



REVISTA DERROTERO

Seguridad y Defensa

Teoría de búsqueda: búsqueda óptima de semisumergibles al servicio del narcotráfico en la costa Pacífica colombiana

Guillermo Villalba Torres   ¹

¹Subdirector Centro Internacional de Investigación y Análisis Contra el Narcotráfico Marítimo. Profesional Ciencias Navales Escuela Naval de Cadetes, Especialista Gerencia Talento Humano, Universidad Autónoma del Caribe, M.Sc. Military Operational Research Universidad de Cranfield



Recibido: 02/09/2021
Aprobado: 14/10/2021

 **Correspondencia:**
guillermo.villalba
@armada.mil.co

Citación:
G. Villalba-Torres. Teoría de búsqueda: búsqueda óptima de semisumergibles al servicio del narcotráfico en la costa Pacífica colombiana. Derrotero 15, número 2 (Ene-Dic) 2021.

Resumen

Las organizaciones criminales transnacionales (OCT) buscan cada día diferentes métodos para transportar sustancias ilícitas desde Suramérica hacia otros continentes y países americanos. Para ello, la utilización de semisumergibles o narcosubmarinos ha demostrado ser un medio que permite el transporte de narcóticos a una escala mayor que las lanchas *go fast*, además de ser mucho más sigilosos y difíciles de detectar por parte de las unidades de la Armada Nacional. Las autoridades marítimas colombianas han incrementado los esfuerzos para detectar este tipo de modalidades, pero el empleo de las unidades de patrullaje genera costos y en algunas ocasiones la disponibilidad de apoyo aéreo es limitada por las horas de vuelo. Por tal motivo, la asignación de recursos con el fin de maximizar la búsqueda, dado el poco tiempo disponible para la detección de las embarcaciones al servicio del narcotráfico, es crucial. Este artículo revisa la teoría de búsqueda aleatoria y exhaustiva, así como la asignación de recursos, teniendo en cuenta la búsqueda y detección de semisumergibles en las zonas de mayor influencia de estas embarcaciones en la costa Pacífica de Colombia.

Palabras clave: teoría de búsqueda, semisumergible, narcotráfico, asignación de recursos.

Search theory: Optimal search for drug trafficking semi-submersibles in the Colombian Pacific Coast

Abstract

Transnational criminal organizations (TCOs) are increasingly seeking different methods of transporting illicit substances from South America to other continents and countries in America. For this purpose, the use of semi-submersibles or narco-submarines has proven to transport narcotics on a larger scale than the Go-Fast boats, as well as being much stealthier and more difficult to detect by the Colombian Navy. Colombian maritime authorities have made efforts to detect this type of modality. The use of units generates costs and sometimes the availability of air support is limited due to flight hours. For this reason, the allocation of resources to maximize the search given the time available for the detection of drug trafficking vessels is crucial. This article reviews the theory of random and exhaustive search, as well as the allocation of resources considering the search and detection of semi-submersibles in the areas of greatest influence of these vessels on the Colombian Pacific coast.

Keywords: Search theory, semi-submersible, drug trafficking, resource allocation.

Introducción

Mientras los países alrededor del mundo abren de nuevo sus fronteras después de la emergencia sanitaria ocasionada por la pandemia del COVID-19, el tráfico de drogas se reactiva también a nivel mundial. En abril del 2020, el comercio de cocaína descendió con respecto a febrero y marzo mientras el mundo cerraba las fronteras terrestres, marítimas y aéreas, en busca de poder controlar los casos positivos ocasionados por el virus SARS-CoV-2, lo que obligó a las OCT a recurrir a nuevas modalidades de transporte y logística.

La viceministra de Defensa para las Políticas y Asuntos Internacionales, Sandra Álzate, afirmó: “El narcotráfico se ha transformado considerablemente en los últimos años, especializando sus formas de producción, rutas de tráfico, actores y roles involucrados, convirtiéndose en un flagelo que desborda las fronteras nacionales” ([El Universal, 2021](#)). En Colombia las redes de narcotraficantes utilizan varias modalidades para el transporte de sustancias ilícitas, entre las más comunes se encuentra las lanchas go fast, sumergibles, contenedores y semisumergibles. Esta última forma de embarcación artesanal es adaptada para navegar a ras de la superficie del agua, transportando hasta 8 toneladas de droga, siendo además de difícil detección para las autoridades marítimas.

El almirante Hernando Mattos era el comandante de la Fuerza de Tarea Contra el Narcotráfico “Poseidón” en el año 2020, para ese entonces manifestó que en resultados operaciones se habían incautado 27 semisumergibles, catorce en territorio nacional y trece en



Figura 1. Semisumergible en las costas del Pacífico colombiano.

Fuente: (Armada de Colombia, 2020).

operaciones de interdicción en aguas internacionales. “En estas operaciones se han incautado 31.3 toneladas de cocaína, cuyo valor por kilo en el mercado negro de Estados Unidos supera los USD\$33.000. Es decir, todas las incautaciones habrían alcanzado un precio de más de mil millones de dólares, casi cuatro billones de pesos colombianos” (El Tiempo, 2020). El Almirante además señaló que las OCT no están enviando las sustancias ilícitas directamente a Estados Unidos, sino que mantienen a Panamá y Costa Rica como países plataforma o centros logísticos. Desde allí, bajo otras modalidades, la envían a los carteles mexicanos, los cuales son los principales compradores y comercializadores de la droga hacia Norteamérica y Europa (El Tiempo, 2020).

La Armada Nacional ha implementado diferentes medidas con sus unidades navales, con el propósito de bloquear las líneas de comunicación marítimas usadas para el tráfico de estupefacientes, en la lucha para desarticular las redes trasnacionales del narcotráfico y los delitos conexos que afectan a toda la región. Durante el desarrollo de las operaciones de interdicción, la disponibilidad operacional de los buques de superficie, de las unidades de reacción rápida y de vigilancia aérea es limitada, especialmente para las unidades de apoyo aéreo que tienen restricciones de acuerdo con el tiempo de duración de vuelo, por el consumo de combustible y las extensas áreas a cubrir, así como también para las unidades de reacción rápida de Guardacostas. Conforme a las condiciones mencionadas anteriormente, cada minuto de operación en la búsqueda de artefactos navales al servicio del narcotráfico es crucial, por lo tanto, asignar correctamente el uso de las unidades de la

marina en la búsqueda y detección de semisumergibles es fundamental en la lucha contra las OCT.

Método

El presente estudio tiene como finalidad conocer la teoría de búsqueda aplicada a la detección de semisumergibles y submarinos, basada en los estudios realizados durante la Segunda Guerra Mundial. Durante esta época se destacan los inicios de la teoría de búsqueda por parte de los ingleses y su aplicación en la temática *Operational Research* (Investigación de Operaciones), donde fundamentalmente se emplean diferentes métodos analíticos que ayudan a la toma de decisiones para llegar a soluciones óptimas de problemas complejos.

En la teoría de búsqueda por parte de los Aliados se comparó el número de horas de vuelo realizadas por sus aviones, con relación al número de avistamientos de submarinos y semisumergibles en un área determinada. De acuerdo con los resultados obtenidos fue posible planear una redistribución de los aviones en áreas de patrullajes más efectivas; la interpretación de estas estadísticas logró establecer mejores radios de efectividad, los cuales fueron más útiles a la hora de planificar y asignar los recursos (Romero, 2020).

Luego de estudiar y conocer la teoría de búsqueda se analizó y aplicó la teoría de asignación de recursos para aprovechar los activos de búsqueda, con la finalidad de maximizar la probabilidad de localizar el objetivo con los recursos disponibles. Para ello se utilizó el método de los multiplicadores de LaGrange en los problemas de optimización, el cual permite encontrar los máximos de funciones con múltiples variables sujeta a restricciones.

En este artículo se presentará un ejercicio práctico con base en información del Centro Internacional de Investigación y Análisis contra el Narcotráfico Marítimo (CMCON) sobre las incautaciones de semisumergibles con narcóticos en la costa Pacífica colombiana. Se elaboraron tres áreas de búsqueda donde operan unidades de la Armada, con las mayores incautaciones de droga en este tipo de embarcaciones, y se trató de maximizar la probabilidad de localizar el objetivo y reducir al mínimo los recursos y el tiempo empleados en su búsqueda.

Con el desarrollo del estudio se busca tener alternativas en el empleo de diferentes unidades en la lucha contra las incautaciones de narcóticos en el ámbito marítimo. Se conocerán las probabilidades de detección de semisumergibles en las áreas de búsqueda, de acuerdo con el tipo de unidad y a sus características operacionales. Además, se estudiará el empleo del patrullaje marítimo en la búsqueda del objetivo, conociendo el tiempo asignado a cada área de búsqueda con base en las probabilidades de detección a la mayor velocidad posible con los recursos disponibles.

Semisumergibles

Desde los inicios del tráfico de drogas vía marítima, la forma habitual de transporte era por medio de lanchas rápidas, buques pesqueros y contenedores. Las nuevas tecnologías en la lucha contra las drogas obligaron a las OCT a buscar nuevas maneras para el transporte de su carga desde Suramérica hacia Centro, Norteamérica y otros continentes. Por este motivo, se desarrollaron los narcosubmarinos.

“[...] cuyo número, desde una primera interceptación en 2006 por las autoridades estadounidenses, ha conocido una rápida progresión. El primer avistamiento se produjo en noviembre de 2006, cuando un patrullero de la Guardia Costera de EE.UU. detectó una forma desdibujada en el océano, a unas cien millas del litoral de Costa Rica. Cuando los agentes se acercaron descubrieron tres tubos de plástico que emergían del agua, que provenían de una nave sumergible que se abría paso a dos metros bajo la superficie. Dentro encontraron tres toneladas de cocaína y cuatro hombres armados con un fusil AK-47”. (Kropiwnicka, 2017).

Actualmente, los diseños de los sumergibles y semisumergibles están evolucionando de acuerdo a las nuevas necesidades y prioridades de estos grupos al margen de la ley. Sus requerimientos se basan en poder usar embarcaciones rápidas, con gran espacio de carga para el contrabando de sus mercancías ilícitas; sin embargo, al mismo tiempo no quieren llamar mucho la atención y construyen estos narcosubmarinos en las selvas colombianas. Su motor de propulsión puede ser a bordo o fuera de borda con diferentes diseños según la necesidad. Algunos diseños de construcción se observan en la Figura 2.

Los especialistas en submarinos y sistemas de subsuperficie reconocen los cuatro tipos de narcosubmarinos a los que se enfrentan los militares. Sutton, 2020 clasifica los narcosubmarinos en cuatro categorías principales. La primera, como se observa en la Figura 2, es una embarcación de perfil bajo con un motor a bordo de la embarcación. Este es el más antiguo de los tipos modernos y apareció por primera vez en 2005. Sigue siendo relevante en la actualidad, pero se ha vuelto menos común. Se conoce con el acrónimo LPV-IM (*Low Profile Vessel Inboard Motor* –buque de bajo perfil, con motor interno-). La segunda categoría se denomina perfil bajo, la característica que los define es que son muy largos y estrechos, con una proa que atraviesa las olas, en lugar de superarlas. Se les conoce como LPV-OM-VSV (*Low Profile Vessel, Out-board Motors, Very Slender Vessel* -embarcaciones de perfil bajo, motores fuera de borda, casco de embarcación estrecho-).

La tercera categoría es un híbrido entre semisumergible y lancha *go fast*, esta es la construcción más fácil y alcanza velocidades mayores, pero crea una embarcación menos sigilosa. Este modelo, popular desde 2016, es conocido como LVP-OM (*Low Profile Vessel, Outboard Motor* -embarcación de perfil bajo con motores exteriores-). La cuarta categoría

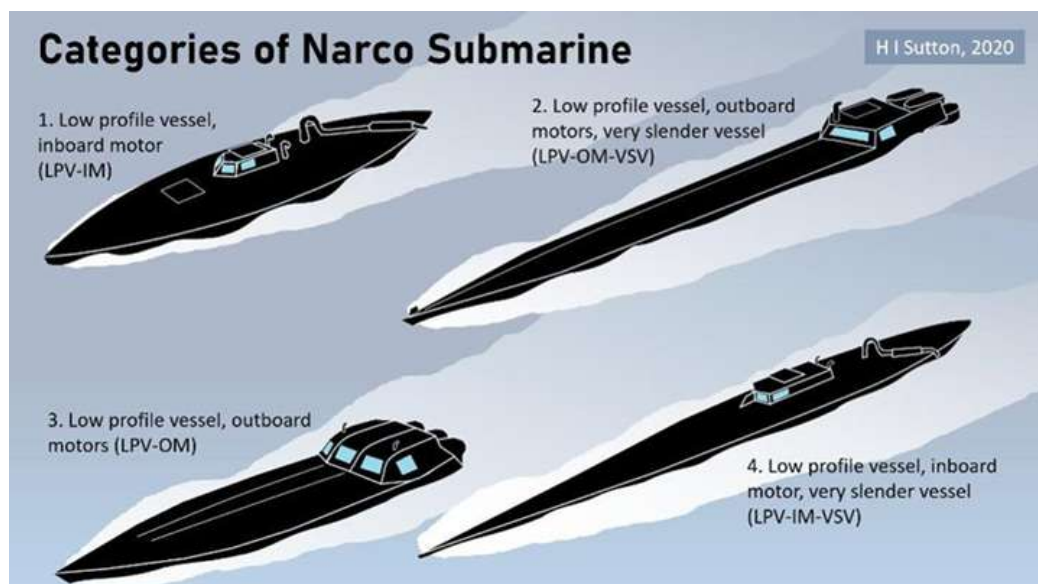


Figura 2. Categorías de los narcosubmarinos.

Fuente: (Sutton, 2020).

y más inusual es una embarcación muy esbelta con motor a bordo. Hasta ahora solo se ha interceptado una de esta categoría en el mar. Fue sacada del agua por la Armada de Colombia en enero de 2019. El concepto es muy sencillo, se toma la tradicional embarcación de perfil bajo con motor abordo y se le da un casco estrecho que se denomina por sus siglas en inglés *Very Slender Vessels* (VSV) o buques muy delgados. Esto reduce la carga útil, pero parece ser la configuración más silenciosa de todas. El objetivo principal es transportar la carga sin ser detectado, en el menor tiempo posible con el mayor sigilo posible.

Modalidades del narcotráfico

De acuerdo con el Informe Anual Narcotráfico Marítimo 2020 del CMCON, en la dinámica mundial del narcotráfico marítimo se evidencia que la mayor concentración de eventos ocurre en el continente americano.

“Estos eventos se presentaron con mayor intensidad entre la región del istmo de Panamá, en el mar de Balboa (océano Pacífico) y el mar Caribe (océano Atlántico). Los países de Centroamérica, Suramérica (Colombia, Ecuador y Perú), las Antillas Mayores y Menores son las zonas donde más se presentan eventos de narcotráfico marítimo donde las OCT buscan transportar las drogas ilícitas des-

de Colombia al mercado norteamericano donde los estupefacientes alcanzan un valor exponencial”. (CMCON, 2021, p.16).

De acuerdo con la Figura 3, en la modalidad de semisumergible LPV se incautaron más de 27 719 kg de estupefacientes, mientras en semisumergible 19 012 kg. En total de eventos se presentaron 24 y ocho, respectivamente, incautados durante el año 2020 a nivel mundial.

En el escenario de Colombia se presentaron 192 eventos en el 2020, para un total de 113 087 kilogramos de estupefacientes incautados. Del total, el 77.6 % correspondió a clorhidrato de cocaína (CHC), y 21.3 % a tetrahidrocannabinol (THC). El principal punto de salida de los estupefacientes es el departamento del Valle del Cauca, con el 30 % de las incautaciones (58 eventos). En el mapa de calor de la región de Colombia se observa la presencia de zonas en color amarillo, indicando eventos que ocurrieron con mediana intensidad. Las zonas que cambian a color rojo indican mayor incidencia de eventos.

En la Figura 4 se detallan las zonas con mayores registros en los litorales colombianos. La zona del Pacífico mantiene una incidencia alta de eventos, presentándose aún como una zona de convergencia entre la producción, acopio y plataforma de lanzamientos de estupefacientes hacia otros países (CMCON, 2021). De acuerdo con los últimos reportes, del primero enero al 7 octubre de 2021 la Fuerza Tarea Contra el Narcotráfico “Poseidón”,

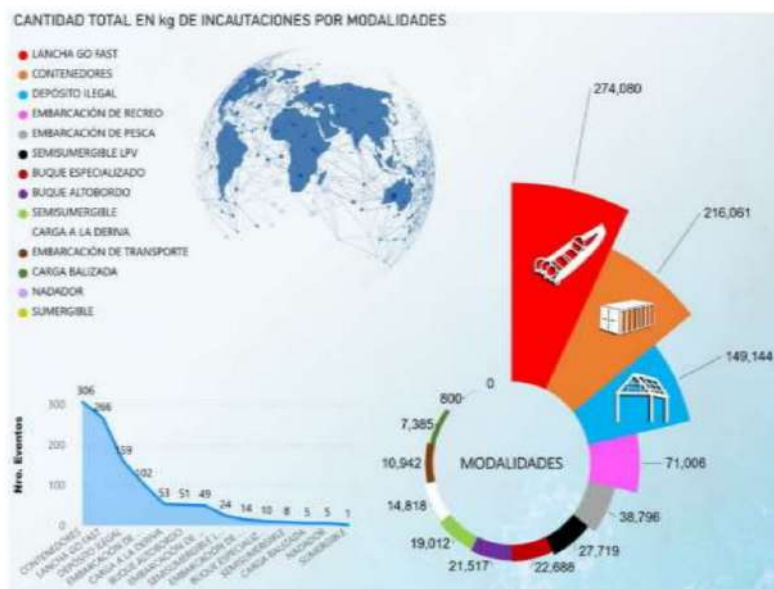


Figura 3. Cantidad de kilogramos incautados por modalidades

Fuente: (CMCON, 2021).



Figura 4. Mapa de calor de eventos en Colombia

Fuente: (CMCON, 2021).

con sede un Tumaco Nariño, ha incautado 23 semisumergibles y 137 lanchas cargadas con cocaína (Méndez, 2021).

En la zona del Caribe colombiano el Golfo de Urabá mantiene la mayor tasa de eventos, teniendo en cuenta su cercanía con Panamá, pues logran evadir los controles por parte de la Armada de Colombia de una manera más rápida. Los puertos de Cartagena y Santa Marta han presentado una tendencia al crecimiento de incautaciones detectadas por los organismos de la Armada y la Policía Nacional. En cuanto a los eventos de semisumergibles en el año 2020 se registraron 24 eventos, para un total de 27 719 kg de CHC incautados. Todos los eventos se registraron en la zona del Pacífico. En la siguiente figura se observan las modalidades que se presentaron en Colombia durante el año 2020, donde se evidencia que en la zona del Pacífico sur de Colombia se registra la mayor cantidad de eventos con semisumergibles, en los departamentos de Nariño, Cauca y Valle del Cauca, principalmente.



Figura 5. Modalidades en Colombia 2020

Fuente: (CMCON, 2021).

De acuerdo con los registros del CMCON, se observa que los depósitos ilegales, las lanchas *go fast*, los contenedores y las embarcaciones de pesca son las principales modalidades utilizadas por los traficantes en su logística. Se destaca que los eventos relacionados fueron eventos donde se logró la incautación de estupefacientes, sin embargo, hubo muchos eventos donde no se logró captura alguna, lo que mantuvo el negocio rentable para las OCT. Consecuentemente, la Armada de Colombia, por medio de sus unidades y componentes,

Tabla I. Información zonas de búsqueda.

Zona	Perímetro	Área	Probabilidad
A	263.3 MN	4 157 MN ²	40 %
B	288.7 MN	6 188 MN ²	35 %
C	360.6 MN	7 818 MN ²	25 %

debe perfeccionar los mecanismos de búsqueda y detección de las diferentes modalidades de narcotráfico marítimo, especialmente si tenemos en cuenta que de acuerdo con el Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” (IGAC) a Colombia le pertenece un área marítima de 928 660 km², de los cuales 339. 000 km² pertenecen a la costa Pacífica, un área muy extensa si tiene en cuenta que la mayoría de esta zona es patrullada por unidades de superficie a velocidades que oscilan entre los 8 a 20 nudos. Esto significa que el esfuerzo de búsqueda debe ser en zonas de mayor incidencia o probabilidad de encontrar embarcaciones al servicio del narcotráfico, y más específicamente embarcaciones como semisumergibles y sumergibles, los cuales tienen mayor dificultad de detección, pero transportan mayor cantidad de estupefacientes, lo que incrementa el impacto de las capturas.

Áreas de búsqueda

De acuerdo con las estadísticas presentadas y con el objetivo de probar la teoría de búsqueda, se establecieron tres zonas principales de búsqueda (A, B, C) donde se realizan patrullajes, teniendo en cuenta la información de inteligencia suministrada sobre la posible salida de un semisumergible hacia aguas panameñas o internacionales desde un área geográfica específica de la costa Pacífica de Colombia. Cada zona tiene probabilidades de detección de semisumergibles, estas cifras están dadas por el número de interceptaciones realizadas por las autoridades marítimas en las áreas de búsqueda. Dependiendo de la zona, la Armada de Colombia desplaza sus unidades desde lanchas guardacostas, buques de superficie, patrulleras costeras y el patrullero marítimo para cubrir una mayor distancia.

Se consideran las últimas estadísticas de captura o avistamiento de semisumergibles en las costas del Pacífico colombiano, por lo tanto se han establecido tres zonas principales como se aprecia en la Tabla I. Cada zona tiene su estadística de hallazgo de un semisumergible que haya salido de la costa o los manglares. En la tabla también se observa el perímetro y el área de cada zona dado en millas náuticas.

En la Figura 6 se observan las áreas o zonas de búsqueda en la costa Pacífica de Colombia, donde estos espacios demarcados se encuentran próximos a la Base Naval ARC “Málaga” y a las estaciones de guardacostas de Buenaventura y Tumaco. La Base Naval de Málaga cuenta con diferentes unidades de superficie como patrullero de zona marítima,



Figura 6. Zonas de búsqueda.

OPV (*Offshore Patrol Vessel*) y patrulleras tipo CPV (*Coastal Patrol Vessel*). Se cuenta con las estaciones de guardacostas de Buenaventura y Tumaco con la capacidad de lanchas y del Grupo Aeronaval del Pacífico, con su pista de aterrizaje en Juanchaco, que permite el apoyo de helicópteros o del patrullero aérea marítimo CN 235.

Patrullero marítimo CN-235

Este avión está equipado con el sistema de misión FITS, que consta de dos consolas a bordo. Este sistema, desarrollado por Airbus Military, consiste en un conjunto de procesadores y pantallas a bordo que gestionan y presentan a la tripulación los datos recogidos por los sensores instalados de forma eficiente.

También incorpora un radar de búsqueda para localizar y seguir a los buques, así como un sistema para su identificación mediante un transpondedor. La aeronave puede captar imágenes por televisión e infrarrojos, y cuenta con el equipo necesario para realizar grabaciones de vídeo digital y la posterior reproducción de las imágenes grabadas durante la misión. Entre las misiones de patrulla marítima militar para las que está capacitada esta aeronave se encuentran las de vigilancia de la zona económica exclusiva (ZEE), la pesca ilegal, la interdicción marítima, así como otras tareas de carácter cívico como la búsqueda y el salvamento.



Figura 7. CASA CN-235-200 M Persuader

Fuente: (?).

La velocidad de crucero de esta aeronave es de aproximadamente 180 nudos. Durante una interdicción marítima ya en curso, la aeronave puede reducir su velocidad a 130 nudos. Tiene un alcance de detección por radar de 180 MN, en el caso de la interdicción marítima de buques y semisumergibles el alcance es de 60 MN. El rango de visión de los observadores es de 20 MN a 30 MN a una altitud de 3 000 a 5 000 pies. Por lo tanto, cuanto menor sea la altitud menor será la distancia de detección de los observadores dentro del avión.

Teoría de búsqueda

Las primeras aplicaciones de la teoría de búsqueda se produjeron durante la Segunda Guerra Mundial. En la batalla por el Atlántico, en la época en que los Aliados estaban perdiendo la guerra contra los famosos submarinos que tenían los alemanes denominados U-Boats, abreviatura del alemán *Unterseeboot* (nave submarina). Esta denominación se le daba a los sumergibles y submarinos durante las dos guerras mundiales. Estas embarcaciones fueron usadas contra blancos de superficie, pero especialmente se usaron para hundir convoyes mercantes y efectuar bloqueos navales a otros países. Quien sufrió más con esta modalidad fue principalmente el Reino Unido, pues al ser geográficamente una isla dependía de varios suministros que llegaban en barcos mercantes los cuales eran hundidos por estos submarinos.

El rápido aumento de estas embarcaciones por parte de los alemanes se dio desde el primero de septiembre de 1939, donde la Deutsche Marine contaba con 57 sumergibles, y

hasta el 8 de mayo 1945, la máquina de guerra de Adolf Hitler puso en servicio otros 1 113 sumergibles y submarinos. Para esa misma fecha la *U-Bootwaffen* logró hundir más de 2 779 buques de carga y petroleros, y más de 100 destructores, fragatas, portaviones y cruceros, entre otros. De esta amenaza surgió la necesidad de buscar eficazmente estos submarinos o U-Boats. De ahí nació la teoría de búsqueda. Una definición de teoría de búsqueda dada por Karatas en su estudio de dos modelos básicos de búsqueda es:

"La teoría de la búsqueda, que básicamente implica los problemas relacionados con la búsqueda de un objeto de interés que se ha perdido o desaparecido, tiene numerosas aplicaciones en diversos campos desde hace décadas. La base matemática de la teoría de la búsqueda ha sido objeto de estudio serio desde la Segunda Guerra Mundial". (Karatas, 2012).

Otra definición de la teoría de la búsqueda es el estudio de cómo emplear de forma más eficaz los recursos limitados cuando se intenta encontrar un objeto cuya ubicación no se conoce con precisión (?). La teoría de la búsqueda ha sido útil para muchas aplicaciones, Koopman, 1999 en su libro *Search and Screening, General Principles with Historical Applications*, citado por Karatas, 2012, menciono:

"Desde entonces, la teoría de la búsqueda ha jugado un papel importante en aplicaciones militares y no militares. Se utiliza ampliamente para cosas como los depósitos de minerales, las operaciones de búsqueda y rescate (SAR), las operaciones de interdicción policial, el reconocimiento de patrones, la enfermedad o la contaminación, los diagnósticos médicos y los mercados". (Koopman, 1999) citado por (Karatas, 2012).

Koopman definió las bases sobre la teoría de búsqueda con trabajos de campo realizados para la marina de los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. Este trabajo contribuyó de manera exitosa a la victoria en la batalla del Atlántico contra los submarinos alemanes (Romero, 2020).

Algunas de estas aplicaciones pueden implicar operaciones de búsqueda en las que participen unidades militares, como la búsqueda para la interdicción de drogas en un área determinada, o pesca ilegal y contrabando, como cita el capitán de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF), Gregory Carl, 2003, en su tesis *Teoría de Búsqueda y U-boats en la Bahía de Vizcaya*:

"Las operaciones militares que pueden beneficiarse del análisis de patrones de búsqueda ofensiva desde el aire incluyen la interdicción de drogas, la búsqueda de áreas extensas en busca de violaciones de los tratados de control de armas

y la caza de lanzadores móviles de misiles Scud, grupos de combate terroristas, contrabandistas y fuerzas opositoras en terrenos escarpados".

Por lo tanto, como cita [Brian Haley, 1991](#) en el documento *Applications of Search Theory*:

"La teoría de la búsqueda se ocupa de un observador que busca un objetivo. En los primeros tiempos, a menudo se trataba de un avión o un barco que buscaba otro barco o un submarino. Más recientemente, el término 'búsqueda' se ha utilizado en relación con el proceso matemático de búsqueda de un objetivo".

En este artículo se trata de optimizar la búsqueda para obtener el resultado deseado en el menor tiempo posible, con el fin de optimizar los recursos.

Las siguientes aplicaciones pueden clasificarse en tres problemas principales de búsqueda: patrulla de barrera, cobertura de puntos y búsqueda de áreas. En una patrulla de barrera el adversario (o el objetivo) tiene una misión en específico de acercarse a un puerto, base o plataforma de alto valor. Para evitar que el adversario cumpla su misión el buscador debe desplegar los sensores de forma que la probabilidad de detección sea máxima. En lugar de establecer una travesía hacia un único lugar, en los escenarios de cobertura puntual hay que proteger múltiples puntos de interés. Por lo tanto, los sensores se despliegan en las proximidades de estos puntos de interés, mientras que el resto del área permanece relativamente vacía de sensores. Los escenarios de búsqueda de área consisten en que un área general del océano está cubierta por un campo de sensores (?); citado por ([Golen, 2009](#)).

El objetivo del blanco que buscamos puede variar en función de las intenciones. Siendo un objetivo que no quiere ser encontrado y actuar de forma no cooperativa, como es el caso de las interdicciones marítimas por narcotráfico. Así como puede ser uno neutral o quizás un objetivo que está a la deriva y quiere ser rescatado (búsqueda y rescate). Para este artículo se tiene una búsqueda ofensiva, ya que los semisumergibles no desean ser encontrados, además pueden actuar de forma belicosa o no cooperativa ante la interdicción.

El capitán [Gregory Carl, 2003](#) menciona en su tesis:

"Hay que distinguir entre los esfuerzos de búsqueda y rescate (SAR) y las operaciones de búsqueda ofensiva. Quizá una de las extensiones más lógicas de las operaciones de búsqueda ofensiva sea la interdicción de drogas. A diferencia de los vuelos de búsqueda especializados para emboscar a objetivos esquivos y no cooperativos, las autoridades hacen hincapié en la fusión de una serie de elementos que incluyen información de inteligencia, redes de alerta por radar, aviones militares y equipos terrestres de la policía de interdicción especializados".

Para este estudio el objeto de interés se llamará objetivo, mientras que el buscador tiene como finalidad encontrar ese objetivo. La eficacia de la búsqueda se mide en la capacidad

del observador para identificar el objetivo. Se pueden tener en cuenta otras consideraciones como la velocidad de búsqueda y las condiciones de visibilidad del entorno. Una velocidad baja reduce el área que se puede cubrir en un tiempo determinado, por lo que se reduce la probabilidad de encontrar el objetivo.

Esto lleva a tener en cuenta una serie de variables que tiene el buscador a la hora de detectar el objetivo. Es habitual aproximar la capacidad media de un buscador para detectar un objetivo concreto bajo un conjunto específico de condiciones ambientales, con el fin de facilitar la modelización analítica del proceso de búsqueda. “La aproximación más sencilla es la de una ley de alcance definida: los objetivos que se acercan a una determinada distancia del buscador siempre se detectan, y los objetivos que no se acercan tanto nunca se detectan”. (Karatas, 2012). Para ello se utiliza el concepto de curva de alcance lateral. Un sensor tiene una probabilidad de detección (POD) frente a la distancia a la que el sensor es capaz de rastrear el objetivo.

En la Figura 8 se observa la muestra de las curvas de alcance lateral. La anchura de barrido “es el área bajo la curva de alcance lateral, y se utiliza como medida de la eficacia de búsqueda de un sensor determinado” (Koopman, 1999, p. 65). A medida que el alcance lateral, representado en millas náuticas, es mayor la probabilidad de detección es menor. Pero si el alcance lateral es menor, la probabilidad de detección es mayor. Estos dos conceptos se unen como menciona Gregory Carl, 2003 en su tesis:

“Inherente al concepto de anchura de barrido está el uso de la ley de alcance definido, cuya base es que no existe ninguna probabilidad de detectar objetivos fuera del alcance especificado, mientras que los objetivos dentro del alcance especificado se detectan con certeza”.

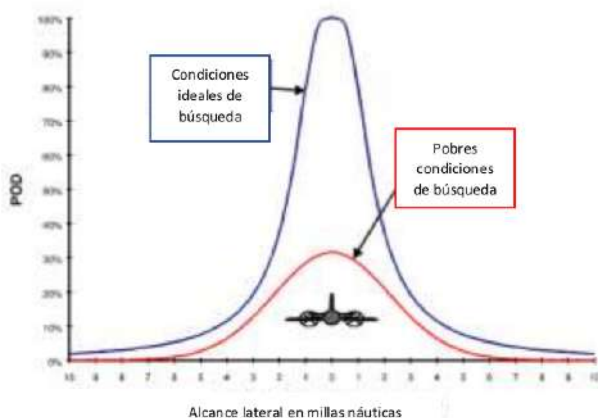


Figura 8. Muestra de curvas de alcance lateral

Para las unidades de detección se determina como R_m el alcance máximo al que el observador puede detectar un objetivo en las condiciones existentes utilizando un sensor particular. Para el problema planteado se convierte la curva de alcance lateral en el ancho de barrido o ancho de búsqueda.

El área bajo la curva es la misma para el área de la anchura de búsqueda (rectángulo de color rojo). Si el objetivo está dentro de la anchura de búsqueda (W) será encontrado, pero si está fuera de la anchura de búsqueda, no será hallado. Por lo tanto, la probabilidad de detección se toma como uno dentro de la anchura de búsqueda y cero en el resto (Trevor, 2020). Los resultados se presentan en la Tabla II, donde se obtiene el área bajo la curva y también el área del rectángulo dado el nuestro ancho de barrido o detección para todas las unidades utilizadas para la interdicción marítima (CN235, OPV, CPV, URR). El área bajo la curva está dada por la fórmula:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (1)$$

Donde, X es la anchura de búsqueda o R_m . Por medio de la fórmula mencionada anteriormente se obtiene el ancho de barrido, teniendo en cuenta que el área para un rectángulo es base*altura. En este caso la altura es 1, por la probabilidad de detección, el ancho determinará el ancho de búsqueda. El radio de detección de las unidades está dado por el alcance de los sensores y radares de búsqueda.

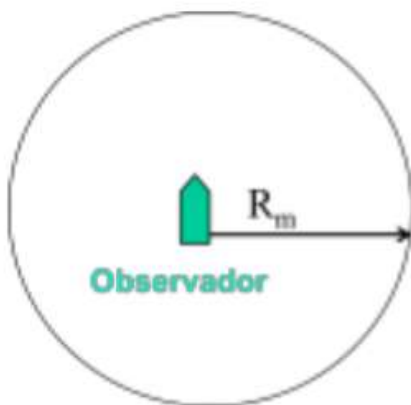


Figura 9. Alcance del observador.

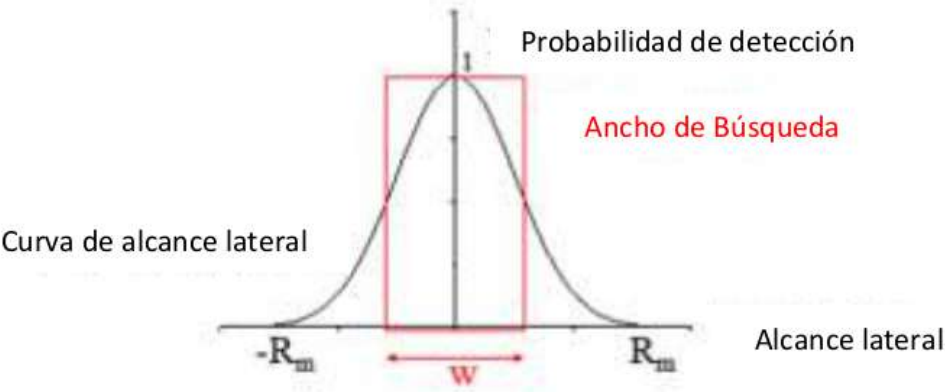


Figura 10. Ancho de búsqueda

Fuente: (Trevor, 2020).

Tabla II. Ancho de búsqueda de las unidades.

Unidad	Rm (MN)	Ancho de búsqueda
CN 235	60	51.5
OPV	45	38
CPV	24	20.5
URR	2	1.7

Modelo de búsqueda aleatoria

La búsqueda aleatoria desempeña un papel fundamental en la teoría de la búsqueda. Esta sigue una distribución exponencial, donde se llama POD a la probabilidad de detección, $POD = 1 - e^{-c}$, donde C es la tasa de cobertura. Si se busca en un área de tamaño “ A ” durante un periodo de tiempo “ t ” con un buscador de velocidad “ v ” y anchura de barrido “ w ”, entonces la tasa de cobertura es:

$$c = \frac{\text{Área efectiva barrida}}{\text{Área de búsqueda}} = \frac{vwt}{A} \tag{2}$$

La búsqueda aleatoria se caracteriza por la propiedad sin memoria de esa distribución. Esto es coherente con la intuición en el sentido de que el tiempo que un buscador ha estado buscando para detectar un objetivo no influye en la probabilidad de detección posterior (Gregory Carl, 2003). Por lo tanto, cada unidad se emplea de forma aleatoria en los distintos campos de interés, para este caso zonas de búsqueda.

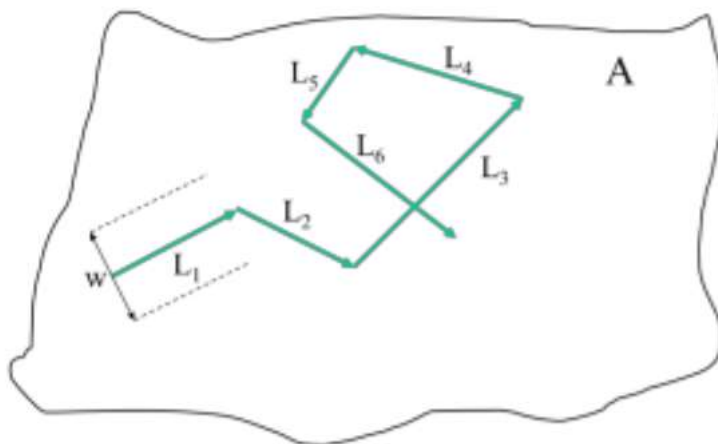


Figura 11. Búsqueda aleatoria en un área determinada.

Fuente: (Trevor, 2020).

La fórmula está dada por:

$$POD = 1 - e^{-\frac{wl}{A}}, \quad \text{donde } l = v \cdot t; \quad \text{velocidad} \cdot \text{tiempo} \quad (3)$$

Si $L = L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6$ entonces: Probabilidad de detección = $1 - \exp\{-wL/A\}$ Un buscador tiene una tasa de detección c , por tal motivo n buscadores tienen una tasa de detección $n \cdot c$.

En el modelo de búsqueda aleatoria ofrece una probabilidad más realista de detección del objetivo que si se toma simplemente el factor de cobertura global. También resuelve los problemas de duplicación de la ruta de búsqueda.

Modelo de búsqueda exhaustiva

Otro tipo de búsqueda es el modelo de búsqueda exhaustiva, ampliamente utilizado en la teoría de la búsqueda y, como menciona Karatas, 2012 en su artículo ‘Una comparación analítica de una búsqueda aleatoria y exhaustiva de un área en expansión con sensores binarios’, el modelo de búsqueda exhaustiva representa:

“[...] el objetivo se esconde en algún lugar de un área A y el buscador realiza una búsqueda perfecta. No hay solapamiento de búsqueda (cada punto de A se busca una vez antes de que cualquier punto se busque dos veces), no se realiza

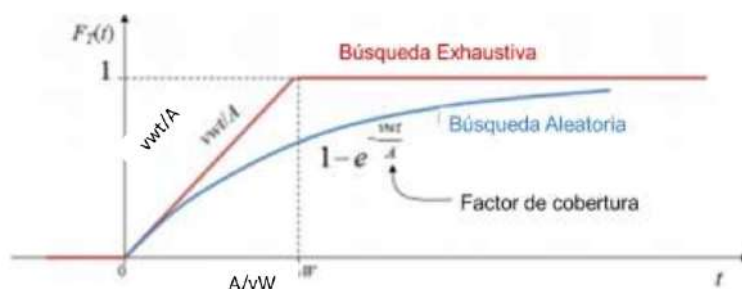


Figura 12. Comparación de búsqueda exhaustiva y aleatoria para un área fija "A".

ninguna búsqueda fuera del área A y toda el área A está cubierta por el sensor del buscador".

Este tipo de búsqueda es menos probable ya que al momento de realizarse la detección de embarcaciones ilícitas se suele patrullar por zonas donde ya se realizó la búsqueda, además en algunas ocasiones ciertas áreas se cubren nuevamente por los sensores cuando el buscador realiza un giro o cambio de rumbo.

Una comparación entre estos dos métodos es en una búsqueda aleatoria, la probabilidad de detección es igual a $1 - \exp(-\text{factor de cobertura})$ ya que el esfuerzo se gasta con un solapamiento inútil en la zona. En la búsqueda exhaustiva la probabilidad de detección es igual al factor de cobertura, ya que el esfuerzo se realiza de forma ideal en la zona. La búsqueda aleatoria suele considerarse un límite inferior para el esfuerzo de búsqueda. La búsqueda exhaustiva es un límite superior en la eficacia de la búsqueda (Washburn, 2002). Una búsqueda real suele situarse entre estos dos métodos.

Se reporta el análisis de los resultados obtenidos al aplicar ambos métodos al problema de búsqueda de sumergibles. Se tendrá en cuenta la velocidad de las unidades y el rango de detección de sus sensores, tal y como se ha mencionado anteriormente en la capacidad de la unidad. El tiempo de los resultados será de una hora de búsqueda en cada zona (Tabla III).

Analizando la Tabla III se observa cómo el patrullero marítimo CN 235 cubre toda la zona A y B prácticamente en una hora y el 85.6 % de la zona C en el método exhaustivo. Sin embargo, en el método aleatorio mantiene un 80 %, 66 % y 57 % en cada zona. En cuanto a la patrullera OPV alcanza un máximo del 19 % en la búsqueda exhaustiva para la zona A. Mientras en la búsqueda aleatoria alcanza un 17.5 % para la misma zona A. Así se observa cada una de las unidades con la probabilidad de encontrar el objetivo, asumiendo que se encuentre un semisumergible en el área de búsqueda. Como era de esperarse, entre mayor velocidad y área de búsqueda, mayor será la probabilidad de detección en cada una de las

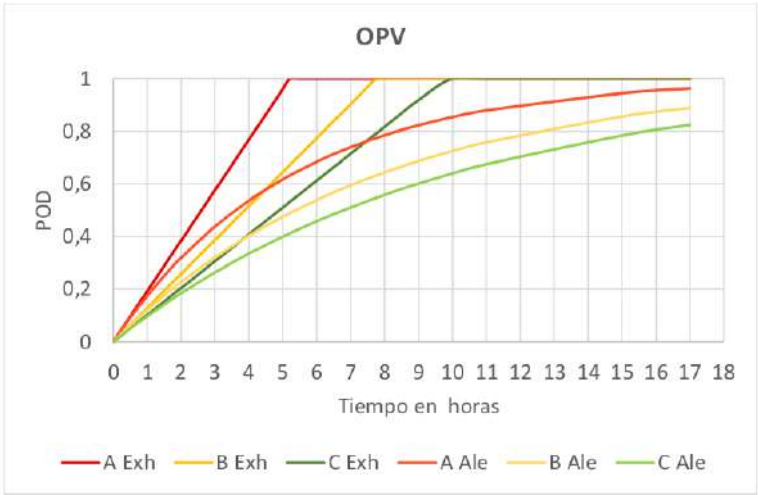


Figura 13. Búsquedas aleatorias y exhaustiva OPV.

zonas.

Adicionalmente, se estudió la unidad OPV y se realizó un análisis. Teniendo en cuenta ambos métodos y aplicando cada fórmula, se compararán las tres zonas y se comprobará si coincide con la Figura 12. Para ello se tomaron los diferentes tiempos desde 1 minuto de búsqueda hasta 17 horas continuas de búsqueda hacia el objetivo en cada zona. Los resultados se observan en la Figura 13. Los resultados para analizar el gráfico se recogen en la Tabla IV.

Analizando la Figura 13 se observa cómo se evidencian ambos métodos: búsqueda exhaustiva (Exh) y aleatoria (Ale). Esta gráfica corresponde con la Figura 12. Cada zona está definida por el límite superior, el modelo de búsqueda exhaustiva (Exh) y el límite inferior el modelo de búsqueda aleatoria (Ale). Cualquier búsqueda realizada en estas áreas debe estar en medio de ambas líneas. Además, con este gráfico se obtienen más datos ampliando

Tabla III. Resultados de búsqueda en las zonas.

	V (MN)	W (MN)	T (hr)	Búsqueda exhaustiva			Búsqueda aleatoria		
				A	B	C	A	B	C
CN 235	130	51.5	1	1.611	1.082	0.856	0.800	0.661	0.575
OPV	21	38	1	0.192	0.129	0.102	0.175	0.121	0.097
CPV	19	20.5	1	0.094	0.063	0.050	0.089	0.061	0.049
URR	45	1.7	1	0.018	0.012	0.010	0.018	0.012	0.010

Tabla IV. Búsqueda exhaustiva (Exh) y aleatoria (Ale) aplicada a la OPV, resultados de la Figura 13.

T (horas)	A (Exh)	B (Exh)	C (Exh)	A (Ale)	B (Ale)	C (Ale)
0,01	0,0019	0,0013	0,0010	0,0019	0,0013	0,0010
0,05	0,0096	0,0064	0,0051	0,0096	0,0064	0,0051
0,1	0,0192	0,0129	0,0102	0,0190	0,0128	0,0102
0,15	0,0288	0,0193	0,0153	0,0284	0,0192	0,0152
0,2	0,0384	0,0258	0,0204	0,0377	0,0255	0,0202
0,25	0,0480	0,0322	0,0255	0,0469	0,0317	0,0252
0,5	0,0960	0,0645	0,0510	0,0915	0,0624	0,0498
0,8	0,1536	0,1032	0,0817	0,1424	0,0980	0,0784
1	0,1920	0,1290	0,1021	0,1747	0,1210	0,0970
1,5	0,2879	0,1934	0,1531	0,2502	0,1759	0,1420
2	0,3839	0,2579	0,2041	0,3188	0,2273	0,1847
2,8	0,5375	0,3611	0,2858	0,4158	0,3031	0,2486
3	0,5759	0,3869	0,3062	0,4378	0,3208	0,2638
3,5	0,6719	0,4514	0,3573	0,4893	0,3632	0,3004
4	0,7679	0,5158	0,4083	0,5360	0,4030	0,3352
4,4	0,8446	0,5674	0,4491	0,5703	0,4330	0,3618
5	0,9598	0,6448	0,5104	0,6170	0,4752	0,3997
5,2	0,9982	0,6706	0,5308	0,6315	0,4886	0,4119
5,5	I	0,7093	0,5614	0,6521	0,5080	0,4296
6	I	0,7738	0,6124	0,6839	0,5387	0,4580
6,5	I	0,8382	0,6635	0,7129	0,5675	0,4849
7	I	0,9027	0,7145	0,7391	0,5945	0,5106
7,5	I	0,9672	0,7655	0,7630	0,6199	0,5349
7,7	I	0,9930	0,7860	0,7719	0,6295	0,5443
8	I	I	0,8166	0,7847	0,6436	0,5581
8,25	I	I	0,8421	0,7948	0,6549	0,5692
8,5	I	I	0,8676	0,8044	0,6658	0,5800
9	I	I	0,9186	0,8223	0,6867	0,6009
10	I	I	I	0,8533	0,7246	0,6397
11	I	I	I	0,8790	0,7579	0,6746
15	I	I	I	0,9438	0,8555	0,7837
17	I	I	I	0,9617	0,8883	0,8236

el análisis de la búsqueda de objetivos con el buque OPV.

Asignación de recursos

Uno de los objetivos de la asignación de recursos es "desplegar los activos de búsqueda para maximizar la probabilidad de localización el objeto de búsqueda con los recursos disponibles" (?). Al momento de destacar cualquiera unidad de la marina, estos componentes sean aéreos o marítimos tienen unos gastos asociados. En algunas ocasiones la limitación de las unidades aéreas se refleja en solo unas horas de uso o autonomía, por lo que se requiere aprovechar al máximo los recursos disponibles en encontrar la modalidad usada por las OCT.

Para determinar la asignación de recursos se tomará como unidad central el patrullero marítimo CN 235. Esta unidad, gracias a su velocidad, puede detectar el objetivo de búsqueda más acuciosamente que las demás unidades. Si se detecta el objetivo, el avión avisará a las unidades cercanas o al centro de operaciones para que envíen una unidad de interdicción marítima para capturar la embarcación. El esfuerzo de búsqueda, tal y como se utiliza aquí, se define como la distancia (L) recorrida por una plataforma de búsqueda mientras busca en una zona geográfica definida. Si se conoce la velocidad media (v) de la plataforma mientras realiza la búsqueda, y el tiempo (t) empleado en la operación, entonces el esfuerzo (L) puede calcularse mediante la fórmula $L = v \cdot t$. (?).

Para este problema se tienen tres zonas, como se ha visto anteriormente, que suman un área total de 18 163 MN. La velocidad del patrullero marítimo es de 130 MN/h y el tiempo de búsqueda del objetivo en las tres zonas será la autonomía de vuelo del avión, en este caso de 9 horas. Por lo tanto, nuestro esfuerzo total de búsqueda es $L = 9 \cdot 130 = 1170$, y esto debe dividirse en la longitud de la trayectoria total de las áreas de búsqueda, L_i en cada subzona i para maximizar la probabilidad de detectar el objetivo. Nuestra anchura de búsqueda es de 51.5 MN. En la Tabla I se encuentra la probabilidad y área en cada zona.

Por lo tanto, la probabilidad de detección está dada por la fórmula:

$$PoD = p_1 \left[1 - e^{-\frac{wl_1}{a_1}} \right] + p_2 \left[1 - e^{-\frac{wl_2}{a_2}} \right] + p_3 \left[1 - e^{-\frac{wl_3}{a_3}} \right] \quad (4)$$

Donde p_1 , p_2 y p_3 representan la probabilidad de detección en cada área y L está dada por la sumatoria de l_1 , l_2 y l_3 .

Por lo tanto, se tiene la optimización de la asignación de recursos así:

$$Max \ p_1 \left[1 - e^{-\frac{wl_1}{a_1}} \right] + p_2 \left[1 - e^{-\frac{wl_2}{a_2}} \right] + p_3 \left[1 - e^{-\frac{wl_3}{a_3}} \right] \quad (5)$$

$$\text{Sujeto a : } L = l_1 + l_2 + l_3$$

Para maximizar esta función se utilizan los multiplicadores de LaGrange:

“El método de los multiplicadores de LaGrange es una estrategia para encontrar los máximos y mínimos locales de una función sujeta a restricciones de igualdad; es decir, sujeta a la condición de que una o más ecuaciones tienen que ser satisfechas exactamente por los valores elegidos de las variables”. ([Khan Academy, 202](#)).

Es decir, es un procedimiento para encontrar los máximos y mínimos de funciones de múltiples variables sujetas a restricciones. Por lo tanto, a la fórmula de este estudio se le adicionan nuevas variables escalares desconocidas, una para cada restricción. Estas son llamadas multiplicadores de LaGrange.

$$p1 \left[1 - e^{-\frac{wl1}{a1}} \right] + p2 \left[1 - e^{-\frac{wl2}{a2}} \right] + p3 \left[1 - e^{-\frac{wl3}{a3}} \right] + \lambda(l1 + l2 + l3 - L) \quad (6)$$

Siguiendo para maximizar esta ecuación, se diferencian a $l1$, $l2$, $l3$ y λ .

$$\frac{\partial}{\partial l1} = p1 \cdot \frac{w}{a1} \cdot e^{-\frac{wl1}{a1}} + \lambda \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial l2} = p2 \cdot \frac{w}{a2} \cdot e^{-\frac{wl2}{a2}} + \lambda \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial l3} = p3 \cdot \frac{w}{a3} \cdot e^{-\frac{wl3}{a3}} + \lambda \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} = l1 + l2 + l3 - L \quad (10)$$

Ahora se establecen las derivadas a cero. Así se tiene:

$$p1 \cdot \frac{w}{a1} \cdot e^{-\frac{wl1}{a1}} + \lambda = p2 \cdot \frac{w}{a2} \cdot e^{-\frac{wl2}{a2}} + \lambda = p3 \cdot \frac{w}{a3} \cdot e^{-\frac{wl3}{a3}} + \lambda \quad (11)$$

Se igualan las ecuaciones encontrando $L1$ en términos de $L2$ y $L3$. De ahí que se obtiene el siguiente resultado

$$l1 = \frac{l2A1}{A2} + y1 \quad (12)$$

$$l1 = \frac{l3A1}{A3} + y2 \quad (13)$$

Para la primera ecuación se expresa $L2$ en términos de L , despejando de la ecuación $L=l1+l2+l3$ y en la misma fórmula; se expresa $L3$ en términos de $L1$. Así se tienen todas las

ecuaciones expresadas en términos de L y L_1 . Finalmente, se despeja L_1 y estará en términos de L . Así se obtiene el valor de L y las áreas de las zonas. Se puede hallar L_1 sustituyendo los valores en la fórmula.

$$l_1 = \frac{(L - l_1 - l_3)A_1}{A_2} + y_1 \quad (14)$$

$$l_1 = \frac{A_1L - A_1L_1 - A_1L_3}{A_2} + y_1 \quad (15)$$

$$l_1 = \frac{A_1L - A_1L_1 - A_1((A_3L_1 - Y_2A_3)/A_1)}{A_2} + y_1 \quad (16)$$

$$l_1 = \frac{A_1L - A_1L_1 - A_3L_1 + Y_2A_3}{A_2} + y_1 \quad (17)$$

$$l_1 = \frac{A_1L - A_1L_1 - A_3L_1 + Y_2A_3 + Y_1A_2}{A_2} \quad (18)$$

$$l_1A_2 = A_1L - A_1L_1 - A_3L_1 + Y_2A_3 + Y_1A_2 \quad (19)$$

$$A_1L_1 + A_2L_1 + A_3L_1 = A_1L + Y_2A_3 + Y_1A_2 \quad (20)$$

$$l_1(A_1 + A_2 + A_3) = A_1L + Y_2A_3 + Y_1A_2 \quad (21)$$

$$l_1 = \frac{(A_1L + Y_2A_3 + Y_1A_2)}{(A_1 + A_2 + A_3)} \quad (22)$$

Ahora a partir de la ecuación.

$$l_1 = \frac{l_2A_1}{A_2} + y_1 \quad (23)$$

Se despeja L_2 para que esté en términos de L_1 . De este modo se tiene:

$$l_2 = \frac{l_1A_2 - Y_1A_2}{A_1} \quad (24)$$

Asimismo, para L_3 , puesto que ya tenemos L_1 y L_2 . Por lo tanto, $L_3 = L - L_1 + L_2$. Por último, se tienen las dos variables Y_1 y Y_2 .

$$Y_1 = A_1 \cdot \frac{\log_e \left(\frac{p_1 \cdot A_2}{p_2 \cdot A_1} \right)}{w} \quad (25)$$

$$Y2 = A1 \cdot \frac{\log_e \left(\frac{p1 \cdot A3}{p3 \cdot A1} \right)}{w} \quad (26)$$

Para el problema de asignación de recursos, ya que se tienen todas las variables, se resuelven las ecuaciones para encontrar la búsqueda óptima en cada zona dada la probabilidad en cada área de búsqueda. Cabe mencionar que la anchura de búsqueda w es de 51,5 MN, las áreas y probabilidad están dadas en la Tabla I y $L=1170$. Se resuelven las ecuaciones encontrado $L1$, $L2$ y $L3$. Para ello, primero se resuelven las ecuaciones para encontrar $Y1$ y $Y2$ así:

$$Y1 = A1 \cdot \frac{\log_e \left(\frac{p1 \cdot A2}{p2 \cdot A1} \right)}{w} \quad (27)$$

$$Y1 = 4157 \cdot \frac{\log_e \left(\frac{0,4 \cdot 6188}{0,35 \cdot 4157} \right)}{51,5} \quad (28)$$

$$Y1 = 42,88 \quad (29)$$

Luego se resuelve $Y2$:

$$Y2 = A1 \cdot \frac{\log_e \left(\frac{p1 \cdot A3}{p3 \cdot A1} \right)}{w} \quad (30)$$

$$Y2 = 4157 \cdot \frac{\log_e \left(\frac{0,4 \cdot 7818}{0,25 \cdot 4157} \right)}{51,5} \quad (31)$$

$$Y2 = 88,92 \quad (32)$$

Una vez encontrado los valores de $Y1$ y $Y2$, se resuelve la ecuación:

$$L1 = \frac{(A1L + Y2A3 + Y1A2)}{(A1 + A2 + A3)} \quad (33)$$

$$L1 = \frac{(4157 \cdot 1170 + 88,92 \cdot 7818 + 42,88 \cdot 6188)}{(4157 + 6188 + 7818)} \quad (34)$$

$$l_1 = 320,668 \quad (35)$$

Encontrando L_1 , se remplace en la ecuación para encontrar L_2 :

$$l_2 = \frac{l_1 A_2 - Y_1 A_2}{A_1} \quad (36)$$

$$l_2 = \frac{320,6 \cdot 6188 - 42,88 \cdot 6188}{4157} \quad (37)$$

$$l_2 = 413,493 \quad (38)$$

Por último, se remplace L_1 y L_2 en la ecuación para encontrar L_3 :

$$l_3 = L - (l_1 + l_2) \quad (39)$$

$$l_3 = 1170 - (320,668 + 413,493) \quad (40)$$

$$l_3 = 435,839 \quad (41)$$

Los resultados obtenidos se observan en la Tabla V.

Tabla V. Resultados búsqueda óptima.

Zona	Área (A_i)	Probabilidad (P_i)	P_i/A_i	Búsqueda óptima (L_i)
$A_1 (L_1)$	4 157 MN ²	0.40	0.00009622	320.66
$B_2 (L_2)$	6 188 MN ²	0.35	0.00005656	413.49
$C_3 (L_3)$	7 818 MN ²	0.25	0.00003198	435.83
	18 163 MN ²	100 %		1170

Por lo tanto, la probabilidad de detección está dada por:

$$P_{oD} = p_1 \left[1 - e^{-\frac{wl_1}{a_1}} \right] + p_2 \left[1 - e^{-\frac{wl_2}{a_2}} \right] + p_3 \left[1 - e^{-\frac{wl_3}{a_3}} \right] \quad (42)$$

Remplazando los valores de L_1 , L_2 y L_3 se obtiene:

$$P_{oD} = 0,40 \left[1 - e^{-\frac{51,5 \cdot 320,66}{4157}} \right] + 0,35 \left[1 - e^{-\frac{51,5 \cdot 413,49}{6188}} \right] + 0,25 \left[1 - e^{-\frac{51,5 \cdot 435,83}{7818}} \right] \quad (43)$$

$$PoD = 0,3924 + 0,3387 + 0,2358 = 0,9669 \quad (44)$$

La probabilidad de detección es de 96.6 % de encontrar un semisumergible en estas áreas de búsqueda. Los resultados señalan que se debe realizar una búsqueda óptima de 320 para la zona A, 413 para la zona B y 435 para la zona C. Por lo tanto, el avión patrullero marítimo buscará el objetivo durante 148 minutos en la zona A, 191 minutos en la zona B y 201 minutos en la zona C para un vuelo total de 540 minutos o 9 horas. Los minutos obtenidos en cada zona fueron encontrados por medio de la ecuación $L = v \cdot t$, al tener L y la velocidad del patrullero, despejamos para obtener el tiempo de vuelo en cada zona. Estos tiempos representan la asignación de recursos máximo que se debe desempañar en la búsqueda del semisumergible en cada área de búsqueda, teniendo en cuenta la probabilidad de encontrar una embarcación ilegal y el área de cada zona de interés. Los tiempos representan la probabilidad máxima en cada zona, distribuyendo el tiempo total de las horas de vuelo.

Si se realiza el mismo ejercicio, pero esta vez se considera la duración de vuelo por parte del patrullero marítimo de 3 horas, la variable L cambiaría a: $L = v \cdot t$, $L = 130 \cdot 3 = 390$. Aplicando los datos en las ecuaciones se obtendrán los siguientes resultados:

Tabla VI. Resultado búsqueda óptima con 3 horas de vuelo.

Zona	Área (Ai)	Probabilidad (Pi)	Pi/Ai	Búsqueda óptima (Li)
A ₁ (L ₁)	4 157 MN ²	0.40	0.00009622	142.15
B ₂ (L ₂)	6 188 MN ²	0.35	0.00005656	147.75
C ₃ (L ₃)	7 818 MN ²	0.25	0.00003198	100.1
	18 163 MN ²	100 %		390

Por lo tanto, la probabilidad de detección es:

$$PoD = p1 \left[1 - e^{-\frac{wl1}{a1}} \right] + p2 \left[1 - e^{-\frac{wl2}{a2}} \right] + p3 \left[1 - e^{-\frac{wl3}{a3}} \right] \quad (45)$$

$$PoD = 0,40 \left[1 - e^{-\frac{51,5 \cdot 142,15}{4157}} \right] + 0,35 \left[1 - e^{-\frac{51,5 \cdot 147,35}{6188}} \right] + 0,25 \left[1 - e^{-\frac{51,5 \cdot 100,1}{7818}} \right] \quad (46)$$

$$PoD = 0,6992 \quad (47)$$

Los resultados cambiaron como se esperaba, ahora la probabilidad de detección es del 69.92 %, y la búsqueda óptima en cada zona es 142.15 para la zona A; 147.75 para la zona B, y 100.1 para la zona C. Se puede concluir que el avión marítimo debe buscar el objetivo 65 minutos en la zona A, 68 minutos en la zona B y, finalmente, 47 minutos en la zona C, para



Figura 14. Captura de semisumergible en octubre de 2020, costa Pacífica colombiana.

Fuente: (Armada de Colombia, 2020).

un total de 180 minutos o 3 horas de vuelo. Cabe resaltar que estos tiempos representan el lapso máximo que debe permanecer el patrullero marítimo en cada área de búsqueda con el fin de optimizar los 180 minutos, logrando obtener la mayor probabilidad de detección, de acuerdo con la probabilidad de encontrar un semisumergible en cada zona de interés. Si se cumple con estos parámetros, la probabilidad total de encontrar la embarcación es de 69.92 % como se mencionó. Esto es considerando que realmente se encuentre un semisumergible en estas zonas durante todo el patrullaje del avión.

A continuación se resaltarán algunas consideraciones a tener en cuenta que pueden afectar los resultados mencionados.

Limitaciones de esfuerzo

Al realizar estas búsquedas se deben tener en cuenta ciertos factores que pueden afectar las probabilidades de detección. Un factor importante que afecta cada plan de búsqueda es la limitación de la cantidad de esfuerzo disponible para buscar el objetivo. Las situaciones de la vida real imponen ciertas limitaciones. En concreto, se puede afirmar que no existe un sensor perfecto que garantice la detección del objetivo. Además, permanentemente se tienen que calibrar muchos sensores, ajustando la ganancia y otros parámetros para que tengan la mayor ganancia y eficacia posible.

Otro factor es que la disponibilidad operativa de cada buque limita el número de unida-

des disponibles. Además, estas unidades tienen a su vez, alcances limitados, y también sus tripulaciones tienen tiempos de resistencia limitados, y en situaciones reales se producen errores como consecuencia del cansancio o del entrenamiento inadecuado.

Un factor esencial para cualquier plataforma de búsqueda es la velocidad, cuya máxima y mínima depende del tipo de unidad. Sin embargo, también afecta el tiempo en la zona y a la anchura de barrido. Normalmente, si se aumenta la velocidad también disminuye la anchura de barrido. Como ? en su informe 'Revisión de Search Theory: Avances y aplicaciones al apoyo a las decisiones de búsqueda y rescate', mencionan: "Para la búsqueda, la velocidad óptima de búsqueda sería, en teoría, la que maximizara el área efectivamente barrida con el combustible disponible o en el tiempo disponible".

De este modo, todas estas variables y otras más, por ejemplo la meteorología del momento, influyen en muchos de los aspectos como la velocidad, la visibilidad y el área de búsqueda de los sensores. Además, la cantidad de luz diurna disponible para la operación, como también la pista que debe seguir el avión están sujetas a limitaciones como la velocidad de giro, y el radio mínimo de giro no se tiene en cuenta en los métodos vistos anteriormente. Estas variables pueden ser decisivas a la hora de realizar una interdicción o las probabilidades a favor de encontrar un semisumergible.

Conclusiones y discusiones

Los problemas analizados en la búsqueda de un objetivo tienen como características principales el buscador y el objetivo. En este tipo de problemas, la búsqueda y la evasión implican que el objetivo intenta evadir al buscador. En algunos casos, esto significa, que el blanco de los objetivos puede ser simplemente evitar la detección o llegar a un lugar específico sin ser detectado. Esto ocurre en este análisis, ya que se trata de contrabando o tráfico de drogas. El problema es encontrar una teoría de búsqueda tanto para el buscador como para el objetivo.

Este tipo de problemas son un reto a la hora de resolverlos ya que entran en juego diversas variables, y simular las intenciones de evasión o búsqueda puede llegar a ser complejo. Estos problemas suelen tener una formulación de teoría de juegos. Aunque son difíciles de resolver, se han hecho algunos progresos por Auger (1991), Eagle y Washburn (1991), Gal (1980), Stewart (1981) y Washburn (1980). Sin embargo, el movimiento del objeto de búsqueda durante la realización de una búsqueda sigue siendo una cantidad incierta (Frost y Stone, 2001).

La Armada de Colombia busca cada día mejores alternativas en sus operaciones para combatir estas formas de narcotráfico. Este tipo de búsquedas y patrullas en la zona se consideran efectivas cuando se captura el objetivo. Además, se considera efectivo si las bandas

criminales reducen los envíos de droga a otros países, ya sea por temor a que sus embarcaciones ilegales sean detectadas, o porque los corredores de tráfico están siendo altamente vigilados y patrullados. Sin embargo, las nuevas formas de contrabando y la evolución de las embarcaciones hacen cada vez más difícil la detección y búsqueda en el mar. Adicionalmente, las organizaciones criminales siempre buscan las zonas menos patrulladas para enviar sus cargamentos ilícitos.

Cuando se busca un objeto en una zona concreta sin encontrarlo, se sugiere que la probabilidad de que el objetivo esté en la zona en el momento de la búsqueda se reduce. Mientras tanto, la probabilidad de que esté en otra zona o espacio al mismo tiempo aumenta. Además, también hay que tener en cuenta que en las situaciones reales existe una cierta tensión en la que se producen dos posibles resultados: o se encuentra el objetivo, o no se encuentra.

Con la teoría de búsqueda y estos métodos se proporcionan los medios para movilizar las unidades adecuadas con el fin de preservar los costes logísticos llevados al mínimo, obteniendo el mayor beneficio o probabilidad de detección.

Durante el desarrollo del ejercicio se observa cómo la velocidad y la anchura de barrido son esenciales para todo tipo de métodos de búsqueda. Estas dos características determinan el área que se puede cubrir en el menor tiempo posible, ya que la variable tiempo también es esencial y se requiere encontrar el objetivo en el menor tiempo para optimizar los recursos.

Este tipo de ejercicios nació de los trabajos del grupo de investigación de Koopman, los cuales fueron dirigidos a intereses navales; sin embargo, la teoría en general de la búsqueda puede ser aplicada prácticamente a cualquier tipo de problema de búsqueda entre ellas búsqueda y rescate de personas desaparecidas. Por este motivo, los principios de la teoría de la búsqueda se aplican a cualquier situación en la que el objetivo es localizar, de la manera más eficiente, a un objeto o persona contenido en alguna zona geográfica establecida. En este argumento, la palabra eficiente significa reducir al mínimo el tiempo necesario para encontrar el objeto de la búsqueda y aumentar al máximo las posibilidades de encontrarlo con los recursos disponibles (Romero, 2020).

Se concluye que estas prácticas generan una mejor toma de decisiones, ya que en las operaciones reales están en juego vidas humanas y no se conoce a quién se enfrenta el personal de la Armada Nacional al momento de una interdicción marítima contra las OCT. Sin embargo, algo que sí es de conocimiento es que detrás de todo este negocio del narcotráfico existen organizaciones influyentes dispuestas a realizar actos que generan peligro para los tripulantes de las fuerzas militares. Por lo tanto, al poner en práctica los resultados obtenidos con estas pruebas se busca elevar las incautaciones y reducir la probabilidad de error y desperdicio de recursos. Asimismo, se combaten estas bandas criminales que causan importantes perjuicios a la población civil y el medio ambiente.

Se recomienda la aplicación práctica de estos resultados y ampliar la capacidad de búsqueda con diferentes unidades de la Armada Nacional como el uso de helicópteros, fragatas o unidades de países aliados, como es el caso del patrullero marítimo Lockheed P-3 Orión, entre otros, con el fin de evaluar los resultados y realizar comparaciones costo-beneficio, teniendo en cuenta la probabilidad de detección.

Referencias

- [Armada de Colombia, 2020] Armada de Colombia. (2020). *Unidades de @ArmadaColombia interceptan un semisumergible cargado con más de 2 toneladas de clorhidrato de cocaína en aguas del Pacífico colombiano*. [Tweet]. 27 de octubre. (Consultado: 11 de diciembre de 2020). <https://twitter.com/ArmadaColombia/status/1321132159902646272/photo/2> ↑Ver página 74, 99
- [Brian Haley, 1991] Brian Haley, K. (1991). Aplicaciones de la teoría de la búsqueda. *European Journal of Operational Research*. 1981/07/01/ Volumen 7, número 3. Páginas 227-231, ISSN 0377- 2217. (Consultado: 7 de diciembre de 2020). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722178190343X> ↑Ver página 85
- [CMCON, 2021] Centro Internacional de Investigación y Análisis contra el Narcotráfico Marítimo. (2021). *Dinámica Mundial del Narcotráfico Marítimo 2020*. Edición 005, Vol.,1. CMCON. (Consultado: 25 de septiembre de 2021). <https://CMCON.armada.mil.co/content/informe-anual-o-2020> ↑Ver página 78, 79, 80
- [El Tiempo, 2020] El Tiempo. (2020). *Este año se han incautado 27 semisumergibles cargados de cocaína*. (Consultado: 2 de diciembre de 2020). <https://www.eltiempo.com/justicia/conflicto-y-narcotrafico/autoridades-han-incautado-27-semisumergibles-con-coca-en-lo-que-va-de-2020-534998> ↑Ver página 74
- [El Universal, 2021] El Universal. (2021). *La nueva estrategia de Colombia y EE.UU. para frenar el narcotráfico*. (Consultado: 28 de septiembre de 2021). <https://www.eluniversal.com.co/colombia/la-nueva-estrategia-de-colombia-y-ee-uu-para-frenar-el-narcotrafico-LA5460386> ↑Ver página 73
- [Golen, 2009] Golen, E.F. (2009). *Intelligent Deployment Strategies For Passive Underwater Sensor Networks*. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Computación y la Información, Instituto Tecnológico de Rochester. (Consultado: 6 de diciembre de 2020).

https://www.researchgate.net/publication/237089948_Intelligent_deployment_strategies_for_passive_underwater_sensor_networks ↑Ver página 85

[Gregory Carl, 2003] Gregory Carl, R. (2003). *Teoría de la búsqueda y los submarinos en el Golfo de Vizcaya*. Título de Maestría de Ciencias en Investigación Operativa. Instituto Tecnológico del Aire Universidad del Aire. ↑Ver página 84, 85, 86, 88

[Karatas, 2012] Karatas, M. (2012). An analytical comparison of random and exhaustive search of an expanding area with binary sensors. Monterey/CA: Naval Postgraduate School, Departamento de Investigación de Operaciones. *Revista de Ingeniería Industrial*. Página: (2-13). Volumen: 23 Edición: 4. (Consultado: 7 de diciembre de 2020). https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/ac6064a3414f0d4_ek.pdf ↑Ver página 84, 86, 89

[Khan Academy, 202] Khan Academy (2020). *Multiplicadores de La-Grange, introducción*. (Consultado: 10 de diciembre de 2020). <https://www.khanacademy.org/math/multivariable-calculus/applications-of-multivariable-derivatives/constrained-optimization/a/lagrange-multipliers-single-constraint> ↑Ver página 94

[Koopman, 1999] Koopman, B.O. (1999). *Search and Screening, General Principles with Historical Applications* (Edición revisada). Virginia: Military Operations Research Society. ↑Ver página 84, 86

[Kropiwnicka, 2017] Kropiwnicka, M. (2017). *Transporte de droga: del narcosubmarino a las cargas con GPS*. Universidad de Granada. Global Affairs and Strategic Studies. (Consultado: 25 de septiembre de 2021). <https://www.unav.edu/web/global-affairs/detalle/-/blogs/transporte-de-de-droga-del-narcosubmarino-a-las-cargas-con-gps> ↑Ver página 76

[Méndez, 2021] Méndez, A. L. (2021). *Así se libra la guerra contra el narcotráfico en zona donde se da la coca*. El Tiempo. (Consultado: 18 de octubre de 2021). <https://www.eltiempo.com/justicia/conflicto-y-narcotrafico/narcotrafico-la-lucha-de-la-armada-nacional-en-la-costa-pacifica-625807> ↑Ver página 79

[Romero, 2020] Romero, J. (2020). *Koopman, el padre de la Teoría de la Búsqueda*. nasar.es. (Consultado: 7 de septiembre de 2021). <https://nasar.es/koopman-el-padre-de-la-teoria-de-la-busqueda/> ↑Ver página 75, 84, 101

- [Sutton, 2020] Sutton, H. I. (2020). Los 4 tipos de narcosubmarinos a los que se enfrentan los militares. (Consultado: 12 de diciembre de 2020). <https://www.forbes.com/sites/hisutton/2020/04/12/the-4-types-of-narco-submarine-trying-to-escape-detection/?sh=5e233bfc70c1> ↑Ver página 76, 77
- [Trevor, 2020] Trevor, R. (2020). *Introducción a la teoría de la búsqueda*. [Presentación en PowerPoint]. Introducción a las técnicas de investigación operativa. Universidad de Cranfield. (Consultado: 9 de diciembre de 2020). https://canvas.cranfield.ac.uk/courses/5678/files/330748?module_item_id=95635 ↑Ver página 87, 88, 89
- [Washburn, 2002] Washburn, A.R. (2002). *Search and Detection*. Fourth ed. Linthicum, Maryland: Institute for Operations Research and the Management Sciences. ↑Ver página 90