*, septiembre 2021.

(20) MIDTGAARD, Øivind; A. CONNORS, Warren; HAMMOND, Tim R.: «A Bayesian Network Approach to Evaluating the Effectiveness of Modern Mine Hunting», <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/21/4359>

(21) Aprovechando, por ejemplo, otros desarrollos de transmisión de señales acústicas submarinas, como JANUS.



Representación de sistemas no tripulados cooperativos (22)

¿Qué está haciendo la Armada?

En la Armada ya se está trabajando en proyectos similares de IA. Así, dentro del convenio de colaboración entre Navantia y la Armada (23), en septiembre de 2020 se iniciaron proyectos *Quick Win* (QW), entre los que se encuentran el reconocimiento de imágenes por IA y la asistencia en reacciones tácticas en un nuevo proyecto que permita integrar imágenes recibidas por sensores electro-ópticos (EO) para su reconocimiento mediante algoritmos de IA y se tengan en cuenta en el asistente de reacciones tácticas preplaneadas ante FAC/FIAC.

(22) MMCM Concept. Imagen de Tahles publicada en <https://www.navylookout.com/the-future-of-royal-navy-minehunting/>, 10 de septiembre 2018.

(23) Esta iniciativa contempla nueve proyectos de diversa índole, entre los que destacan: el control de personal en situaciones operativas a bordo, la gestión de rutas de escape, la correlación de firma acústica con vibraciones o la gestión de información clasificada.



Proyectos de IA en curso en la Armada. (Archivo GIC ASEGEMAR)

La esperada incorporación a lo largo de 2022 de dos AUV dotados de SBL permitirá, por una lado, adquirir experiencia en el empleo de estos vehículos y además poder hacer acopio de las imágenes de diferentes tipos de minas en diferentes tipos de fondo para, cuando llegue el momento, estar en disposición de dar el salto al empleo de la IA.



AUV de fabricación española. (Imagen facilitada por el autor)

En el seno del GRUGUEM (Grupo de Doctrina de Guerra de Minas) se está trabajando en un concepto de empleo conjunto de cazaminas y AUV, que se irá perfeccionando con la experiencia.

Siguiendo la estela de la comunidad universitaria, desde la Fuerza MCM se han dado los primeros pasos para avanzar en el desarrollo de ATR en guerra de



Flotilla MCM. (Foto: Ministerio de Defensa)

minas (basándose en estudios de aplicación de IA para la detección de tumores cancerígenos a partir de imágenes), acompasando así nuestro avance hacia el futuro con el resto de países de nuestro entorno.

Al mismo tiempo, la evolución ya iniciada por el CDGM 4.0 (Centro de Datos de Guerra de Minas) permitirá comunicar con servidores embarcados que procesarán las imágenes del AUV, alimentando la base de datos de contactos submarinos y comunicando esta información a otros buques (24) o agrupaciones navales nacionales o aliadas que contribuyan a la caza de minas o tengan un tránsito lo más seguro posible.

En conclusión

En un futuro a medio plazo los AUV dotados con ATR basada en la IA formarán parte de los medios MCM para su empleo como otra técnica complementaria más en tareas MCM pasivas.

(24) Puede ser usado para tareas de colaboración con SASEMAR o con las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado en la detección de objetos de pequeño tamaño, cuerpos humanos, contenedores, aeronaves...

El uso de estos sistemas, en combinación con otros vehículos autónomos y ROV, permitirá realizar las operaciones MCM de una manera discreta y eficiente, reduciendo la presencia del hombre en el campo de minas.

La evolución del CDGM con capacidad para gestionar la información recibida de estos sistemas casi en tiempo real posibilitará su difusión o disposición en una nube táctica para agrupaciones en la mar allí donde se necesite en beneficio de la seguridad en la zona de operaciones, facilitando la toma de decisiones.

La Armada está dando los pasos en la dirección adecuada para mantenerse al nivel marcado por la OTAN, y no sería extraño que, en un futuro cercano, a la tradicional frase «caza donde puedas, rastrea donde debas» haya que añadirle otra de difícil traducción: «*unmanned* donde puedas, *manned* donde debas».

