

**Estudio Técnico De Barreras De Contención En Derrames De Hidrocarburos En Cuerpos
Hídricos**



Fabian Esteban Alean Puentes

Wilson Andrés Rodríguez Novoa

Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Ingeniero De Petróleos

Director

Adolfo Polo Rodríguez

Ingeniero Químico, Especialista En Química De Aguas

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería De Petróleos

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Al Señor de los Milagros, mi guía e iluminación en todos los momentos de mi existir.

A mis padres Gladys y Fadin, por ser la perfecta combinación de valores, afecto y cariño de las cuales soy fruto.

A Leslie, por confiar y acompañarme a emprender el hermoso camino del profundo y sincero amor.

Fabian Esteban Alean Puentes

A Dios, a la vida y a todos los que hicieron posible la realización de este mi sueño.

A mi familia, a Gloria Novoa, Isidro Serrano, Josefa Yáñez, Rafael Novoa, Jaime Novoa, Daisy Rodríguez, Mario Mendoza.

A mi esposa Kelly Salinas y a mi hijo José Rodríguez, por el impulso, la compañía, el cariño y la motivación en todo este proceso, principalmente ahora que culmina una de mis mayores metas.

A mi compadre, amigo y hermano, Carlos Velilla por su preocupación y constante apoyo.

A todos los que se han mantenido en contacto conmigo y se preocupan por mi bienestar y cumplimiento de mi éxito universitario.

Wilson Andrés Rodríguez Novoa

Agradecimientos

A La Universidad Industrial de Santander, por brindarnos las herramientas y el conocimiento necesarios para alcanzar esta meta.

A nuestro director, el Ingeniero Adolfo Polo Rodríguez, quien ha sido una guía para el desarrollo de esta investigación y quién se ha preocupado por hacer de este documento un buen trabajo de grado.

A todos los maestros que hicieron parte de nuestro proceso de aprendizaje.

Tabla De Contenido

	Pág.
Introducción.....	23
1 Planteamiento Del Problema.....	25
2 Justificación	25
3 Objetivos.....	27
3.1 Objetivo General.....	27
3.2 Objetivos Específicos.....	27
4 Marco Teórico.....	28
4.1 Generalidades.....	28
4.2 El Petróleo Y Sus Características.....	29
4.2.1 Propiedades De Los Hidrocarburos.....	30
4.2.1.1 Gravedad Específica.....	30
4.2.1.2 Viscosidad.....	31
4.2.1.3 Temperaturas Características - Curvas De Destilación.....	31
4.2.1.4 Punto De Fluidez.....	32
4.3 Daños Por Contaminación De Petróleo.....	32
4.3.1 Agua Y Sistema Ecológico.....	32
4.3.2 Playas Y Rocas.....	33
4.3.3 Instalaciones Físicas.....	33
4.3.4 Incidencia De Petróleo O Productos.....	33
4.4 Hidrografía: Aguas Oceánicas Y Continentales.....	35
4.4.1 Aguas Oceánicas.....	35
4.4.2 Aguas Continentales.....	36
4.4.2.1 Ríos.....	36

4.4.2.2	Lagos.	37
4.4.2.3	Glaciares.	37
4.4.2.4	Aguas Subterráneas.	38
4.5	Comportamiento De Los Hidrocarburo En El Medio Ambiente	38
4.5.1	Esparcimiento.....	39
4.5.2	Evaporación.....	40
4.5.3	Dispersión.	41
4.5.4	Emulsificación.....	42
4.5.5	Disolución.	43
4.5.6	Fotooxidación.....	43
4.5.7	Sedimentación Y Hundimiento.	44
4.5.8	Biodegradación.....	45
4.6	Barreras De Contención	47
4.6.1	Elementos De Una Barrera De Contención.	47
4.6.2	Características Principales De Las Barreras De Contención.	48
4.6.3	Fuerzas Que Actúan Sobre Las Barreras.	49
4.6.3.1	Corrientes – Tensión En La Barrera.....	49
4.6.3.2	Corrientes – Contención Del Petróleo.....	50
4.6.3.3	Viento, Olas Y Marejadas.....	51
4.6.4	Forma Básicas De Contención Con Barreras.....	52
4.6.5	Modos De Falla De Las Barreras.	53
4.6.6	Tipos De Barrera.	56
4.6.6.1	Barreras De Valla.	56
4.6.6.2	Barreras De Cortina.....	57
4.6.6.3	Barreras De Sellado.....	62

4.6.6.4 Barreras Resistentes Al Fuego.	63
4.7 Mantenimiento De Las Barreras De Contención	65
4.8 Barreras Sorbentes	66
4.9 Dispersantes Químicos	68
4.9.1 Clasificación De Los Dispersantes.	70
4.10 Proceso De Análisis Jerárquico (AHP)	71
4.10.1 Fundamento Matemático Del AHP.	74
4.10.2 Normalización De Una Matriz De Comparaciones Pareadas.	75
4.10.3 Análisis De Consistencia Del AHP.	75
5 Marco Legal	77
6 Metodología	78
6.1 Etapa 1. Revisión Bibliográfica De Las Barreras Y Los Mecanismos Para La Contención De Hidrocarburo En Cuerpos De Aguas.....	78
6.2 Etapa 2. Estructuración Del Proceso De Análisis Jerárquico (AHP) Para La Selección De La Mejor Alternativa.....	79
6.3 Etapa 3. Aplicación Del Proceso De Análisis Jerárquico (AHP)	80
6.4 Etapa 4. Desarrollo De La Herramienta Para La Selección Del Mecanismo De Contención	81
7 Resultados Y Análisis.....	82
7.1 Resumen De Las Barreras Y Los Mecanismos Para La Contención De Hidrocarburo En Cuerpos De Aguas	82
7.2 Modelos Jerárquicos Para La Selección De La Mejor Alternativa	85
7.3 Aplicación Del Proceso De Análisis Jerárquico (AHP)	92
7.3.1 Modelo De Selección De La Barrera O Mecanismo Más Idóneo Para La Contención De Hidrocarburos En Alta Mar.	92
7.3.1.1 Priorización De Los Criterios Respecto Al Objetivo Principal.	92
7.3.1.2 Priorización De Las Alternativas Respecto A Los Criterios.	94

7.3.1.3 Vector Prioridad De Las Alternativas.	95
7.3.2 Modelo De Selección De La Barrera O Mecanismo Más Idóneo Para La Contención De Hidrocarburos En Puertos Marítimos Y Ríos Jóvenes.....	96
7.3.3 Modelo De Selección De La Barrera O Mecanismo Más Idóneo Para La Contención De Hidrocarburos En Lagos Y Ríos Viejos.	97
7.4 Desarrollo De La Herramienta Para La Selección Del Mecanismo De Contención	98
8 Conclusiones	100
9 Recomendaciones	102
Referencias Bibliográficas.....	104
Apéndice.....	108

Lista De Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del petróleo crudo.....	31
Tabla 2. Escala de valoración de los juicios	73
Tabla 3. Matriz de comparaciones pareadas 3 * 3.....	75
Tabla 4. Resumen de las barreras y los mecanismos de contención para contener derrames de hidrocarburos en diferentes cuerpos de aguas	82
Tabla 5. Criterios para el modelo jerárquico en aguas oceánicas tipo alta mar	86
Tabla 6. Criterios para el modelo jerárquico en aguas oceánicas tipo puerto marítimo	89
Tabla 7. Criterios para el modelo jerárquico en aguas continentales tipo lagos y ríos viejos	89
Tabla 8. Criterios para el modelo jerárquico en aguas continentales tipo ríos jóvenes	91

Lista De Figuras

	Pág.
Figura 1. Procesos de meteorización sobre los hidrocarburos en el mar	39
Figura 2. Emulsión de agua en hidrocarburos	43
Figura 3. Partes de la barrera de contención.....	48
Figura 4. Diferentes configuraciones utilizadas en el despliegue de las barreras de contención ..	53
Figura 5. Modo de falla de las barreras de contención	55
Figura 6. Barrera de valla	56
Figura 7. Barreras tipo cortina con flotación de espuma interna	58
Figura 8. Barreras tipo cortina con flotación de espuma externa	59
Figura 9. Barreras tipo cortina autoinflable.....	60
Figura 10. Barreras tipo cortina inflable a presión.	62
Figura 11. Barreras de sellado	63
Figura 12. Barreras resistentes al fuego	64
Figura 13. Barreras sorbentes	67
Figura 14. Efecto del dispersante en el agua.	69
Figura 15. Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP.....	72
Figura 16. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en alta mar.....	87
Figura 17. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en puertos marítimos	88
Figura 18. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en lagos y ríos viejos	90

Figura 19. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en ríos jóvenes.....	91
Figura 20. Matriz de comparaciones pareadas de criterios respecto al objetivo principal.....	93
Figura 21. Matriz normalizada y vector propio de los criterios	94
Figura 22. Vector propio de cada uno de los criterios	95
Figura 23. Vector de prioridades de alternativas – mejor alternativa de barrera para uso en alta mar	96
Figura 24. Vector de prioridades de alternativas – mejor alternativa de barrera para uso en puertos marítimos y ríos jóvenes.....	97
Figura 25. Vector de prioridades de alternativas – mejor alternativa de barrera para uso en lagos y ríos viejos.....	98

Lista De Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Matriz de comparaciones pareadas de alternativas, matriz normalizada y vector propio de cada uno de los criterios para el modelo en alta mar.....	108
Apéndice B. Matriz de comparaciones pareadas de criterios y alternativas, matriz normalizada y vector propio de cada uno de los criterios para el modelo de puertos marítimos y ríos jóvenes	111
Apéndice C. Matriz de comparaciones pareadas de criterios y alternativas, matriz normalizada y vector propio de cada uno de los criterios para el modelo de lagos y ríos viejos.....	113
Apéndice D. Manual de procedimiento BOOM SOLUTIONS.....	115

Glosario

Agente Tensoactivo. Son sustancias que disminuyen la tensión superficial de un líquido o la acción entre dos líquidos.

Aguas Continentales. Las aguas continentales son cuerpos de agua dulce permanentes que se encuentran sobre o debajo de la superficie de la Tierra alejados de las zonas costeras (excepto por las desembocaduras de los ríos y otras corrientes de agua).

Aguas Costeras. Son las aguas superficiales situadas hacia tierra desde una línea cuya totalidad de puntos se encuentra a una distancia de una milla náutica mar adentro desde el punto más próximo de la línea de base que sirve para medir la anchura de las aguas territoriales y que se extienden, en su caso, hasta el límite exterior de las aguas de transición.

Aguas Protegidas. Es un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios eco-sistémicos y sus valores culturales asociados.

Alternativa. Posibilidad de elegir entre opciones o soluciones diferentes.

Arroyos. Es una corriente natural de agua que normalmente fluye con continuidad, pero que, a diferencia de un río, tiene escaso caudal, que puede incluso desaparecer en la estación seca, verano o invierno, dependiendo de la temporada de lluvia para su existencia.

Bahía. Es una entrada de un mar, océano o lago rodeada por tierra excepto por una apertura, que suele ser más ancha que el resto de la penetración de la tierra. Se trata de una concavidad en la línea costera formada generalmente por la erosión por los movimientos del mar o del lago.

Barreras De Contención. Son obstáculos flotantes diseñados para realizar concentración y contención de los hidrocarburos para evitar su esparcimiento sobre la superficie del agua y aumentar su grosor para facilitar la recolección.

Biodegradación. Es la disolución química de los materiales por bacterias u otros medios biológicos.

Contaminación. Es la introducción de sustancias u otros elementos físicos en un medio que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso.

Criterio. Es una especie de condición subjetiva que permite concretar una elección. Se trata, en definitiva, de aquello que sustenta un juicio de valor.

Cuerpos De Agua. Son las extensiones de agua que se encuentran por la superficie terrestre o en el subsuelo (acuíferos, ríos subterráneos), tanto en estado líquido como sólido -hielo- (glaciares,

campos de hielo, casquete glaciar, inlandsis, casquetes polares), tanto naturales como artificiales (embalses) y tanto de agua salada (océanos, mares) como dulce (lagos, ríos, etc.).

Cuerpos Hídricos. Son los cuerpos de agua que existen en el planeta, desde los océanos hasta los ríos pasando por los lagos, los arroyos y las lagunas.

Daño Ambiental. Detrimiento de las condiciones de la naturaleza.

Destilación. Es el proceso de separar los componentes o sustancias de una mezcla líquida mediante el uso de la ebullición selectiva y la condensación.

Derrame De Hidrocarburo. Son accidentes de contaminación que suceden tanto en superficies terrestres como en acuáticas, debido a la acción de agentes internos o externos sobre las tuberías o depósitos de hidrocarburos.

Dispersante. Es un aditivo que se utiliza para lograr que un soluto tenga distribución y dispersión en un disolvente.

Disolución. Mezcla homogénea formada por un disolvente y por uno o varios solutos.

Ecosistema Acuático. Son todos aquellos ecosistemas que tienen por biotopo algún cuerpo de agua, como pueden ser: mares, océanos, ríos, lagos, pantanos, arroyos y lagunas, entre otros. Los dos tipos más destacados son: los ecosistemas marinos y los ecosistemas de agua dulce.

Emulsión. Es una mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante).

Estanques. Es una pequeña cavidad de agua, natural o artificial, utilizado cotidianamente para proveer al riego, criar peces, nadar, etcétera, o con fines meramente ornamentales.

Estuario. Es la desembocadura, en el mar, de un río amplio y profundo e intercambia en esta agua salada y agua dulce, debido a las mareas.

Evaporación. Es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

Faldón. Es la parte sumergida de la barrera y su función es evitar que el aceite se arrastre debajo de la barrera.

Flotador. Es la parte alta de la barrera de contención, da flotabilidad al conjunto manteniendo a las barreras por encima del agua.

Francobordo. Constituye la parte emergida de la barrera, su función es evitar que el aceite fluya por la parte superior de la barrera.

Gravedad Específica. Es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua.

Humedal. Es una zona de tierra, generalmente plana, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitente. Al cubrirse regularmente de agua, el suelo se satura, quedando desprovisto de oxígeno y dando lugar a un ecosistema híbrido entre los puramente acuáticos y los terrestres.

Impacto Ambiental. Es el efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente.

Lagunas. Es un depósito natural de agua generalmente dulce de menores dimensiones —sobre todo en profundidad que un lago.

Lastre. Está en la parte baja de las barreras, puede estar formado por una cadena, plomadas, cables, pesos metálicos, etc., su función es dar estabilidad a todo el conjunto de la barrera manteniendo esta vertical y evitando que el oleaje o el viento puedan tumbarla.

Pantano. También llamada ciénaga, es una capa de agua estancada y poco profunda en la cual crece una vegetación acuática que puede llegar a ser muy densa.

Policloruro De Vinilo. Es un plástico que surge a partir de la polimerización del monómero de cloroetileno, también conocido como cloruro de vinilo.

Polietileno. Es el polímero más simple; es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación.

Proceso De Análisis Jerárquico. Es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas. En vez de prescribir la decisión correcta, el proceso ayuda a los tomadores de decisiones a encontrar la solución que mejor se ajusta a sus necesidades y a su comprensión del problema.

Puerto. Es aquel espacio destinado y orientado especialmente al flujo de mercancías, personas, información o a dar abrigo y seguridad a aquellas embarcaciones o naves encargadas de llevar a cabo dichas tareas. Dentro de los puertos marítimos se pueden distinguir aquellos orientados a la carga y descarga de contenedores; de mercancías de distinto tipo, especialmente los pesqueros u otros.

Río. Es una corriente natural de agua que fluye con continuidad por un cauce de tierra. Posee un caudal determinado, rara vez es constante a lo largo del año, y desemboca en el mar, en un lago o en otro río, en cuyo caso se denomina afluente.

Tensión Superficial. Es la cantidad de energía que se requiere para incrementar la superficie de un líquido por unidad de área. Dicha energía se necesita ya que los líquidos ejercen una resistencia a la hora de incrementar la superficie.

Viscosidad. Es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.

Resumen

Título: Estudio Técnico De Barreras De Contención En Derrames De Hidrocarburos En Cuerpos Hídricos *

Autores: Fabian Esteban Alean Puentes, Wilson Andrés Rodríguez Novoa **

Palabras Claves: Hidrocarburo, barrera de contención, Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), aguas oceánicas, aguas continentales, Boom Solutions.

Descripción:

Los diversos acontecimientos de contaminación en cuerpos hídricos ponen de manifiesto la necesidad de disponer de una herramienta que facilite la toma de decisiones y gestione el plan de acción para mitigar el impacto ambiental.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo realizar un estudio técnico de las barreras y mecanismos de contención utilizadas en derrames de hidrocarburos en diferentes cuerpos de agua. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las barreras existentes en el mercado, a fin de identificar sus principales características y aplicaciones. Seguidamente se aplicó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) para seleccionar la mejor barrera en aguas oceánicas en alta mar y puertos marítimos y aguas continentales en lagos y ríos viejos y en ríos jóvenes. Finalmente, se desarrolló un manual de procedimiento para guiar al usuario en el manejo de la herramienta BOOM SOLUTIONS para la selección del mecanismo más idóneo para contener derrames de petróleo.

Los resultados evidencian que la barrera de cortina inflable a presión es la barrera más idónea para emplearse en aguas oceánicas tipo alta mar, prioridad respecto al objetivo principal del 43,29%; la barrera de cortina autoinflable es la barrera que mejores posibilidades brinda ante un derrame de hidrocarburo en aguas oceánicas tipo puertos marítimos y aguas continentales tipo ríos jóvenes, prioridad del 38,92%. Por último, se obtiene que la barrera de sellado es la mejor barrera para emplearse en aguas oceánicas tipo lagos y ríos viejos, prioridad del 59,29%.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Director: Ing. Adolfo Polo Rodríguez

Abstract

Title: Technical Study Of Hydrocarbons Spill Containment Booms On Water Bodies *

Authors: Fabian Esteban Alean Puentes, Wilson Andrés Rodríguez Novoa **

Key Word: Hydrocarbon, containment boom, The Analytic Hierarchy Process (AHP), ocean waters, inland waters, Boom Solutions

Description:

The several events of oil spills on water bodies reveal the interest to design a supporting decision making tool capable to manage the action plan in order to mitigate the environmental impact.

The purpose of this bachelor thesis is to carry out a technical study of the booms and containment mechanisms used in oil spills on different water bodies. To achieve this goal, an exhaustive bibliographical review about the existing booms in the market was carried out in order to identify its main characteristics and applications. Afterward, The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to select the best boom in oceanic waters, deep waters, seaports, and lakes, old and young rivers. Finally, a procedure manual was developed to guide the user in handling the BOOM SOLUTIONS tool to selecting the most suitable mechanism to contain oil spills.

The results show the pressure inflatable curtain boom as the most suitable mechanism to be used in deep water, with 43,29% priority related to the main objective; The self-inflating curtain boom as the one which offers the best possibilities facing a hydrocarbon spill on oceanic waters such as seaports and inland waters such as young rivers, (38,92%). Finally, it is obtained that the fence boom as the best barrier to be used in water bodies such as lakes and mature rivers, (59,29%).

* Degree Project

** Physical - Chemical Engineering Faculty, Petroleum Engineering School. Directed: Eng. Adolfo Polo Rodríguez

Introducción

Los hidrocarburos son un tipo de contaminantes que afectan la calidad del agua de manera importante. Los derrames de petróleo son cada día más frecuentes en las fuentes hídricas, generando una afectación del ecosistema a largo plazo. La formación de una película impermeable sobre el agua en las zonas de derrame afecta rápida y directamente a las aves y a los mamíferos acuáticos ya que obstruye el intercambio gaseoso y desvía los rayos luminosos que aprovecha el fitoplancton para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis.

Por eso, la contención de hidrocarburos, es la clave para minimizar los daños ambientales que se pueden producir. Una vez contenido el derrame, la recuperación del hidrocarburo es más sencillo, pues si no se realizan labores de contención, el oleaje, la corriente y los vientos dificultarán enormemente su recuperación.

El presente documento describe las generalidades de los derrames, las propiedades características de los hidrocarburos, el tipo de ecosistema que se afecta por episodios de contaminación, la caracterización de las aguas oceánicas y continentales, los tipos de barreras de contención, sus características principales y la fundamentación matemáticas del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP).

El trabajo se fundamenta en la aplicación del AHP como método de selección de la mejor alternativa en diferentes cuerpos de agua (aguas oceánicas en alta mar, en puertos marítimos y

aguas continentales en lagos, ríos viejos y ríos jóvenes; teniendo como respaldo la herramienta BOOM SOLUTIONS para la toma de decisiones.

1 Planteamiento Del Problema

Los problemas ambientales por derrame de hidrocarburos pueden ser bastantes críticos, en situaciones extremas puede finalizar un proyecto exploratorio o de producción, generando consigo repercusiones económicas de consideración para la compañía operadora, impactos socioeconómicos negativos en las comunidades aledañas y más grave aún, efectos irreversibles en los ecosistemas acuáticos y terrestres.

El conflicto interno en Colombia ha generado graves afectaciones a la infraestructura petrolera, muestra de ello ha sido el vertimiento de alrededor de 800.000 barriles de crudo al ambiente durante los últimos 10 años, producto de los múltiples atentados a los diferentes oleoductos. Bajo este evidente escenario, podemos afirmar que se han generado impactos ambientales negativos en el suelo y cuerpos hídricos. Por consiguiente, la atención oportuna a derrames de hidrocarburos en cuerpos hídricos es de vital importancia para evitar daños ambientales irreparables, por ende, un adecuado y eficaz plan de acción, la óptima selección del mecanismo de contención más adecuado y el conocimiento de los parámetros técnicos más influyentes en el manejo de derrames de hidrocarburos permitirá favorecer las mejores decisiones con la finalidad de proteger al máximo los diferentes ecosistemas acuáticos: marítimos y continentales.

2 Justificación

El presente proyecto de investigación plantea realizar un estudio técnico de las distintas barreras y mecanismos de contención aplicados en cuerpos hídricos que permita comprender su

funcionamiento, restricciones y condiciones de operación adecuada. Así mismo, proponer un manual para la selección y aplicación de las barreras y/o mecanismos de contención más utilizados en la atención de derrames de crudo en diferentes cuerpos de agua, brindando así la primera fase para mitigar el impacto ambiental que los vertimientos de hidrocarburos puedan generar en el medio ambiente.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar un estudio técnico de barreras de contención utilizadas en derrames de hidrocarburos en diferentes tipos de cuerpos de agua.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los diferentes tipos de mecanismos y barreras de contención aplicados en derrames de crudos en diferentes tipos de cuerpos hídricos.
- Describir los parámetros incidentes en la selección de barreras de contención.
- Elaborar un manual de procedimiento en la selección y aplicación de mecanismos y/o barreras de contención utilizados en el manejo de derrames de crudo en diferentes tipos de cuerpos de agua.

4 Marco Teórico

4.1 Generalidades

Con el avance de la tecnología, cada vez son más eficientes las técnicas de extracción y transporte de crudo por todo el planeta, sin embargo, a pesar de existir todo un despliegue tecnológico que permita manejar de forma apropiada lo relacionado con los hidrocarburos, debe reconocerse que los derrames de hidrocarburos siguen existiendo, y por lo grave de los daños que pueden causar, estos siguen siendo objeto de titulares en los medios de comunicación.

El esfuerzo por evitar derrames de hidrocarburos, así como la contaminación que producen debe tener como pilar fundamental la prevención. De esta manera, cada acción relacionada con este tema, si se realiza de la forma correcta, minimizará la gravedad de los daños medioambientales causados y acelerará la recuperación de los ecosistemas que hayan sido dañados.

A pesar de todo esto, es necesario tener presente que pese a los esfuerzos que se realizan por minimizar el impacto ambiental, se seguirán produciendo derrames de hidrocarburos que afectarán al medio ambiente. Las consecuencias pueden ser mínimas o catastróficas como conllevar a la muerte de todo organismo viviente en una comunidad biológica determinada. Cabe resaltar que el tiempo que necesita la naturaleza para recuperarse puede variar de unos pocos días o hasta años. Por lo anterior, debe ser una prioridad garantizar una respuesta rápida para mitigar los efectos ocasionados por los derrames de hidrocarburo que pueden llegar a ocurrir a futuro, pues es una

realidad que no se puede evitar, ya que continuamente se transporta petróleo por el mar, incluso por zonas de consumo alejadas de las áreas de producción.

En consecuencia, una vez que el hidrocarburo ha sido derramado, es necesario tomar decisiones urgentes de las opciones disponibles para reducir al mínimo los impactos medioambientales y socioeconómicos; así mismo, es necesario evaluar las ventajas y desventajas de las distintas respuestas. En éste proceso será necesario tener en cuenta las circunstancias del derrame, los aspectos prácticos de la limpieza, el impacto relativo al hidrocarburo y las opciones de limpieza; además, debe valorarse la importancia relativa de los factores sociales, económicos y ambientales (Casado, 2013).

Un punto importante a considerar, es la estrategia de lucha a utilizar en un derrame, lo cual requiere hacer una evaluación de los hechos. Sin embargo, aunque cada derrame va a ser diferente, debe contarse con un plan de acción a seguir, el cual dependerá entre otras cosas de:

- Tipo de hidrocarburo
- Condiciones meteorológicas
- Características del medio marino

4.2 El Petróleo Y Sus Características

El petróleo se define como aquella materia líquida natural, inflamable y oleaginoso, de color negro y olor fuerte, insoluble y más ligera que el agua constituida fundamentalmente por una mezcla compleja de hidrocarburos y otras especies químicas. De esta forma, el petróleo es una

mezcla compleja de muchos compuestos químicos. La composición atómica típica de un petróleo genérico podría ser de un 85% de carbono (C), un 12% de hidrógeno (H), hasta un 8% de azufre (S), hasta un 1% de nitrógeno (N) y hasta un 0,5% de oxígeno (O). En efecto, no hay dos petróleos iguales, ni tan solo obtenidos de un mismo yacimiento.

La proporción de estos compuestos químicos, formados exclusivamente por átomos de hidrógeno y carbono, puede variar entre un 50 y un 95% del total. La fracción restante (no hidrocarburos) está constituida por compuestos orgánicos que contienen nitrógeno, azufre, oxígeno y trazas de metales pesados como el níquel o el vanadio. Estos elementos son característicos de cada yacimiento y sirven como descriptores del producto crudo (Aguilar, 2016).

4.2.1 Propiedades De Los Hidrocarburos. Las propiedades físicas principales que afectan el comportamiento y la persistencia de un tipo de hidrocarburo derramado en el mar son la gravedad específica, viscosidad, características de destilación y punto de fluidez.

4.2.1.1 Gravedad Específica. Se define como la relación de la masa de un volumen producto dado dividido por la masa de agua pura, para el mismo volumen y a la misma temperatura. Gran parte de los crudos y refinados tienen una densidad inferior al agua; así, la gravedad específica de la mayoría de estos productos se encuentra entre 0,78 y 1.

Se utiliza la escala de gravedades del American Petroleum Institute (API) para describir la gravedad específica de petróleo crudo y sus productos derivados (ver Tabla I).

Tabla 1.

Clasificación del petróleo crudo

Tipo de crudo	Gravedad API
Liviano	>32 °API
Mediano	22 < °API < 32
Pesado	15 < °API < 22
Extrapesado	<15 °API

Nota: Adaptado de Vergara, I., Pizarro, F. (1981). *Manual control de derrames de petróleo*. Chile: IMCO – CPPS – PNUMA

4.2.1.2 Viscosidad. La viscosidad de un fluido es la medida de su resistencia interna a fluir.

La viscosidad dinámica (μ) o absoluta, se define como la relación entre la fuerza de corte ejercida y la deformación de corte generada; tiene unidades de [kg/m.s] o Poises (P).

Por otro lado, la viscosidad cinemática (ν) se define como la viscosidad dinámica de un fluido dividida por su densidad; tiene unidades de [cm²/s] o también Stokes (St). Cabe resaltar que la viscosidad disminuye linealmente con la temperatura (Aguilar, 2016).

Los hidrocarburos de alta viscosidad fluyen con menos facilidad que los de viscosidad más baja. Todos los hidrocarburos se vuelven más viscosos a medida que la temperatura desciende; algunos más que otros en función de su composición.

4.2.1.3 Temperaturas Características - Curvas De Destilación. La destilación es un proceso clave en la industria petrolera. Cada producto crudo es fraccionado y descompuesto en una serie de productos refinados de diferente interés económico. Por ello, existe toda una clasificación de los petróleo y refinados en función de dicho proceso: las curvas de destilación. En

el proceso de destilación, a medida que aumenta su temperatura, diferentes componentes alcanzan sucesivamente su punto de ebullición correspondiente, se evaporan y a, continuación, se enfrían y condensan. Algunos hidrocarburos contienen residuos bituminosos, cerosos o asfálticos, que no se destilan inmediatamente incluso a altas temperaturas y que también es probable que persistan en el entorno marino durante amplios periodos de tiempo (ITOPF, 2011).

4.2.1.4 Punto De Fluidez. Es la temperatura máxima a la que un tipo de hidrocarburos deja de fluir, y depende de su contenido en ceras y asfaltenos. Al enfriarse, los hidrocarburos alcanzarán una temperatura denominada punto de turbidez, a la que los componentes cerosos comenzarán a formar estructuras cristalinas. La formación de cristal entorpece progresivamente el flujo de los hidrocarburos hasta que, al enfriarse posteriormente, se alcanza el punto de fluidez, el flujo cesa y los hidrocarburos cambian de estado líquido a semisólido (ITOPF, 2011).

4.3 Daños Por Contaminación De Petróleo

Los niveles crecientes de explotación y consumo de petróleo y sus derivados han aumentado los volúmenes de estos productos que son transportados por mar o alcanzan zonas costeras con los inherentes riesgos potenciales de descarga al medio ambiente. Entre los principales componentes de un sistema costero que puede ser afectado por episodios de contaminación se destacan (Vergara & Pizarro, 1981):

4.3.1 Agua Y Sistema Ecológico. En el agua el petróleo tiende a esparcirse formando una película delgada cuyo grosor depende de las características del petróleo y de las condiciones

ambientales imperantes. De esta manera, los efectos de una pequeña cantidad de petróleo pueden extenderse a grandes extensiones de agua. Debido a esta característica del petróleo, el agua y el sistema ecológico asociado son los componentes más sensibles a las alteraciones causadas por episodios de contaminación. Pueden ser afectados por los efectos mecánicos asociados con una película de aceite sobre el agua que dificulta el intercambio de gases del sistema agua/aire; disminuye la tensión interfacial, cubre con una película de aceite el área intermareal, aglomera y destruye plancton y organismos flotantes, al afectar su flotabilidad.

4.3.2 Playas Y Rocas. En caso de derrames el área de playas y rocas se ve afectado principalmente en la zona intermareal que se ve expuesta la película de aceite que flota en el agua. El petróleo es atascado sobre rocas y playa por efectos de viento y oleaje que producen acumulaciones de aceite, emulsión aceite/agua y residuos flotantes impregnados de aceite. Los daños potenciales afectan principalmente las comunidades biológicas de playas y rocas, así como el uso recreacional de playas. En las playas, la magnitud de los daños potenciales depende de la altura de mareas, intensidad de viento, naturaleza y perfil de la playa, grado de penetración del producto, características y composición del producto.

4.3.3 Instalaciones Físicas. Las instalaciones físicas existentes en la zona costera y que pueden ser afectadas por derrames corresponden a instalaciones fijas, instalaciones flotantes y embarcaciones. Estas pueden ser afectadas por acción directa del contaminante ya sea por acción solvente, ensuciamiento de estructuras o limitación de actividades.

4.3.4 Incidencia De Petróleo O Productos. La incidencia ambiental de un derrame está

condicionada en gran medida por el tiempo de permanencia y la masividad del producto derramado. El petróleo y productos derivados de éste, al ser expuestos al medio ambiente sufren diferentes procesos naturales de alteración: son dispersados en el medio ambiente por disolución, evaporación, dispersión en agua e incorporación en sedimentos; son degradados por biodegradación, oxidación y fotooxidación.

Estos procesos naturales resultan en la disminución de la masa de petróleo, acortan el tiempo de exposición, mitigando los efectos adversos del contaminante. Contribuyen además a su remoción y eventual eliminación.

La incidencia relativa de estos procesos en la modificación del contaminante depende de su composición y características. Así productos livianos de bajo punto de ebullición y baja viscosidad como gasolinas y kerosene, serán dispersados rápidamente por procesos de disolución y volatilización acortando el tiempo de acción del contaminante. Además, debido a su baja intensidad de coloración, los efectos visuales del derrame serán poco evidentes. Por el contrario, los productos oscuros tales como petróleo crudo y petróleo combustibles presentan una mayor proporción de componentes de baja solubilidad y baja volatilidad lo cual unido a una mayor viscosidad, dificulta la acción de dispersión y eliminación natural prologando el tiempo de acción del contaminante. Además, la intensa coloración de estos productos pesados los hace especialmente evidentes en forma visual, incluso a nivel de trazas a pesar de ser frecuentemente menos tóxicos que algunos productos livianos.

4.4 Hidrografía: Aguas Oceánicas Y Continentales

4.4.1 Aguas Oceánicas. Las aguas oceánicas son uno de los componentes biológicos más importantes y destacados del planeta Tierra desde su formación hace millones de años. En la actualidad corresponden a la masa de agua de mayor volumen del planeta, y están formadas por las aguas de cinco grandes océanos que la constituyen: el océano Pacífico (188 millones de km² de superficie), el Atlántico (superficie de 94 millones de km²), el Índico (superficie de 74 millones de km²), el Antártico (20 millones de km² de superficie) y el océano Ártico (14 millones de km² de superficie) (Fernández, 2019). Por su parte, los mares forman parte del agua de los océanos y reciben este nombre aquellas zonas más próximas a la tierra, localizadas sobre la plataforma de los continentes y que por su cercanía a la tierra tienen menos profundidad que los océanos.

En las aguas oceánicas, sobresalen tres elementos que son de vital importancia para el correcto funcionamiento del ecosistema:

- Las corrientes marinas: Se desplazan por acción del viento, siguiendo su dirección y contando con mayor o menor movimiento según la fuerza de dichos vientos.
- Las olas: Las olas son movimientos del agua superficial de los mares provocados por el viento o por movimientos o perturbaciones en el fondo del agua de los océanos, producen que el agua se desplace hacia la costa, donde rompe al tocar el fondo. Aquellas olas provocadas por violentos movimientos oceánicos pueden alcanzar grandes dimensiones, en muchas ocasiones conducen a catastróficos desastres.

- Las mareas: Provocadas por la fuerza de gravedad de la Luna y el Sol, las mareas marcan los ritmos de subida y bajada de las aguas oceánicas que bañan las costas, playas y acantilados de las regiones costeras de todo el mundo.
- Corrientes costeras: Tienen lugar en las líneas de costa o en zonas muy próximas al litoral, las cuales contribuyen a la conformación o modelado de los diferentes accidentes costeros, como las playas, los acantilados o los estuarios debido al gran poder de erosión y al transporte de todo tipo de materiales (Equipo Editorial Naturaleza, 2017).

4.4.2 Aguas Continentales. Son todas aquellas masas de agua en estado líquido que se encuentran en las regiones continentales del planeta. Generalmente, las aguas continentales están constituidas por agua dulce y su presencia en la biosfera es constante. El origen de las aguas continentales es diverso, formándose en ocasiones como consecuencia de precipitaciones en forma de lluvia, granizo o nieve; o bien debido a la presencia y afloramiento de aguas subterráneas.

Las aguas continentales cuentan con una gran importancia, tanto como recurso natural imprescindible para la supervivencia de muchas especies de animales y plantas como por su valor ecológico en el correcto funcionamiento de la Tierra como un ecosistema global (Fernández, 2019). Algunas aguas continentales son:

4.4.2.1 Ríos. Los ríos son corrientes de agua que fluyen por un cauce desde tierras altas a tierras bajas y que finalmente vierten a un lago, a otro río o al mar, excepto en zonas desérticas, donde pueden desaparecer por consunción. Un río se caracteriza por su caudal, cantidad de agua que fluye por el río. En las regiones donde las precipitaciones son regulares todo el año, los ríos

mantiene un caudal estable, pero normalmente el caudal varía bastante con las estaciones. (Wikipedia, 2020).

Los ríos se pueden clasificar de acuerdo a su edad:

- Río joven: este tipo de río tiene sus corrientes rápidas e impetuosas, se erosiona de modo intenso y en forma vertical formando su valle.
- Río maduro: en este sus corrientes son menores y escurren en terrenos con escasa pendiente, y su poder erosivo disminuye dando lugar a planicies.
- Río viejo: en este sus corrientes son lentas, la acción erosiva disminuye y carece de pendientes.

4.4.2.2 Lagos. Un lago es una extensión permanente de agua que carece de contacto con el mar. Los lagos están situados normalmente en zonas deprimidas de la corteza terrestre, y su origen puede ser de lo más diverso. A diferencia de los ríos, los lagos no son agentes erosivos, y su existencia no provoca alteración alguna en el paisaje. Los lagos se alimentan de diversas maneras, pero esencialmente reciben sus aguas de las precipitaciones, de los ríos o glaciares y de las capas freáticas.

4.4.2.3 Glaciares. Se trata de grandes superficies de hielo originadas por la acumulación de nieve, las cuales se han convertido en hielo debido a la presión que provocan y las condiciones atmosféricas de la zona. Esta nieve, una vez convertida en hielo queda depositada de forma permanente. Para la formación de aguas continentales tipo glaciares, es imprescindible la acumulación de capas durante diferentes periodos de tiempo, que las mismas no se derritan gracias

a bajas temperaturas y que las precipitaciones de nieve sean generosas, con el objetivo de que sigan acumulándose capas. Las aguas continentales que forman glaciares en zonas polares se denominan casquetes glaciares (Bowden, 2017).

4.4.2.4 Aguas Subterráneas. Las aguas subterráneas son aguas continentales que surgen por la filtración en el terreno del agua de lluvia o de ríos y lagos. Parte de esta agua filtrada en el terreno, emerge a través de la evapotranspiración o a través de manantiales que forman ríos y lagos. El agua que se filtra en la tierra pasa gracias a la permeabilización del suelo y a su composición. En cambio, aquellos poco permeables o cuyos materiales impiden que el agua filtre, la estancan y no la dejan pasar. La zona de suelo permeable se llena de agua a través de los poros de las rocas y materiales existentes, conformando lo que se llama capa freática. Cuando esta capa se encuentra llena de agua, emerge a la superficie a través de manantiales que nutren a ríos y lagos (Bowden, 2017).

4.5 Comportamiento De Los Hidrocarburo En El Medio Ambiente

Cuando los hidrocarburos se derraman en el mar, éstos sufren varios cambios físicoquímicos. Algunos de estos cambios hacen que los hidrocarburos desaparezcan de la superficie del mar mientras que otros hacen que los hidrocarburos persistan. Aunque el medio marino consiga finalmente asimilar los hidrocarburos derramados, el tiempo que tarde este hecho en producirse depende de las características físicoquímicas de los hidrocarburos y de los procesos naturales de meteorización que puedan tener lugar.

Los hidrocarburos derramados en el mar sufren, en su conjunto, una serie de procesos conocidos como meteorización que modifican sus características y su comportamiento (ver Figura 1). El conocer estos procesos y cómo interactúan para transformar la naturaleza de los hidrocarburos tiene un gran valor en la lucha contra los derrames. A continuación se describe cada uno de estos procesos:

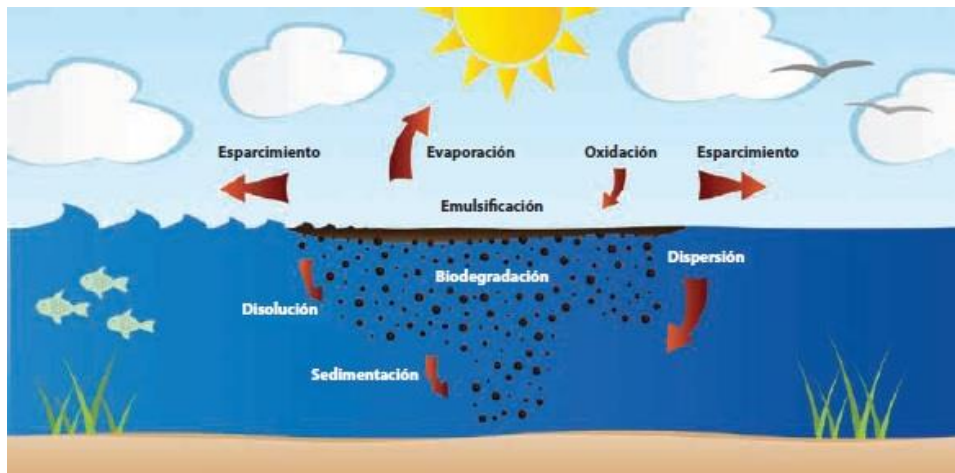


Figura 1. Procesos de meteorización sobre los hidrocarburos en el mar. Adaptado de ITOPF (2011). *Destino de los derrames de hidrocarburos en el medio marino*. Recuperado de https://www.itopf.org/uploads/translated/TIP2_SPFateofMarineOilSpills.pdf. Canterbury, Inglaterra.

4.5.1 Esparcimiento. Los hidrocarburos comienzan a esparcirse sobre la superficie del mar tan pronto como se derraman. La velocidad a la que esto se produce depende en gran medida de la viscosidad de los hidrocarburos y del volumen derramado. Los hidrocarburos fluidos de baja viscosidad se esparcen con más rapidez que los de alta viscosidad. Los hidrocarburos líquidos se esparcen inicialmente como una mancha uniforme, pero comienzan a disgregarse rápidamente. A medida que los hidrocarburos se esparcen y se reduce el grosor, su aspecto cambia de la coloración negra o marrón oscura de las manchas gruesas al brillo iridiscente (arco iris) y plateado en los

bordes de la mancha. En lugar de esparcirse como capas finas, los hidrocarburos semisólidos o muy viscosos se fragmentan en manchas aisladas que se separan y en ocasiones, pueden alcanzar varios centímetros de grosor. En aguas abiertas, los patrones de circulación del viento tienden a provocar que los hidrocarburos formen bandas estrechas o hileras paralelas a la dirección del viento y, con el transcurso del tiempo, las propiedades de los hidrocarburos adquieren menor importancia para determinar el movimiento de la mancha.

La velocidad a la que los hidrocarburos se esparcen o fragmentan también se ve afectada por el efecto de olas, turbulencia, energía de las mareas y corrientes; cuanto mayor sea el efecto de esta combinación de fuerzas, más rápido evolucionará el proceso (ITOPF, 2011).

4.5.2 Evaporación. Los componentes más volátiles de un tipo de hidrocarburos se evaporan a la atmosfera. La velocidad de evaporación depende de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento. En general, los componentes de hidrocarburos con un punto de ebullición inferior a 200 °C se evaporan en un periodo de 24 horas en condiciones moderadas.

La velocidad de esparcimiento inicial de los hidrocarburos también afecta a la velocidad de evaporación, cuanto más aumente la superficie, más rápidamente se evaporan los componentes ligeros. La evaporación también aumenta bajo condiciones de mar picado, velocidades del viento elevadas y temperaturas cálidas.

Los residuos de hidrocarburos que permanecen después de la evaporación presentan mayor densidad y viscosidad, lo que afecta a los procesos de meteorización posteriores y a las técnicas de limpieza (ITOPF, 2011).

4.5.3 Dispersión. La velocidad de dispersión depende principalmente de la naturaleza de los hidrocarburos y del estado del mar. La dispersión se produce más rápidamente con hidrocarburos de baja viscosidad en presencia de rompientes. Las olas y la turbulencia en la superficie del mar pueden disgregar una mancha total o parcialmente en gotas que se mezclan en las capas superiores de la columna de agua. Las gotas más pequeñas se mantienen en suspensión mientras que las más grandes suben de nuevo hasta la superficie, donde se fusionan con otras gotas para volver a formar una mancha o para esparcirse en una película muy fina. En el caso de las gotas con un diámetro inferior a 70 μm , la velocidad a la que suben hasta la superficie se equilibra por la turbulencia del mar de forma que se mantienen en suspensión. Estos hidrocarburos dispersos se mezclan en volúmenes cada vez mayores de agua de mar, lo que produce una reducción rápida y muy considerablemente de la concentración de los hidrocarburos. El aumento del área superficial que presenta los hidrocarburos dispersos también estimulan procesos como biodegradación, disolución y sedimentación.

Por otra parte, los hidrocarburos viscosos tienden a formar fragmentos gruesos sobre la superficie del agua que muestran poca tendencia a la dispersión, incluso con la adición de dispersantes (ITOPF, 2011).

4.5.4 Emulsificación. La emulsificación es el proceso por el cual un líquido se dispersa en otro líquido en forma de pequeñas gotitas, es decir, como suspensión. En el caso del petróleo se pueden formar dos tipos de emulsiones: petróleo en agua y agua en petróleo. Las propiedades de cada tipo de emulsión son muy diferentes, pero ambas se han formado por la acción de las olas (Vergara & Pizarro, 1981).

Numerosos hidrocarburos absorben agua y forman emulsiones de agua en hidrocarburos. Esto puede aumentar el volumen de contaminante en un factor de hasta cinco veces. A medida que se desarrolla la emulsión, el movimiento de los hidrocarburos en las olas provoca que las gotas de agua absorbidas por los hidrocarburos reduzcan su tamaño (ver Figura 2), lo que aumenta progresivamente la viscosidad de la emulsión. A medida que aumenta la cantidad de agua incorporada, la densidad de la emulsión se aproxima a la densidad del agua de mar, aunque sin la adición de partículas sólidas, es improbable que la supere. Las emulsiones estables pueden contener hasta un 70% - 80% de agua, suelen ser semisólidas y presentan un color rojo/marrón, naranja o amarillo intenso. Son muy resistentes y pueden permanecer emulsionadas indefinidamente. Las emulsiones menos estables pueden separarse en hidrocarburo y agua si se calientan por la exposición solar en condiciones de calma o cuando se encuentran varadas en las costas (ITOPF, 2011).

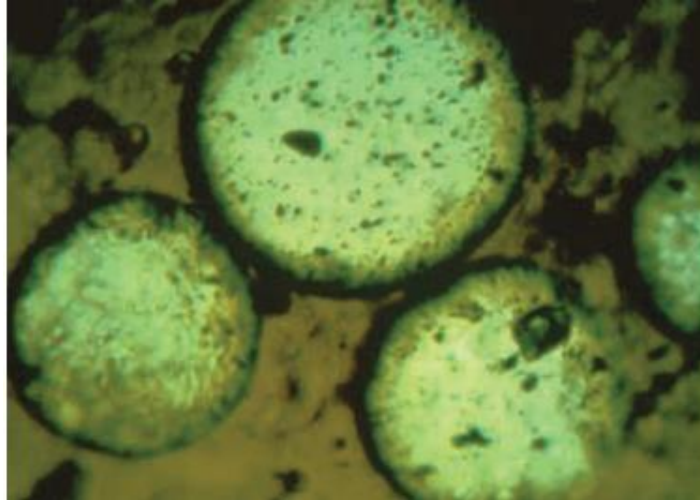


Figura 2. Emulsión de agua en hidrocarburos. Adaptado de ITOPF (2011). *Destino de los derrames de hidrocarburos en el medio marino*. Recuperado de https://www.itopf.org/uploads/translated/TIP2_SPFateofMarineOilSpills.pdf. Canterbury, Inglaterra.

4.5.5 Disolución. La velocidad y grado de disolución de un hidrocarburo depende de su composición, esparcimiento, temperatura del agua, turbulencia y grado de dispersión. Los componentes pesados del petróleo crudo son prácticamente insolubles en el agua de mar, mientras que compuestos más ligeros, en particular hidrocarburos aromáticos como benceno y tolueno, son ligeramente solubles. Sin embargo, estos compuestos también son los más volátiles y se pierden muy rápidamente por evaporación, normalmente de 10 a 1.000 veces más rápido de los que se disuelven. Como consecuencia, las concentraciones de hidrocarburos disueltos en agua de mar rara vez superan 1 ppm y la disolución no aporta una contribución importante a la eliminación del hidrocarburo de la superficie marina (ITOPF, 2011).

4.5.6 Fotooxidación. Los hidrocarburos pueden reaccionar con oxígeno, lo que puede dar lugar a la formación de productos solubles o alquitranes persistentes. La luz solar estimula la oxidación y, aunque se produce durante la presencia completa del derrame, su efecto general sobre

la disipación tiene poca importancia en comparación con otros procesos de meteorización. Incluso bajo luz solar intensa, las películas finas de hidrocarburo solo se descomponen lentamente y normalmente a un ritmo inferior al 0,1% diario. Las capas gruesas de hidrocarburos muy viscosos o emulsiones de agua en hidrocarburos tienden a oxidarse en residuos persistentes en lugar de degradarse, puesto que se forman compuestos con mayores pesos moleculares que crean una capa superficial de protección. Esto puede observarse en bolas de alquitrán varadas en costas, que normalmente están compuestas de una corteza exterior sólida de hidrocarburos oxidado y de partículas sedimentarias que rodean un interior más blando y menos meteorizado (ITOPF, 2011).

4.5.7 Sedimentación Y Hundimiento. Las gotas de hidrocarburos dispersos pueden interactuar con partículas sedimentarias y materia orgánica suspendida en la columna de agua. El resultado es que las gotas adquieren la densidad necesaria para hundirse lentamente hasta el fondo marino. Las áreas costeras poco profundas y las aguas de desembocaduras de ríos y estuarios acumulan a menudo materiales sólidos suspendidos que pueden combinarse con las gotas de hidrocarburos dispersos, propiciándose de este modo las condiciones favorables para la sedimentación de partículas contaminadas por hidrocarburos. En aguas salobres, en las que el agua dulce de los ríos reduce la salinidad del agua de mar y, en consecuencia, su gravedad específica, es posible que las gotas con flotabilidad neutra se hundan. El hidrocarburo también puede ser ingerido por organismos presentes en el plancton e incorporados a gránulos fecales que posteriormente se depositan en el fondo marino. En casos aislados, el hidrocarburo puede llegar a ser arrastrado con elevados niveles de materiales sólidos suspendidos durante situaciones de tormenta, y descender hasta el fondo marino. Así mismo, la arena arrastrada por el viento puede depositarse en ocasiones sobre hidrocarburos flotantes y provocar su hundimiento.

En mares picados, los hidrocarburos densos pueden estar cubiertos por el oleaje y pasar una cantidad de tiempo considerable justo debajo de la superficie, lo que dificulta considerablemente la observación del hidrocarburo desde el aire. Este fenómeno se confunde en ocasiones con el hundimiento del hidrocarburo, aunque cuando las condiciones se calman, el hidrocarburo vuelve a aparecer en la superficie. La sedimentación es uno de los procesos clave a largo plazo que dan lugar a la acumulación de hidrocarburo derramado en el entorno marino. Sin embargo, raras veces se observa un hundimiento masivo de hidrocarburo excepto en aguas poco profundas, cerca de la orilla, principalmente como resultado de la interacción con la costa (ITOPF, 2011).

4.5.8 Biodegradación. El agua de mar contiene una gran diversidad de microorganismos marinos capaces de metabolizar compuestos de hidrocarburos. Entre estos microorganismos se incluyen bacterias, levaduras, mohos, algas unicelulares y protozoos, que pueden emplear el hidrocarburo como fuente de carbono y energía.

Hay dos tipos de oxidación microbiana: anaeróbica, que utiliza oxígeno tanto atmosférico como disuelto en el agua; y anaeróbica, que utiliza muy poco oxígeno y más bien nitratos o sulfatos. El resultado de la degradación microbiana es la conversión biológica de hidrocarburos en masa biológica que puede ser usada como alimento por el resto de los organismos marinos (Vergara & Pizarro, 1981).

Los principales factores que afectan a la velocidad y grado de biodegradación son las características del hidrocarburo, disponibilidad de oxígeno y nutrientes (principalmente

compuestos de nitrógeno y fósforo) y temperatura. A medida que los hidrocarburos se descomponen, se generan diversos compuestos intermedios, aunque los productos finales de la biodegradación son dióxido de carbono y agua.

Cada tipo de microorganismo que interviene en el proceso tiende a degradar un grupo de hidrocarburos específico y, por lo tanto, se requiere una amplia variedad de microorganismos, actuando juntos o sucesivamente, para que continúe la degradación. A medida que la degradación continúa, se desarrolla una comunidad compleja de microorganismos. Los microorganismos necesarios para la biodegradación están presentes en cantidades relativamente pequeñas en áreas de mar abierto alejadas de las costas, aunque se multiplican rápidamente cuando existen hidrocarburos disponibles y la degradación continúa hasta que el proceso se limite por la ausencia de nutrientes u oxígeno. Además, aunque los microorganismos pueden degradar muchos de los compuestos presentes en el petróleo crudo, algunas moléculas grandes y complejas son resistentes al ataque y estos residuos suelen incluir los compuestos que confieren al hidrocarburo su color negro.

Los microorganismos viven en el agua, de la que obtienen oxígeno y nutrientes esenciales y, en consecuencia, la biodegradación solo puede producirse en una interface de hidrocarburo/agua. En el mar, la formación de gotas de hidrocarburo, bien de forma natural o por dispersión química, aumenta el área de la interface disponible para la actividad biológica, lo que mejora la degradación. Por el contrario, el hidrocarburo varado en capas gruesas en costas o por encima de la marea alta presentarán un área superficial limitada y un contacto muy restringido con el agua. En

estas condiciones, la biodegradación se producirá de una forma extremadamente lenta, y el hidrocarburo persistirá durante muchos años si no es retirado (ITOPF, 2011).

4.6 Barreras De Contención

Las barreras de contención constituyen un elemento indispensable en el control de un derrame. Son el equipo más utilizado para contener un derrame de petróleo en el agua. Si se usan correctamente, y las condiciones lo permiten, pueden contener y confinar un área determinada, previniendo así que el petróleo se extienda sobre la superficie. Así mismo, pueden aumentar la capacidad de control del derrame de petróleo, orientando la mancha hacia un lugar deseado para su recolección, protegiendo una línea de playa u otra área, o aumentando el espesor de la mancha de petróleo, lo que hace más fácil la recolección y posteriormente disposición del petróleo (Vergara & Pizarro, 1981).

4.6.1 Elementos De Una Barrera De Contención. Las barreras se parecen a una cortina vertical con segmentos que se extienden por encima y por debajo de la línea de flotación. La mayoría de las barreras están formadas por los siguientes componentes básicos (Pardal, 2015 & Casado, 2013):

- a) Flotador: Es la parte alta, da flotabilidad al conjunto manteniendo a las barreras por encima del agua.
- b) Francobordo: Constituye la parte emergida de la barrera, su función es evitar que el aceite fluya por la parte superior de la barrera.

- c) Faldón: Es la parte sumergida de la barrera y su función es evitar que el aceite se arrastre debajo de la barrera.
- d) Elemento tensor: Da la resistencia estructural a la barrera y permite fijar su anclaje.
- e) Lastre: Es la parte baja, puede estar formado por una cadena, plomadas, cables, pesos metálicos, etc., su función es dar estabilidad a todo el conjunto de la barrera manteniendo esta vertical y evitando que el oleaje o el viento puedan tumbarla.

Las barreras de contención se construyen en secciones, generalmente de 15 o 30 m de largo, con conectores instalados en cada extremo para que las secciones de la barrera se puedan unir, remolcar o anclar. En la Figura 3 se presenta las partes de una sección de barrera.

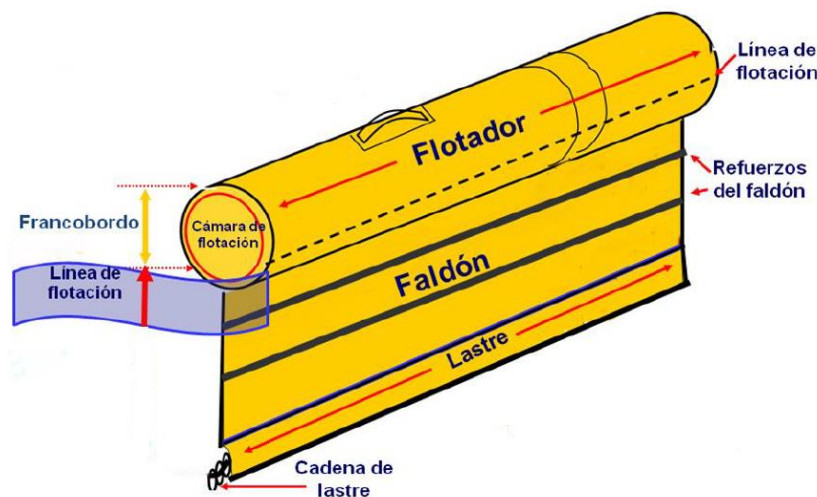


Figura 3. Partes de la barrera de contención. Adaptado de Casado Ferreiro, P. (2013). *Las barreras anticontaminación contra los vertidos hidrocarburos* (Trabajo de pregrado). Universidad de Cantabria, Cantabria, España.

4.6.2 Características Principales De Las Barreras De Contención. A continuación se describen las características más importantes de las barreras para determinar su capacidad

operativa (Fingas, 2011).

- a) **Relación flotabilidad/peso:** Se determina por la cantidad de flotación y de peso de la barrera. Esto significa que el flotador debe proporcionar suficiente flotabilidad para equilibrar el peso de la barrera con la fuerza ejercida por las corrientes y las olas, manteniendo así la estabilidad de la barrera. Cuanto mayor es la flotabilidad de la barrera, mayor es su capacidad de subir y bajar con las olas y permanecer en la superficie del agua.
- b) **Respuesta al movimiento:** Es la capacidad de la barrera de adaptarse a las olas de alta intensidad. Una barrera con buena respuesta al movimiento, se moverá con las olas en la superficie del agua y no se sumergirá, ni será empujada fuera del agua por la acción de las olas.
- c) **Respuesta al balanceo:** Se refiere a la capacidad de la barrera de permanecer en posición vertical en el agua y no volcarse fácilmente.

4.6.3 Fuerzas Que Actúan Sobre Las Barreras. Es importante entender cuáles son las fuerzas que afectan el comportamiento de una barrera en el agua; el conocimiento de estas fuerzas y efectos servirá para determinar cuándo, cómo y dónde desplegar más fácilmente una barrera; asegurarse que la barrera es usada de la manera más ventajosa posible en una situación dada; y contribuir sustancialmente al éxito de la operación de contención (Vergara & Pizarro, 1981).

4.6.3.1 Corrientes – Tensión En La Barrera. Cuando una barrera se coloca en una corriente, detiene el avance del agua en la superficie, la que a su vez ejerce una presión sobre la barrera. Esta presión depende de varios factores y produce una tensión longitudinal en la barrera,

que en algunos casos puede sobrepasar su límite de resistencia y romperla. Por lo tanto, es indispensable que el operador conozca los factores que producen tensión en la barrera y la manera en que varían con las condiciones de operación de la barrera.

Los principales factores que influyen en la tensión de la barrera son:

- 1) La velocidad de la corriente (o la velocidad de remolque de la barrera). La tensión es proporcional al cuadrado de la velocidad de la corriente. Por ejemplo, una corriente de 0,5 nudos, al variar a 2 nudos, aumenta en 16 veces la tensión de la barrera.
- 2) El área frontal de la barrera, proyectada transversalmente a la corriente (o a la dirección de remolque). La tensión es proporcional a esta área, dada por el calado o profundidad de la barrera, y el ancho de la curva formada por la barrera, medido transversalmente a la corriente. En otras palabras, un remolque muy abierto de la barrera, o un anclaje de extremos muy separados produce una tensión en la barrera mucho mayor que cuando la curva es cerrada.
- 3) Otros elementos de menor importancia serían la forma de la curva de la barrera y la densidad del agua.

De lo anterior se deduce que el efecto combinado de la corriente y la abertura transversal de la barrera, debe ser cuidadosamente observado y planificado, especialmente en el caso de corrientes fuertes, para evitar la ruptura de la barrera. Además, cuando el viento es fuerte y tiene la misma dirección de la corriente, produce el mismo efecto y aumenta la tensión en la barrera.

4.6.3.2 Corrientes – Contención Del Petróleo. Desde el punto de vista de la contención y concentración de un derrame, el efecto de la corriente en la barrera es importante, ya que en

general:

- 1) Si la corriente es superior a 0,7 nudos, perpendicular a la barrera, el petróleo se desplaza por debajo, perdiéndose el efecto de contención. Debe entonces recurrirse a la colocación de la barrera en ángulo con la corriente. Si la corriente es superior a 3,5 nudos, la concentración será imposible, a pesar del ángulo.
- 2) La corriente flectará o curvará la barrera formando un bolsillo donde se acumula el petróleo derramado. Sin embargo, si existe un viento fuerte y con distinta dirección a la corriente, o bien la corriente cambia de dirección, entonces la mancha no se acumulará en el bolsillo y no habrá contención.

4.6.3.3 Viento, Olas Y Marejadas. A menudo el viento es el factor que controla el movimiento de una mancha sobre la superficie del agua. El viento, al igual que la corriente, también actúa como una fuerza directa sobre el área de francobordo de una barrera. Esta fuerza puede ser opuesta a la fuerza de la falda resultando en una inestabilidad.

Las olas y marejadas alteran la superficie del agua. La barrera debe ser suficientemente flexible como para seguir el contorno del oleaje, y mantener un francobordo constante. Las olas que golpean el francobordo de una barrera producen una fuerza momentánea sobre la barrera, que puede ser varias veces superior a la fuerza de la corriente. Para soportar el oleaje, la barrera debe ser mucho más resistente que aquella que se utilizará en aguas tranquilas.

El efecto de las corrientes excesivas, vientos, olas y marejadas producen fallas funcionales o mecánicas en el uso efectivo de las barreras. Las fallas funcionales de las barreras se presentan en el numeral 4.6.5.

4.6.4 Forma Básicas De Contención Con Barreras. Debido a su flexibilidad, las barreras están dispuestas a menudo en una configuración U, V o J (Fingas, 2011).

- a) La configuración en U es la más común y se logra remolcando la barrera detrás de dos buques, anclando la barrera o combinando estas dos técnicas. La forma de U es creada por el empuje contra el centro de la barrera. El requisito crítico es que la corriente en el vértice de la U no exceda los 0,5 m o 1 nudo, a esto se le conoce como la velocidad crítica. Esta es la velocidad de la corriente que fluye perpendicularmente a la barrera, por encima de ésta, se perderá petróleo de la barrera. En la Figura 4 se muestra la configuración en U.
- b) La configuración en J es una variación de la configuración en U, generalmente se usa para contener petróleo y para desviarlo al área de contención. Esta configuración generalmente consta de dos barreras con una fuerza contraria como un skimmer en el vértice de las dos barreras. En la Figura 4 se muestra la configuración en V.
- c) La configuración en J también se logra remolcando la barrera mediante el uso de dos buques, pero como su nombre lo indica adquiere una configuración en J. En la Figura 4 se muestra la configuración en J.

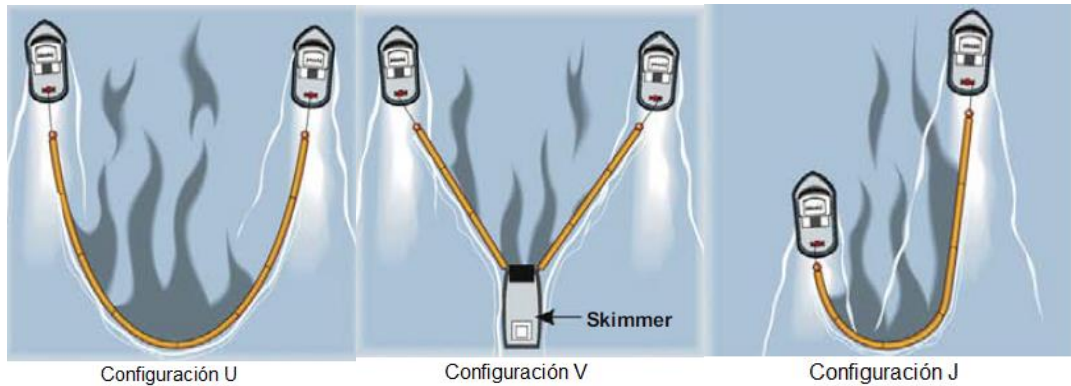


Figura 4. Diferentes configuraciones utilizadas en el despliegue de las barreras de contención. Adaptado de Fingas, M. (2011). *Oil spill science and technology. Prevention, response, and cleanup*. Estados Unidos: Elsevier.

4.6.5 Modos De Falla De Las Barreras. El rendimiento de una barrera y su capacidad para contener petróleo se ve afectado por las corrientes de agua, las olas y los vientos. Sólo o en combinación, estas fuerzas a menudo conducen a la falla de la barrera y la pérdida de petróleo. A continuación se describen las ocho (8) formas comunes en que las barreras fallan (Fingas, 2011):

- 1) Falla por arrastre: Este tipo de falla es causado por la velocidad de la corriente de agua y es más probable que ocurra con un aceite ligero. Cuando una barrera está conteniendo petróleo en el agua en movimiento, si la corriente es lo suficientemente rápida, la barrera actúa como una presa y el agua superficial retenida se desvía hacia abajo y se acelera en un intento de seguir el ritmo del agua que fluye directamente debajo del agua. La turbulencia resultante hace que las gotas se separen del petróleo que se ha acumulado en la barrera, por tanto, pasan por debajo de la barrera y aparecen detrás de ésta. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar este tipo de falla. Cuando las velocidades superan la velocidad crítica, este tipo de falla se puede superar colocando la barrera en ángulo con la corriente o en modo de deflexión.

- 2) Falla de drenaje: Esta falla es similar al de arrastre; está relacionado con la velocidad de la corriente de agua, excepto que afecta el petróleo directamente cercano a la barrera. Después de que se alcanza la velocidad crítica, la corriente puede barrer grandes cantidades del petróleo contenido directamente en la barrera. Es más probable que ocurran fallas de arrastre y drenaje con aceites ligeros. Uno o ambos de estos dos tipos de falla pueden ocurrir dependiendo de las corrientes y del diseño de la barrera. La Figura 5 muestra este tipo de falla de la barrera.
- 3) Acumulación crítica: Este tipo de falla generalmente ocurre cuando se contiene petróleo pesado que no es probable que quede atrapado en el agua. Los aceites más pesados tienden a acumularse cerca del borde de la barrera y son barridos debajo de ésta cuando ocurre cierto punto crítico de acumulación (ver Figura 5).
- 4) Escape por encima: Esta falla ocurre en mar agitado o en alta mar cuando las olas son más altas que el francobordo de la barrera y el petróleo salpica sobre el flotador o sobre el francobordo. También puede ocurrir como resultado de una gran acumulación de petróleo en la barrera en comparación con el francobordo (ver Figura 5).
- 5) Falla de inmersión: Este tipo de falla ocurre cuando el agua pasa sobre la barrera. A menudo, la barrera no es lo suficientemente flotante como para seguir el movimiento de la ola, y parte de la barrera se hunde debajo de la línea de flotación, ocurriendo que el petróleo pasa sobre éste (ver Figura 5). La falla de inmersión generalmente es el resultado de una respuesta de elevación deficiente, que se mide tanto por la flotabilidad como por la flexibilidad de la barrera. Esta falla no es tan común.
- 6) Pérdida de verticalidad: Esta falla ocurre cuando la barrera se mueve de su posición vertical diseñada a casi una posición horizontal en el agua. El petróleo pasa sobre o debajo de la

barrera. La pérdida de verticalidad ocurre si las piezas de tensión están mal diseñadas y no sostienen la barrera en posición vertical o si la barrera está remolcado en corrientes que exceden la velocidad crítica (ver Figura 5).

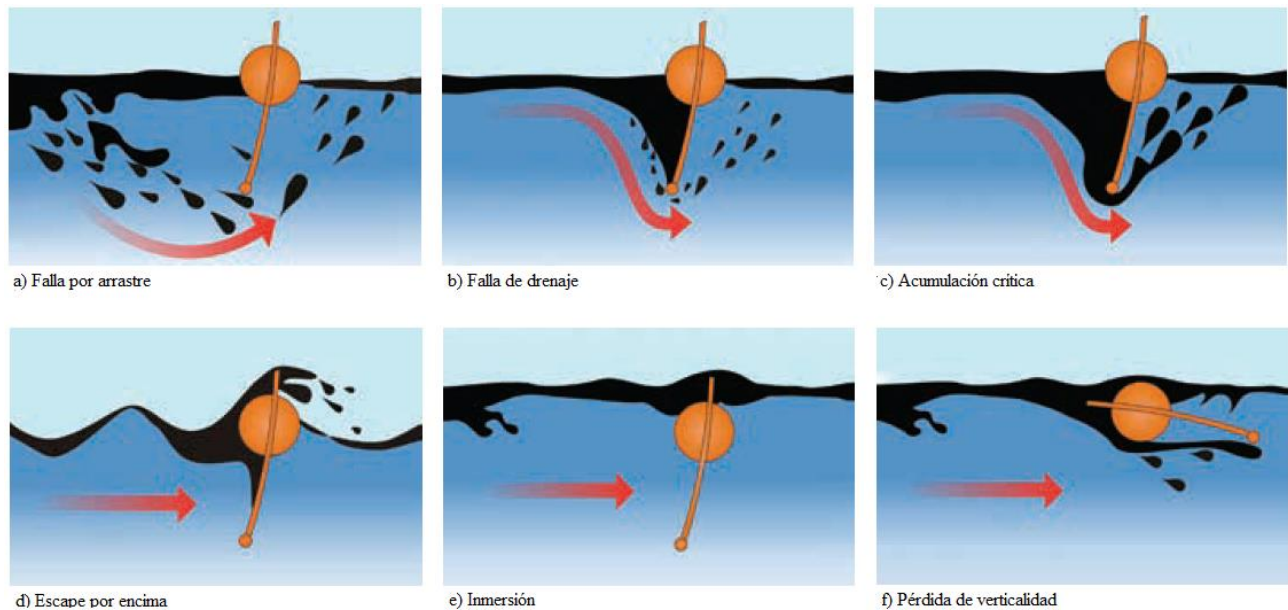


Figura 5. Modo de falla de las barreras de contención. Adaptado de Fingas, M. (2011). *Oil spill science and technology. Prevention, response, and cleanup*. Estados Unidos: Elsevier.

- 7) Falla estructural: Esta falla ocurre cuando alguno de los componentes de la barrera falla y, por ende, la barrera deja escapar el petróleo. A veces, la falla estructural es tan grave que la corriente se lleva la barrera. Esto no sucede a menudo en corrientes y condiciones normales. Los desechos flotantes, como troncos y hielo, pueden contribuir a fallas estructurales.
- 8) Bloqueo de aguas poco profundas: Este tipo de falla ocurre cuando se forman corrientes rápidas debajo de la barrera cuando se usa en aguas poco profundas. Con la barrera actuando como una presa, el flujo de agua debajo aumenta y el petróleo se pierde en varias de las formas ya descritas. Las aguas poco profundas son probablemente la única situación en la

que la barrera más pequeña podría funcionar mejor que una más grande. Cabe señalar, sin embargo, que las barreras no se utilizan con frecuencia en aguas poco profundas.

4.6.6 Tipos De Barrera. Los tipos de barreras que actualmente se identifican según Schulze Robert son:

4.6.6.1 Barreras De Valla. Las barreras de valla están constituidas por una única pantalla que forma el francobordo y el faldón. Los flotadores están colocados lateralmente a intervalos y los lastres se acostumbra a estar fijados equiespaciadamente, en la parte inferior de esta pantalla (ver Figura 6).

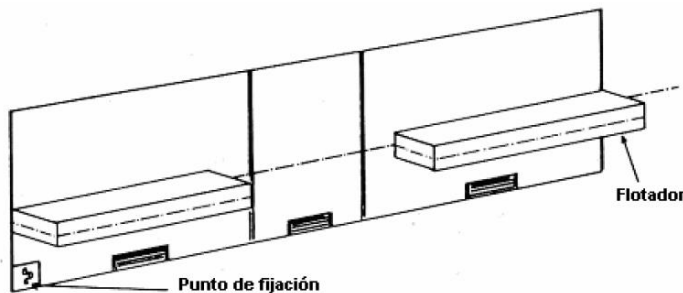


Figura 6. Barrera de valla. Adaptado de Stratex (2018). Recuperado de <https://stratex.com.au/product/pvc-fence-booms/>.

Este tipo de barreras son fabricadas en materiales robustos como el polietileno, diseñados para resistir los duros efectos de la abrasión, los rayos del sol, el aceite y demás.

En estas barreras se utiliza más la flotación sólida en caso de utilizar flotadores externos, aunque estos pueden generar turbulencias que ocasionan escapes de hidrocarburos en corrientes de

mediana velocidad. Además, son voluminosos para almacenar y difíciles de limpiar; sin embargo, son fáciles de desplegar y muy resistentes al daño.

Por lo general, las barreras de valla son más adecuadas para ser utilizadas en aguas tranquilas con bajas velocidades de corrientes como ríos, arroyos, estanques y puertos, pues tienen un mal comportamiento ante las olas y el viento (Pardal, 2015).

4.6.6.2 Barreras De Cortina. Las barreras de cortina poseen un faldón o malla flexible superficial continua que se sostiene por una cámara de flotación sólida o de aire, generalmente de sección transversal circular y son construidas de material más flexible. Las barreras de cortina poseen una buena capacidad de adaptarse a las olas, velocidades de escape moderadas y son relativamente fáciles de limpiar (Pardal, 2015). A continuación se describen las diferentes clases de barreras tipo cortina:

- ***Barreras Tipo Cortina Con Flotación De Espuma Interna***

Este tipo de barreras generalmente usan una tela flexible, relativamente ligera de PVC (policloruro de vinilo) o poliuretano para cubrir la flotación de espuma flexible. La cámara de flotación está diseñada bien sea con espuma granular, espuma sólida o espuma laminada flexible.

La espuma granular proporciona una excelente flexibilidad para la respuesta de elevación, sin embargo, esta puede perderse o saturarse con agua si se rompe la cámara de flotación; así mismo, la espuma granular también puede desplazarse en la cámara de flotabilidad dejando algunas áreas sin flotabilidad. La espuma sólida evita estos problemas, pero la respuesta de elevación no es tan

buena; además, ésta puede desmoronarse y romperse con el manejo. La espuma laminada flexible parece ser la más popular ahora porque proporciona una cantidad moderada de flexibilidad, es muy duradera y mantiene un gran porcentaje de flotabilidad normal incluso si la cámara de flotación se inunda. Estas barreras están diseñadas en segmentos cortos para mejorar la respuesta de elevación y para proporcionar puntos de plegado para el almacenamiento. La barrera de flotación de espuma puede ser cilíndrica o rectangular. Las versiones de "corriente rápida" de las barreras a veces tienen agujeros cerca del fondo del faldón de la barrera para reducir la velocidad del flujo por la cara de la misma (Schulze, 2000).

Por lo general, este tipo de barreras se despliega típicamente en aguas costeras, puertos y terminales, ríos o arroyos (Marine Spill Response Corporation, 2020). Es robusta, de fácil y rápido despliegue. Es resistente a la luz solar, a los hidrocarburos y al tratamiento rudo, a la vez que es duradera y relativamente fáciles de limpiar (Vikoma Internationa, 2020). La Figura 7 muestra una barreras tipo cortina con flotación de espuma interna.



Figura 7. Barreras tipo cortina con flotación de espuma interna. Adaptado de Vikoma Internationa (2020). *Containment Booms*. Recuperado de https://www.vikoma.com/Oil_Spill_Solutions/Booms/Vikoflex.html.

- ***Barreras Tipo Cortina Con Flotación De Espuma Externa***

Las barreras de cortina con flotación de espuma externa se ven exactamente como algunas barreras de valla, excepto que el material de la falda es flexible. Las barreras de valla con espuma externa a menudo están hechas de un material muy pesado y rígido. Sin embargo, hoy día se han desarrollado nuevas telas, lo que ha hecho posible tener una falda muy fuerte, pero ligera y flexible a la que se une la flotación de espuma externa. A este producto con falda flexible se le clasifica como una barrera de cortina.

Las barreras de cortina con flotación de espuma externa generalmente tienen flotación de espuma rígida que viene en secciones bastante cortas para una mejor respuesta de elevación y facilidad de almacenamiento. Así mismo, la relación de flotabilidad/peso es buena, mejor que las barreras de valla por su tela ligera y fuerte utilizada en la falda; además, son bastante duraderas y fáciles de desplegar (Schulze, 2000). En general, este tipo de barreras es ideal para el despliegue a corto o largo plazo en puertos, ríos, estanques, presas u otras aguas abiertas más agitadas. En la Figura 8 se presenta una barrera de cortina con flotación de espuma externa.

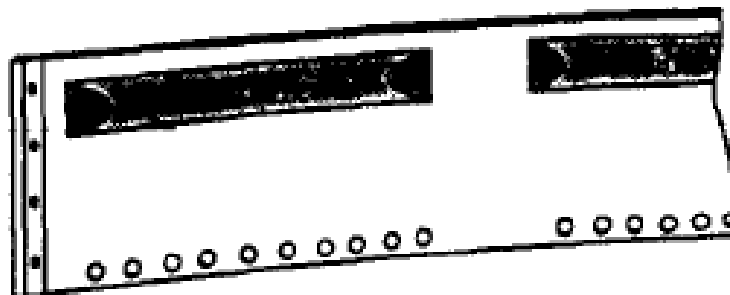


Figura 8. Barreras tipo cortina con flotación de espuma externa. Adaptado de Schulze, R. (2000). *Oil spill response performance review of booms*. Estados Unidos: Minerals Management Service.

- ***Barreras Tipo Cortina Autoinflable***

Las barreras de cortina autoinflables tienen cámaras de flotación que se comprimen en el almacenamiento y se inflan por el aire atmosférico en el despliegue a través de válvulas de admisión unidireccionales o puertos de aire cubiertos. La cámara de flotación mantiene su forma ya sea solo a presión atmosférica, o a veces por marcos y muelles plegables, o por una bobina helicoidal. Una ventaja importante de estas barreras es que se pueden implementar rápidamente, pues, esta se infla mientras se despliega, estando operativa cuando llega al agua, con el empleo de muy poco personal. Además, dado que las cámaras de flotabilidad están llenas de aire y son muy flexibles, tienen una alta relación de flotabilidad/peso y una buena respuesta de elevación; sin embargo, existe la posibilidad de pérdida de flotabilidad por agentes externos, una vez se utilice en el medio. Otra ventaja es que son compactas y se almacenan en un pequeño volumen. No obstante, estas requieren alto mantenimiento (Casado, 2013). Las barreras de cortina autoinflables generalmente están hechos de PVC flexible, relativamente ligero o tela recubierta de poliuretano (Schulze, 2000). Está diseñada para su uso en aguas continentales, aguas protegidas y puertos, así como en bahías y aguas costeras (Mavi Deniz, 2018). En la Figura 9 se presenta la barrera autoinflamable.



Figura 9. Barreras tipo cortina autoinflable. Adaptado de Canadyne Technologies Inc. (2020). *Containment booms*. Recuperado de <http://www.canatec.com/rapid-deployment-booms>. Canadá.

- ***Barreras Tipo Cortina Inflables A Presión***

Las barreras de cortina inflables a presión tienen cámaras que se inflan para proporcionar flotabilidad. Algunas versiones tienen cámaras de flotabilidad segmentadas que se inflan individualmente a mano utilizando un compresor o un soplador de aire. Otras versiones tienen cámaras de flotabilidad continua infladas por un soplador de aire. Las versiones más nuevas de las barreras de flotabilidad continua tienen cámaras compartimentadas con válvulas de retención y son infladas por un soplador de aire. Las barreras inflables a presión pueden estar hechas de tela ligera recubierta de PVC o poliuretano, o en ocasiones de neopreno pesado o caucho de nitrilo o nylon.

La barrera de cortina inflable a presión tiene las ventajas de tener una alta relación de flotabilidad/peso y una respuesta de elevación relativamente buena; sin embargo, su flotabilidad se puede ver afectada en dado caso de que exista elementos extraños que conlleven a desinflar la barrera. Cuando se desinfla, se puede almacenar en un pequeño volumen. Tiene la desventaja de requerir de medios mecánicos para su inflado, además su velocidad de despliegue es más lenta que las barreras autoinflables (Schulze, 2000). Al igual que los otros tipos de barreras, estos requieren un mantenimiento regular, con especial énfasis en verificar las condiciones de todas las válvulas. Estas barreras se utilizan en condiciones exigentes, zonas costeras y en alta mar (Marine Spill Response Corporation, 2020); también se puede utilizar en ríos, estuarios y puertos (Dagorn & Dumont, 2012). La Figura 10 muestra la barrera de cortina inflable a presión.



Figura 10. Barreras tipo cortina inflable a presión. Adaptado de Canadyne Technologies Inc. (2020). *Containment booms*. Recuperado de <http://www.canatec.com/pressure-inflatable-booms>. Canadá.

4.6.6.3 Barreras De Sellado. Las barreras de sellado están compuestas por tres cámaras independientes que recorren toda su longitud. La cámara superior usa aire o espuma para favorecer la flotación, y las dos inferiores están llenas de agua. Flotan libremente durante la marea alta y proporcionan un sellado eficaz con la arena cuando la marea es baja. Cuando está conectado a tierra, el lastre de agua pesada de la barrera evita que el petróleo se mueva a lo largo de la zona intermareal (Schulze, 2000).

Las barreras de sellado están hechas en telas de PVC, que son lo suficientemente resistentes y duraderas para sobrevivir al uso repetido en sustratos de arena y barro. Estas barreras son adecuadas en ambientes de agua poco profundas, con olas relativamente bajas, pantanos, lagunas, playas y humedales (Global Spill & Safety, 2020 & Mavi Deniz, 2018). La Figura 11 muestra una barrera de sellado.



Figura 11. Barreras de sellado. Adaptado de Lamor Corporation (2020). *Beach Sealing Boom*. Recuperado de <https://www.lamor.com/beach-sealing-boom>. Finlandia.

4.6.6.4 Barreras Resistentes Al Fuego. Las barreras resistentes al fuego se utilizan para contener grandes derrames en un área limitada para que el aceite se pueda quemar de forma controlada, eliminando así el contaminante del agua (SpillPro, 2019). Están diseñadas especialmente para soportar el calor.

Algunos son de acero inoxidable cuyo almacenamiento y despliegue pueden ser problemáticos debido al alto peso por unidad de longitud (Dagorn & Dumont, 2012). Otras son barreras hechas con espuma interna que tienen un núcleo de flotación de alta temperatura cubierto con material textil cerámico de alta temperatura y encerrado en una malla tejida de acero inoxidable resistente a la abrasión en una cubierta de PVC (Schulze, 2000). Estas son más livianas, más fáciles de implementar y menos costosas.

Estas barreras son particularmente adecuadas para puertos petroleros y muelles, plataformas de perforación en alta mar y otras áreas sensibles donde se requiere una alta clasificación de fuego (JXY, 2011).

Cabe resaltar que, algunos hidrocarburos pueden ser quemados con un alto grado de eficiencia cuando la mancha de hidrocarburo tiene: un espesor adecuado mayor a 2 mm, el evento es relativamente reciente y éste es poco emulsionado (Casado, 2013). La Figura 12 muestra una barrera diseñada para la quema in situ.



Figura 12. Barreras resistentes al fuego. Adaptado de Elastec (2020). *Fireboom*. Recuperado de <https://www.elastec.com/products/floating-boom-barriers/fire-resistant-oil-boom/american-fireboom/>. Estados Unidos.

Una vez se aplica este tipo de barrera para contener el hidrocarburo, se destacan las siguientes ventajas (Casado, 2013):

- Se eliminan grandes cantidades de hidrocarburo, con un grado de efectividad del 90 al 95%, en corto tiempo.
- Es un método que elimina los procesos posteriores a la contención, como son la recuperación, almacenamiento y tratamiento del hidrocarburo.
- Reduce el número de operarios y de equipos.

Sin embargo, el uso de esta barrera con posterior quemado in situ tiene como desventaja ocasionar trastornos en las especies bajo superficie del agua, además, son poco usadas y de alto costo.

4.7 Mantenimiento De Las Barreras De Contención

Para asegurar una larga utilización y duración de las barreras se debe establecer una rutina de mantenimiento a fin de ponerlas nuevamente en estado operativo antes de su almacenamiento.

Las barreas deben ser desplegadas y comprobadas en seco periódicamente para evitar dobleces en el material; si se encuentran sucias por el tiempo de almacenaje, es conveniente un lavado con agua dulce a presión o máquina y posteriormente garantizar su secado antes del nuevo almacenamiento. Durante éste despliegue es necesario la comprobación del estado de las partes metálicas, conexiones y cadenas de lastre con el cambio de los elementos dañados, en dado caso de ser necesario.

Las roturas o desgarros en el tejido de las barreras pueden ser ocasionados cuando se sobrepasan las especificaciones de trabajo para las que han sido diseñadas. Este sobreesfuerzo puede ser ocasionado por malas condiciones de viento, corriente u oleaje, el roce contra la costa durante las mareas en aquellas barreras colocadas en la costa, pinchazos o roturas por objetos a flote como maderas, palos, embarcaciones, etc. En el caso de las barreras tipo cortina hinchables se deben inflar completamente para asegurar que no existe pérdida de presión en las cámaras por pinchazos o roturas; también es necesario comprobar el estado de las válvulas de inflado (Casado, 2013).

4.8 Barreras Sorbentes

Las barreras sorbentes se componen de una amplia gama de productos orgánicos, inorgánicos y sintéticos diseñados para retirar hidrocarburos en lugar de agua. Aunque se utilizan ampliamente en la respuesta a derrames, estos deben emplearse con cautela para reducir al mínimo el uso excesivo e inapropiado, ya que puede plantear dificultades logísticas importantes relacionadas con la contaminación secundaria, retirada, almacenamiento y desecho. Todos estos factores aumentan considerablemente los costos generales de las operaciones de limpieza. En particular, material sintético debe emplearse con moderación y cuidado para asegurar que se utilice a pleno rendimiento para minimizar problemas posteriores de eliminación de residuos.

En general, la mayor eficacia de las barreras sorbentes se obtienen cuando se utilizan durante las etapas finales de la limpieza y para retirar pequeñas acumulaciones de hidrocarburos cuando no es posible retirarlas mediante otras técnicas de limpieza. El uso de estas barreras no resulta adecuado en mar abierto (ITOPF, 2012).

Es importante tener en cuenta que la eliminación de las barreras sorbentes saturadas de hidrocarburo también puede causar complicaciones importantes (Pardal, 2015). Ninguna barrera sorbente se puede utilizar de manera ilimitada, su duración depende del tipo de aceite, del cuidado con el que se maneje, de la presión con la que se escurre, etc., por tanto, son sistemas adecuados para su uso a corto plazo. Estas barreras son utilizadas en lagos y ríos; también se emplea en playas para proteger la orilla. La Figura 13 muestra una barrera sorbente.



Figura 13. Barreras sorbentes. Adaptado de Complete Environmental Products (2020). *Oil Only Absorbent Boom*. Recuperado de <http://www.cepsorbents.com/booms>.

La durabilidad de una barrera sorbente es importante cuando existe la posibilidad de que permanezca desplegado durante un periodo de tiempo prolongado antes de la recolección. Las barreras podrían comenzar a degradarse y separarse en cuestión de horas como resultado de los efectos medioambientales, como la acción de las olas o la abrasión sobre rocas. La resistencia de algunas barreras sorbentes, en especial aquellas que se componen de material suelto, depende de la durabilidad del material de las redes de retención, que podría romperse y abrirse bajo condiciones medioambientales adversas. Una vez dañadas, se perderá con facilidad el contenido de estas y podría convertirse en una fuente secundaria de contaminación (ITOPF, 2012).

Las barreras sorbentes son voluminosas por naturaleza y, en grandes cantidades, puede resultar relevante el espacio de almacenamiento necesario. Además, requieren protección frente a la incidencia de la luz solar para evitar su degradación (ITOPF, 2012).

Por otra parte, las barreras son relativamente ligeras, especialmente inmediatamente después del despliegue, y el viento las puede levantar con facilidad; por lo tanto, requieren el uso de amarres o anclajes (ITOPF, 2012).

En teoría, se pueden reutilizar las barreras siempre y cuando se consiga extraer los hidrocarburos. Esto puede realizarse por compresión mediante un escurridor o exprimidor de rodillos, por centrifugación o por extracción con disolventes. En general, la compresión es la opción más práctica. Sin embargo, debe considerarse el número de ciclos de reutilización que el material puede resistir antes de que quede inservible debido a roturas, aplastamiento o deterioro general (ITOPF, 2012).

4.9 Dispersantes Químicos

Los dispersantes químicos son compuestos que reducen la tensión superficial agua - hidrocarburo por medio de productos que contienen agentes tensoactivos. Estos agentes tensoactivos están compuestos por dos partes, una parte de cabeza hidrofílica que tiene afinidad por el agua y otra parte de cola oleofílica que tiene afinidad por el hidrocarburo. Gracias a esta propiedad los dispersantes forman diminutas y numerosas gotitas de hidrocarburo y retardan la reunión de esas gotas para evitar que vuelvan a formar manchas nuevamente (Ver Figura 14).

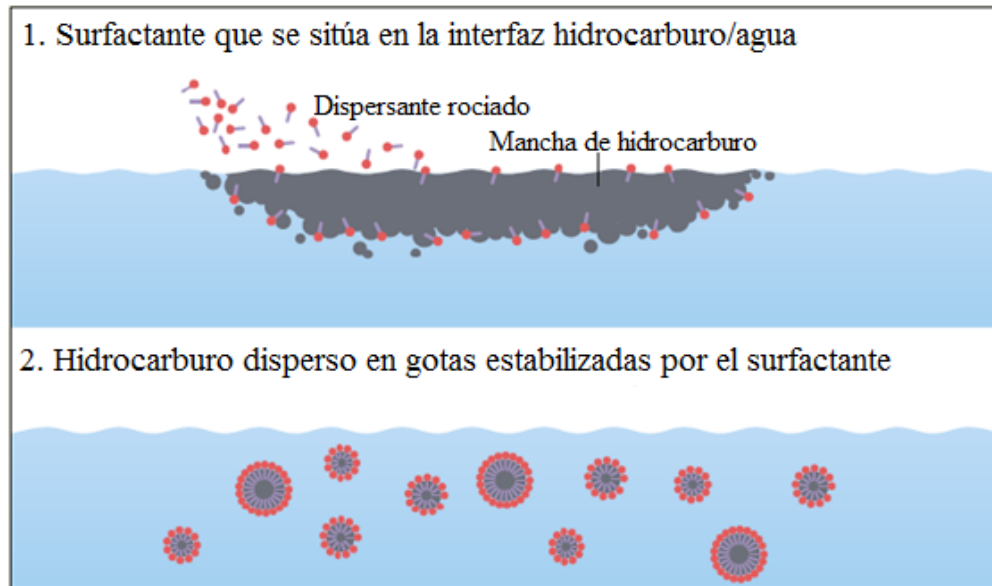


Figura 14. Efecto del dispersante en el agua. Adaptado de Casado Ferreiro, P. (2013). *Las barreras anticontaminación contra los vertidos hidrocarburos* (Trabajo de pregrado). Universidad de Cantabria, Cantabria, España.

El objetivo principal del dispersante es suprimir el efecto del derrame de petróleo al reducir la cantidad de petróleo que llega a tierra por las olas de agua y al convertir el petróleo derramado en pequeñas partículas y gotas para que puedan dispersarse debajo de la columna de agua (Anish, 2019). Una vez en tamaños de gota lo suficientemente pequeños, el aceite puede ser biodegradado por microorganismos naturales. Este método se considera una opción favorable para hacer frente a un derrame de petróleo. Sin embargo, existen implicaciones negativas al usar este método. Existe una gran preocupación y debate de que agregar estos dispersantes químicos al océano está provocando efectos perniciosos en la vida marina, envenenando peces, corales y otras especies (University of Miami, 2018).

Los dispersantes son más efectivos cuando hay oleaje que cuando el mar está en calma. Funcionan mejor si se aplican tan pronto como sea posible después de que ocurra el derrame de

hidrocarburos. Los cambios en la composición del hidrocarburo y de sus propiedades físicas, ocasionados por la pérdida de los componentes más volátiles del hidrocarburo mediante la evaporación y la formación de emulsiones, disminuyen progresivamente la efectividad de los dispersantes (Casado, 2013). Los sistemas de aplicación de dispersantes existentes suelen agruparse en función del dispositivo que los transporta, sistemas portátiles de uso individual, para una persona, por embarcaciones o bien por aeronaves ya sean aviones o helicópteros.

Dentro de las ventajas de emplear dispersantes en derrames de hidrocarburo se destaca su respuesta rápida y su aplicación en condiciones climatológicas desfavorables. La principal desventaja cuando se utiliza el dispersante, es la reducción del proceso de fotooxidación y el incremento de la turbidez en el agua, por lo que dificulta el paso de la luz para el proceso de fotosíntesis de la flora marina. No se recomienda emplear en estuarios y zonas pantanosas ya que hay una acumulación de la mezcla hidrocarburo-dispersante que puede llegar a ser tóxica (Casado, 2013).

4.9.1 Clasificación De Los Dispersantes. Los dispersantes se clasifican según su generación y tipo (Anish, 2019):

- La primera generación de productos, introducida en la década de 1960, era similar a los limpiadores industriales y desengrasantes con alta toxicidad acuática. Los dispersantes de primera generación ya no se usan en la respuesta al derrame de petróleo
- Los dispersantes de segunda generación, también llamados dispersantes Tipo I, fueron diseñados explícitamente para tratar derrames de petróleo en el mar mediante pulverización

desde un bote. Contienen un solvente hidrocarbonado con un contenido aromático bajo o nulo y típicamente 15 a 25% de tensioactivo. Estos dispersantes de generación están destinados a aplicarse sin diluir

- Los dispersantes de tercera generación contienen una mezcla de dos o más tensioactivos con glicol y disolventes ligeros de destilado de petróleo. Los tensioactivos más comunes utilizados son no iónicos y aniónicos. La concentración de tensioactivo con el solvente se encuentra entre 25% y 65% y tiende a ser mayor que con los productos Tipo I.

4.10 Proceso De Análisis Jerárquico (AHP)

El AHP es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios, y está basado en el principio que la experiencia y el conocimiento de los actores, que son tan importantes como los datos utilizados en el proceso.

El AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior.

La mejor manera de entender el método es describiendo sus tres funciones básicas, las cuales se describen a continuación (Osorio & Orejuela, 2008):

- 1) Estructuración de la complejidad: Esta herramienta utiliza la estructuración jerárquica de los problemas en subproblemas homogéneos. Por tanto, el uso de la descomposición jerárquica es una de las grandes virtudes del método, ya que se descompone una meta u objetivo en

factores más simples, es decir, un problema se descompone en subproblemas, los cuales están relacionados directamente con el problema inicial, y al lograr la solución de los subproblemas y manteniendo la relación existente entre ellos, se consigue la solución del problema inicial.

En una jerarquía típica el nivel más alto localiza el problema de decisión (objetivo). Los elementos que afectan a la decisión son representados en los inmediatos niveles, de forma que los criterios ocupan los niveles intermedios, y el nivel más bajo comprende a las opciones de decisión o alternativas. La construcción del modelo es la parte más creativa del proceso y requiere de un consenso entre las partes implicadas para la toma de decisiones. La Figura 15 muestra un esquema del modelo jerárquico.

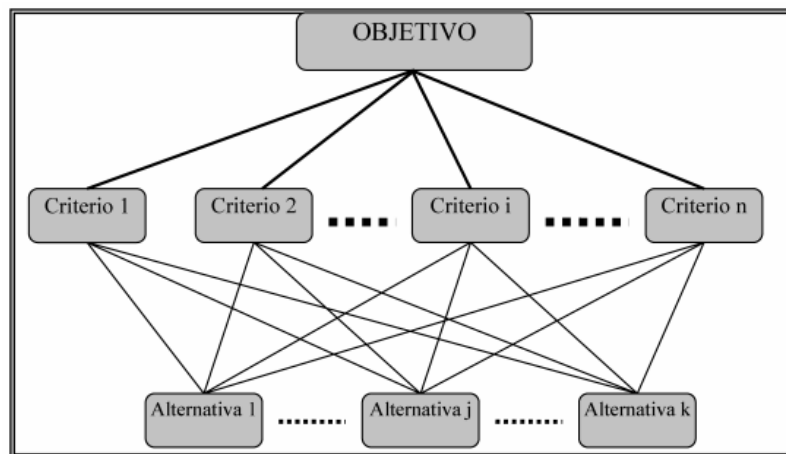


Figura 15. Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP. Adaptado de Martínez Rodríguez, E. (2007). *Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME*. *Anuario Jurídico y Económico Escorialense*, XL (39), 523-542.

- 2) Medición en escalas: El AHP permite realizar mediciones de factores tanto subjetivos como objetivos a partir de estimaciones numéricas, verbales o gráficas, lo cual le provee una gran

flexibilidad. En otras palabras, esta actividad consiste en una comparación de valores subjetivos por pares; las partes involucradas deben emitir juicios de valor sobre la importancia relativa de los criterios y de las alternativas, de manera que quede reflejado la dominancia relativa en términos de importancia, preferencia o probabilidad de un elemento frente a otro.

El hecho de tener definida una escala general, aplicable a cualquier situación, permite la universalidad del método y lo hace sencillo de aplicar para quien toma la decisión. Además, la escala es clara y provee una gran amplitud para las comparaciones. En la Tabla 2 se presenta la escala para la valoración de juicios.

Tabla 2.

Escala de valoración de los juicios

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y muy moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Nota: Adaptado de Toskano Hurtado, G. B. El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. La escala fue propuesta por Saaty a finales de los 70.

- 3) Síntesis: El enfoque del AHP es totalmente sistémico, analiza las decisiones a partir de la descomposición jerárquica y en ningún momento se pierde de vista el objetivo general y las interdependencias existentes entre los conjuntos de factores, criterios y alternativas.

Entre las principales ventajas del AHP se destaca:

- Analiza el efecto de los cambios en un nivel superior sobre el nivel inferior.
- Da información sobre el sistema y permite una vista panorámica de los actores, sus objetivos y propósitos.
- Permite flexibilidad para encarar cambios en los elementos de manera que no afecten la estructura total.
- Presenta un sustento matemático.
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos.
- Permite verificar el índice de consistencia y si es necesario realizar correcciones.

4.10.1 Fundamento Matemático Del AHP. Construye una matriz cuadrada de $n * n$, siendo n el número de criterios o características y cada elemento de esa matriz es el cociente resultante de comparar el criterio fila con el criterio columna; es decir si el criterio fila es de una importancia grande sobre el criterio columna, el elemento correspondiente sería 5/1, si fuese al revés es decir que el elemento columna tuviera una importancia grande sobre el criterio fila, la notación en este caso sería 1/5.

La matriz cuadrada construida $A_{n \times n} = [a_{ij}]$, con $1 \leq i, j \leq n$, debe cumplir con las siguientes propiedades (Escrivá, 2015):

- Reciprocidad: si $a_{ij} = x$, entonces $a_{ji} = 1/x$ con $1/9 \leq x \leq 9$.

- Homogeneidad: si los elementos ij son considerados igualmente importantes, entonces $a_{ij} = a_{ji} = 1$.
- Consistencia: Se satisface que $a_{ij} * a_{jk} = a_{ik}$ para todo $1 \leq i, j, k \leq n$.

A manera de ejemplo, en la Tabla 3 se presenta el resultado de comparar pares de elementos en una matriz $3 * 3$.

Tabla 3.

*Matriz de comparaciones pareadas $3 * 3$*

	A_1	A_2	A_3
A_1	1		a_{13}
A_2	a_{21}	1	a_{23}
A_3	a_{31}	a_{32}	1

4.10.2 Normalización De Una Matriz De Comparaciones Pareadas. Lo primero que se debe hacer es sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas. Después se debe dividir cada elemento de la matriz entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada. Finalmente, se calcula el promedio de los elementos de cada fila de la matriz normalizada a fin de obtener el vector de prioridades.

4.10.3 Análisis De Consistencia Del AHP. El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia (GC) entre las opiniones pareadas. Si el grado de consistencia es aceptable, se puede continuar con el proceso de decisión, de lo contrario se debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas, antes de continuar con el análisis.

El **GC** se define como el cociente entre el índice de consistencia (*IC*) de una matriz y el índice de consistencia aleatoria (*IA*), la cual se describe en la ecuación 1.

$$GC = \frac{IC}{IA} \quad (\text{Ec. 1})$$

El *IC* se define mediante la ecuación 2:

$$IC = \frac{\tau_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde el valor de τ_{max} se determina al calcular primero el vector columna de una matriz y después sumando sus elementos y *n* es el número de variables utilizadas en la matriz.

El *IA* se define mediante la ecuación 3:

$$IA = \frac{1,98 * (n - 2)}{n} \quad (\text{Ec. 3})$$

Si el valor del **GC** excede el valor de 0,10, se considera que el juicio es inconsistente en las relaciones pareadas; en casos se debe reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Por el contrario, si el valor del **GC** no excede el valor de 0,10, se considera que el juicio es razonable o consistente en las comparaciones pareadas (Quispe, 2017).

$GC \leq 0,1 \rightarrow$ Juicio consistente

$GC \geq 0,1 \rightarrow$ Juicio inconsistente

5 Marco Legal

- **Artículo 79 Y 80 De La Constitución Política.** El Estado debe proteger la diversidad e integridad del medio ambiente, conservar áreas de importancia ecológica y fomentar la educación medio-ambiental en pro de garantizar el derecho de todos los individuos a estar en un ambiente sano y planear el manejo y aprovechamiento de todos recursos naturales, garantizando así el desarrollo sostenible, conservación, restauración y/o sustitución; debe prevenir y controlar factores que deterioren el medio ambiente, imponer sanciones legales y exigir reparación a los daños causados por segundos o terceros.
- **Decreto 1594 De 1984.** “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III - Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquido”, en su artículo 84 establece que cualquier vertimiento a cuerpos hídricos donde se realicen actividades que impacten negativamente el agua debe ser tratado.
- **Decreto 2190 De 1995.** “Por el cual se ordena la elaboración y desarrollo del Plan Nacional de Contingencia contra derrames de Hidrocarburos, Derivados Sustancias Nocivas en aguas marinas, fluviales y lacustres”.
- **Decreto 321 De 1999.** “Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas”.

- **Decreto 3920 De 2010.** “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones”. En su artículo 27 se establece que se puede verter sustancias de la explotación de hidrocarburos a cuerpo hídricos si esta ha tenido el tratamiento adecuado y no genera impactos negativos en el medio acuoso.

6 Metodología

El presente trabajo pretende seleccionar la tecnología más idónea para contener derrames de petróleo en diferentes cuerpos de agua, aguas oceánicas y aguas continentales.

Para el cumplimiento de los objetivos se planteó la siguiente metodología:

6.1 Etapa 1. Revisión Bibliográfica De Las Barreras Y Los Mecanismos Para La Contención De Hidrocarburo En Cuerpos De Aguas.

Los autores realizaron una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las barreras y los mecanismos de contención existentes en el mercado, a fin de estructurar el marco teórico para soportar la recolección de la información. Para ello, se revisaron libros, artículos científicos, catálogos y páginas de internet de empresas que comercializan productos para la contención de derrames de hidrocarburos. Esta actividad permitió identificar:

- Aplicación de las barreras y mecanismos en los diferentes cuerpos de agua.
- Principales características de las barreras y mecanismos (facilidad de limpieza, facilidad de despliegue, facilidad de mantenimiento, resistencia de los materiales con que se fabrican las barreras, entre otros).

6.2 Etapa 2. Estructuración Del Proceso De Análisis Jerárquico (AHP) Para La Selección De La Mejor Alternativa

El AHP es una herramienta de toma de decisiones, que permite seleccionar la mejor opción, dentro de un conjunto de alternativas, las cuales son evaluadas frente a múltiples criterios definidos frente a un objetivo en particular.

En este trabajo, la herramienta se aplicó para seleccionar la mejor barrera de contención adaptada a un cuerpo de agua con características específicas. Para ello, fue necesario la identificación y estructuración de los elementos del modelo de AHP: identificación del objetivo, de criterios y de alternativas.

Se inició con la definición del objetivo principal. Éste está en función de la clasificación del agua en cuanto a cantidad y volumen. Se destacan las aguas oceánicas y las aguas continentales. Cada una de estas tiene diferentes orígenes y características (ver numeral 4.4 de este documento). Los objetivos identificados fueron cuatro (4), dos (2) para caracterizar las aguas oceánicas y dos (2) para caracterizar las aguas continentales.

El siguiente paso fue identificar los criterios para cada objetivo definido. Para ello, se analizó con detenimiento cada una de las barreras y mecanismos de contención. Lo anterior permitió identificar aspectos cualitativos propios de las barreras tales como adaptación al fuerte oleaje, adaptación al movimiento del mar, adaptación en aguas tranquilas, adaptación en aguas turbulentas, respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables, amigable con el medio ambiente, capacidad de dispersar el hidrocarburo, material de fabricación resistente, facilidad de mantenimiento, facilidad de limpieza y facilidad de despliegue.

Finalmente, se identificaron las alternativas propias de cada objetivo definido. Esta actividad se logró mediante un trabajo preliminar de análisis de la información realizado en la etapa 1. De manera general se listan las alternativas de barreras y mecanismos que existen en el mercado para la contención de derrames de hidrocarburo en cuerpos de agua: barrera de valla, barrera de cortina con flotación de espuma interna, barrera de cortina con flotación de espuma externa, barrera de cortina autoinflable, barrera de cortina inflable a presión, barrera de sellado, barrera resistente al fuego, barrera sorbente y dispersante químico.

6.3 Etapa 3. Aplicación Del Proceso De Análisis Jerárquico (AHP)

Una vez se definieron los modelos jerárquicos, se procedió a realizar para cada uno de ellos, la ponderación de los criterios respecto al objetivo principal; posteriormente se priorizaron las alternativas frente a cada uno de los criterios. Lo anterior se realizó mediante comparaciones de matrices pareadas o comparación de elementos por pares.

Para realizar la comparación de cada uno de los elementos, se empleó la escala definida en el numeral 4.10 (ver Tabla 2), que indica cuantas veces es más importante o dominante un elemento sobre otro.

Así mismo, se calculó el grado de consistencia tanto para la matriz de comparación de criterios como la matriz de comparación de alternativas; para ello, se emplearon las ecuaciones 1, 2 y 3 descritas en el numeral 4.10.3 de este documento.

El grado de consistencia permite validar los juicios dados a los elementos del modelo, es decir, corrobora que no se presente errores entre ellos o contradicciones en los mismos. En casos donde el grado de consistencia sea superior a 0,10 o 10%, se debe reevaluar nuevamente los juicios.

6.4 Etapa 4. Desarrollo De La Herramienta Para La Selección Del Mecanismo De Contención

Se diseñó la herramienta BOOM SOLUTIONS que utiliza la metodología de Análisis Jerárquico para la toma de decisiones multicriterio, que facilita la selección de la barrera o mecanismo de contención más apropiado ante un derrame de hidrocarburo en un cuerpo de agua en específico.

Adicionalmente, se desarrolló un manual de usuario de la herramienta que tiene como propósito brindar los elementos necesarios para que cualquier usuario navegue de forma fácil y sencilla en esta.

7 Resultados Y Análisis

7.1 Resumen De Las Barreras Y Los Mecanismos Para La Contención De Hidrocarburo En Cuerpos De Aguas

En la Tabla 4 se presenta un resumen de la aplicación y características principales de las barreras y los mecanismos de contención encontrados en la literatura.

Tabla 4.

Resumen de las barreras y los mecanismos de contención para contener derrames de hidrocarburos en diferentes cuerpos de aguas

Tipo de barrera o mecanismo de contención	Aplicación	Características principales
Barrera de valla	Aguas tranquilas con bajas velocidades de corriente (ríos, arroyos, estanques, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Barreras fabricadas con materiales robustos, diseñadas para resistir. • El despliegue en el agua es fácil. • Ocupan grandes áreas para su almacenamiento. • Son difíciles de limpiar. • Ante aguas turbulentas, se genera escape de hidrocarburo
Barrera de cortina con flotación de espuma interna	Aguas costeras (puertos) y aguas continentales (ríos, arroyos)	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñadas en segmentos cortos para mejorar la respuesta de elevación. • El despliegue en el agua es fácil y rápido. • Buena respuesta de elevación / flotabilidad. • Son resistentes a la luz solar e hidrocarburos. • Relativamente fáciles de limpiar.

Tabla 4.

Continuación

Tipo de barrera o mecanismo de contención	Aplicación	Características principales
Barrera de cortina con flotación de espuma externa	Aguas costeras (puertos) y aguas continentales (ríos, estanques)	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricada con materiales fuertes pero ligeros y flexibles. • Facilidad de almacenamiento. • Son fáciles de desplegar en el agua. • Buena respuesta de elevación / flotabilidad.
Barrera de cortina autoinflable	Aguas costeras (puertos y bahías) y aguas continentales	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen cámaras de flotación que se comprimen en el almacenamiento. • La barrera se infla por el aire atmosférico en el despliegue. • Se implementan rápidamente en el agua con muy poco personal. • Alta relación de flotabilidad / peso. • Buena respuesta de elevación. • Posibilidad de pérdida de flotabilidad por agentes externos. • Son compactas y se almacenan en pequeñas áreas. • Requieren altos mantenimiento.
Barrera de cortina inflable a presión	Aguas costeras (alta mar y puertos) y aguas continentales (ríos)	<ul style="list-style-type: none"> • Las cámaras se inflan mediante el uso de un compresor o soplador de aire. • Alta relación de flotabilidad / peso. • Buena respuesta de elevación. • Su flotabilidad puede afectarse en caso de que existan elementos extraños en el medio que se implemente. • Se almacenan en pequeñas áreas. • La velocidad de despliegue es más lenta que las barreras autoinflables. • Requieren mantenimiento regular (verificación de válvulas de inflado).

Tabla 4.

Continuación

Tipo de barrera o mecanismo de contención	Aplicación	Características principales
Barrera de sellado	Aguas continentales (pantanos, lagunas, playas y humedales)	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente resistentes y duraderas en sustratos de arena y barro. • Adecuadas para aguas poco profundas, con oleaje relativamente bajo.
Barrera resistente al fuego	Aguas costeras (plataformas de perforación en alta mar, puertos petroleros)	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñadas para soportar altas temperaturas. • Fabricadas en acero inoxidable y material cerámico. • El almacenamiento y despliegue es algo complejo. • Su uso es para eventos relativamente recientes. • Su implementación reduce el número de operarios y de equipos. • Este sistema es poco amigable con el medio ambiente, ya que ocasiona trastornos en las especies bajo el agua. • Son poco usadas y son bastante costosas.
Barrera sorbente	Aguas costeras (playas) y aguas continentales (lagos y ríos)	<ul style="list-style-type: none"> • Debe emplearse con moderación para evitar problemas posteriores de eliminación de residuos. • Útil en etapas finales de limpieza y para retirar pequeñas acumulaciones de hidrocarburo. • No es práctico su uso en mar abierto. • No son altamente resistentes a la luz solar por largos periodos de tiempo. • Son voluminosas por naturaleza, por tanto, requieren de grandes espacios para su almacenamiento. • Las barreras son relativamente ligeras cuando se despliegan. • Son reutilizables hasta que no presente roturas, aplastamiento o deterioro.

Tabla 4.

Continuación

Tipo de barrera o mecanismo de contención	Aplicación	Características principales
Dispersante químico	Aguas costeras	<ul style="list-style-type: none"> • Forman diminutas y numerosas gotas de hidrocarburo para que se dispersen en la columna de agua para su posterior proceso de degradación natural. • Adecuados para usar cuando hay alto oleaje en el mar. • El uso de los dispersantes tiene respuestas rápidas. • Se usan en condiciones climatológicas desfavorables. • El sistema de aplicación es mediante embarcaciones y/o aviones o helicópteros. • Provocan efectos perjudiciales en la vida marina. • Incremento de la turbidez en el agua.

7.2 Modelos Jerárquicos Para La Selección De La Mejor Alternativa

Se construyeron cuatro (4) modelos jerárquicos con sus respectivos elementos (objetivo, criterios y alternativas), dos (2) para aguas oceánicas (ver Figura 16 y Figura 17) y dos (2) para aguas continentales (ver Figura 18 y Figura 19).

En la Figura 16 se visualiza el problema de decisión planteado para seleccionar la mejor alternativa de barrera o mecanismo de contención para aguas oceánicas tipo alta mar. Se definió como objetivo principal “Seleccionar el mecanismo más idóneo para contener hidrocarburo en alta mar”. Para la selección de los criterios se tuvo en cuenta las características físicas, mecánicas, técnicas y medioambientales de las barreras y mecanismos de contención. Los criterios

seleccionados para este modelo fueron ocho (8) (ver Tabla 5). Principalmente, los criterios que predominaron están en función del fuerte oleaje y de las condiciones climatológicas drásticas que se generan en alta mar, pues los vientos allí presentes ocasionan la generación de olas, las cuales se forman por la fricción del viento en la superficie del agua. Tanto afecta el viento al mar que cualquier cambio brusco provoca una oscilación en la superficie que se propaga y da lugar a la formación del oleaje. Por otra parte, se establecieron cuatro (4) alternativas para alcanzar el objetivo principal, barrera cortina inflable a presión, barrera cortina autoinflable, barrera resistente al fuego y dispersante químico.

Tabla 5.

Criterios para el modelo jerárquico en aguas oceánicas tipo alta mar

N°	Criterio	Descripción del criterio
1	Adaptación al fuerte oleaje	El mecanismo que se seleccione debe ser capaz de adaptarse al perfil de la ola y seguir su movimiento
2	Respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables	El mecanismo que se seleccione debe ser muy efectivo ante condiciones adversas (acción turbulenta del viento y el oleaje)
3	Amigable con el medio ambiente	El mecanismo que se seleccione debe evitar ocasionar efectos negativos sobre el entorno marino
4	Capacidad de dispersar el hidrocarburo	El mecanismo que se seleccione debe facilitar la formación de diminutas y numerosas gotitas de hidrocarburo y evitar nuevamente la unión de esas gotas para formar las manchas de hidrocarburo grandes
5	Material de fabricación resistente	El mecanismo que se seleccione debe garantizar que el material que se utiliza para su fabricación debe ser altamente robusto y resistente ante condiciones climáticas anormales
6	Facilidad de mantenimiento	El mecanismo que se seleccione debe permitir procedimientos fáciles de revisión y reparación periódica a fin de prolongar su vida útil
7	Facilidad de limpieza	El mecanismo que se seleccione debe permitir eliminar fácilmente todo residuo de hidrocarburo
8	Facilidad de despliegue	El mecanismo que se seleccione debe permitir una correcta puesta en marcha de las barreras en corto tiempo

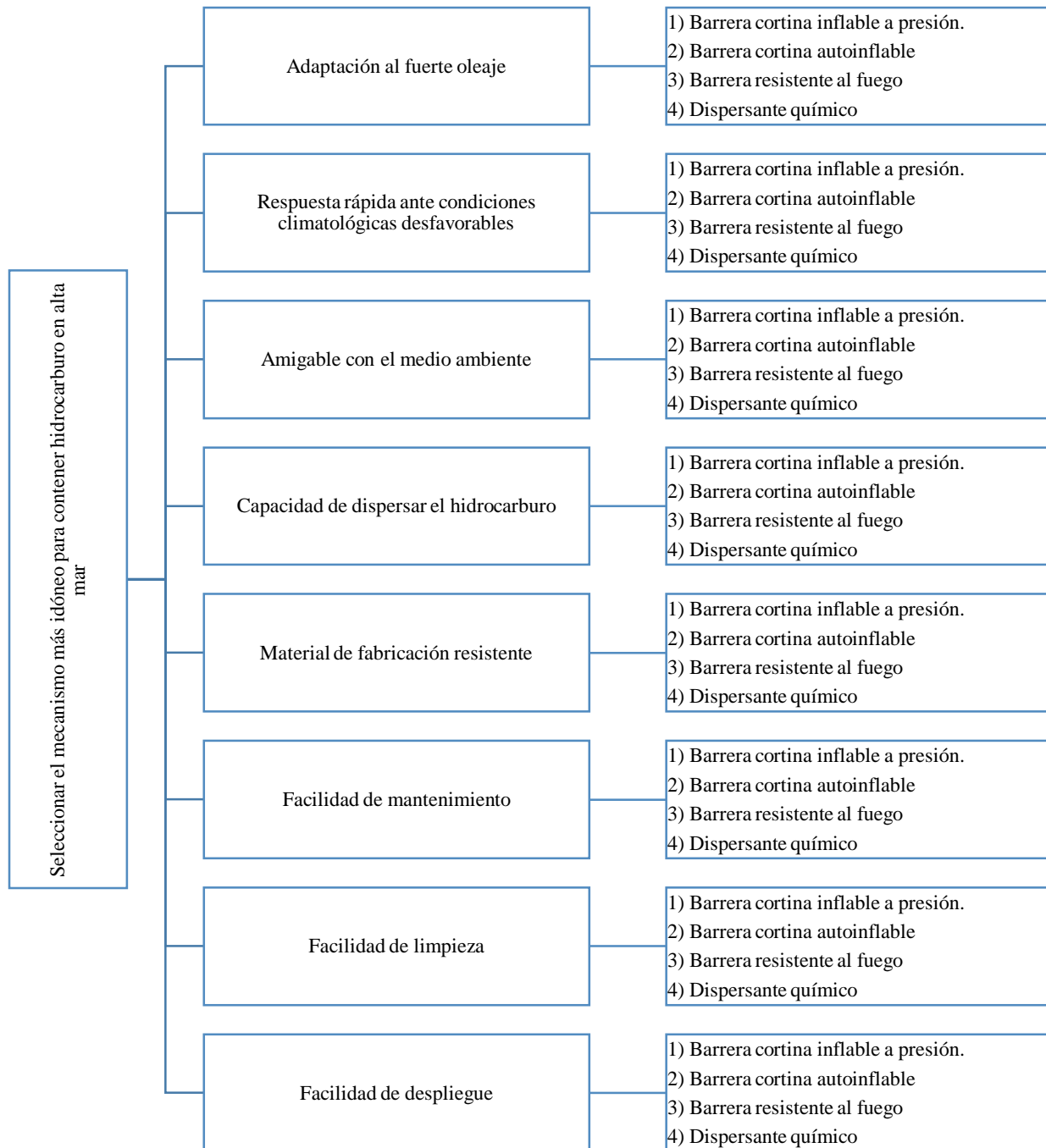


Figura 16. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en alta mar.

En la Figura 17 se visualiza el problema de decisión planteado para seleccionar la mejor alternativa de barrera o mecanismo de contención para aguas oceánicas tipo puerto marítimo. Se

definió como objetivo principal “Seleccionar el mecanismo más idóneo para contener hidrocarburo en puertos marítimos”. Los criterios seleccionados para este modelo fueron cinco (5) y se describen en la Tabla 6. En los puertos marítimos al igual que en alta mar, el oleaje es una variable característica que no se puede perder de vista. Para alcanzar el objetivo principal, se establecieron cuatro (4) alternativas, barrera de valla, barrera cortina espuma interna, barrera cortina espuma externa y barrera cortina autoinflable.

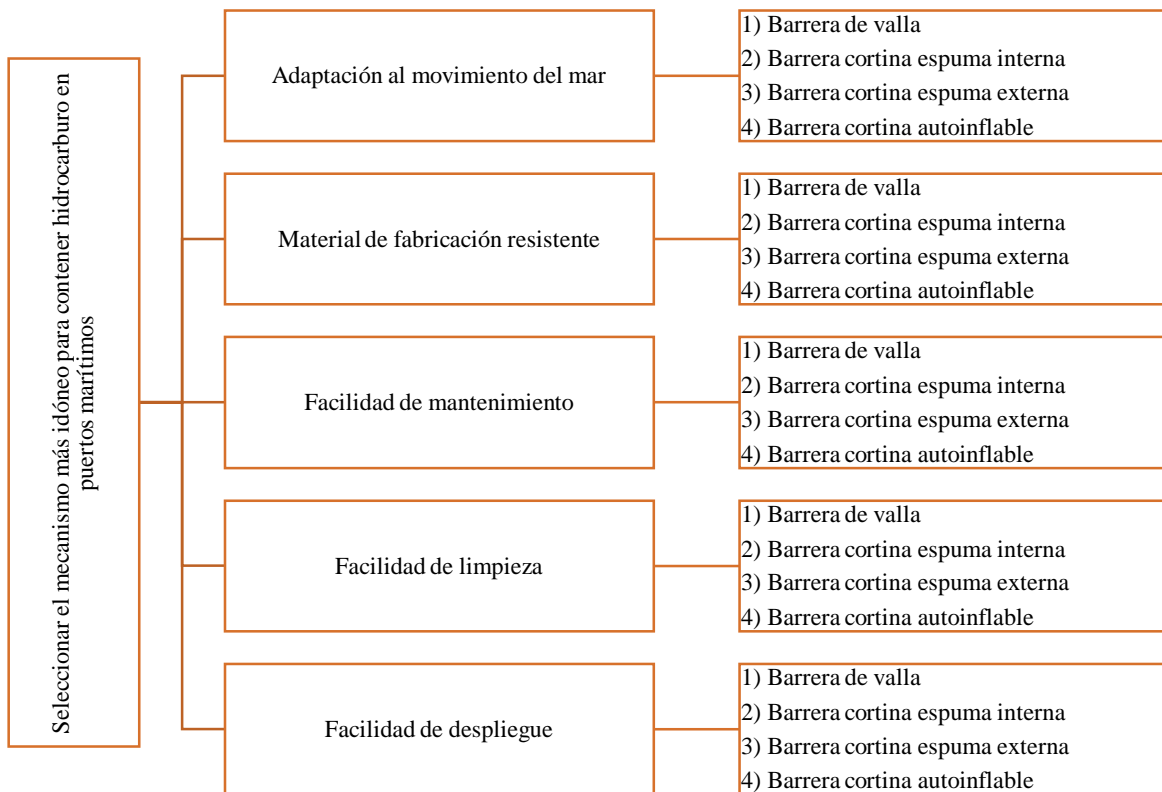


Figura 17. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en puertos marítimos.

Tabla 6.

Criterios para el modelo jerárquico en aguas oceánicas tipo puerto marítimo

N°	Criterio	Descripción del criterio
1	Adaptación al movimiento del mar	El mecanismo que se seleccione debe tener buena respuesta al movimiento del mar (oleaje)
2	Material de fabricación resistente	El mecanismo que se seleccione debe garantizar que el material que se utiliza para su fabricación debe ser altamente robusto y resistente ante condiciones climáticas anormales
3	Facilidad de mantenimiento	El mecanismo que se seleccione debe permitir procedimientos fáciles de revisión y reparación periódica a fin de prolongar su vida útil
4	Facilidad de limpieza	El mecanismo que se seleccione debe permitir eliminar fácilmente todo residuo de hidrocarburo
5	Facilidad de despliegue	El mecanismo que se seleccione debe permitir una correcta puesta en marcha de las barreras en corto tiempo

En la Figura 18 se visualiza el problema de decisión planteado para seleccionar la mejor alternativa de barrera o mecanismo de contención para aguas continentales tipo lagos y ríos viejos. Se definió como objetivo principal “Seleccionar el mecanismo más idóneo para contener hidrocarburo en lagos y ríos viejos”. En la Tabla 7 se describen los criterios que describen el modelo. Cabe resaltar que las lagunas y los ríos viejos se caracterizan por movimientos del agua calmados o de poco movimiento, de allí la definición del criterio “Adaptación de las barreras o mecanismos en aguas tranquilas”, con buena respuesta ante condiciones de corrientes bajas. En total se establecieron tres (3) alternativas, barrera de valla, barrera sorbente y barrera de sellado.

Tabla 7.

Criterios para el modelo jerárquico en aguas continentales tipo lagos y ríos viejos

N°	Criterio	Descripción del criterio
1	Adaptación en aguas tranquilas	El mecanismo que se seleccione debe tener buena respuesta ante condiciones de corrientes bajas
2	Material de fabricación resistente	El mecanismo que se seleccione debe garantizar que el material que se utiliza para su fabricación debe ser altamente robusto y resistente ante condiciones climáticas anormales
3	Facilidad de mantenimiento	El mecanismo que se seleccione debe permitir procedimientos fáciles de revisión y reparación periódica a fin de prolongar su vida útil
4	Facilidad de limpieza	El mecanismo que se seleccione debe permitir eliminar fácilmente todo residuo de hidrocarburo
5	Facilidad de despliegue	El mecanismo que se seleccione debe permitir una correcta puesta en marcha de las barreras en corto tiempo

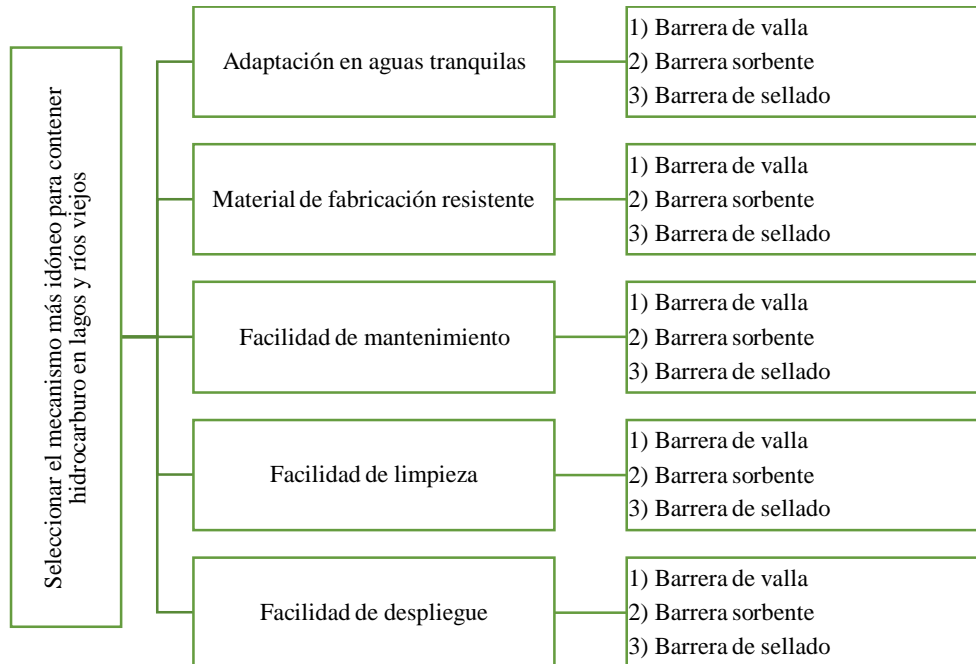


Figura 18. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en lagos y ríos viejos.

Por último, la Figura 19 visualiza el problema de decisión planteado para seleccionar la mejor alternativa de barrera o mecanismo de contención para aguas continentales tipo ríos jóvenes. Se definió como objetivo principal “Seleccionar el mecanismo más idóneo para contener hidrocarburo en ríos jóvenes”. La Tabla 8 describe los cinco (5) criterios, muy similares al modelo para puertos marítimos, lagos y ríos viejos. La diferencia radica en que los ríos jóvenes se caracterizan por movimientos bruscos del agua (corriente). En total se establecieron cuatro (4) alternativas, barrera de valla, barrera cortina espuma interna, barrera cortina espuma externa y barrera cortina autoinflable.

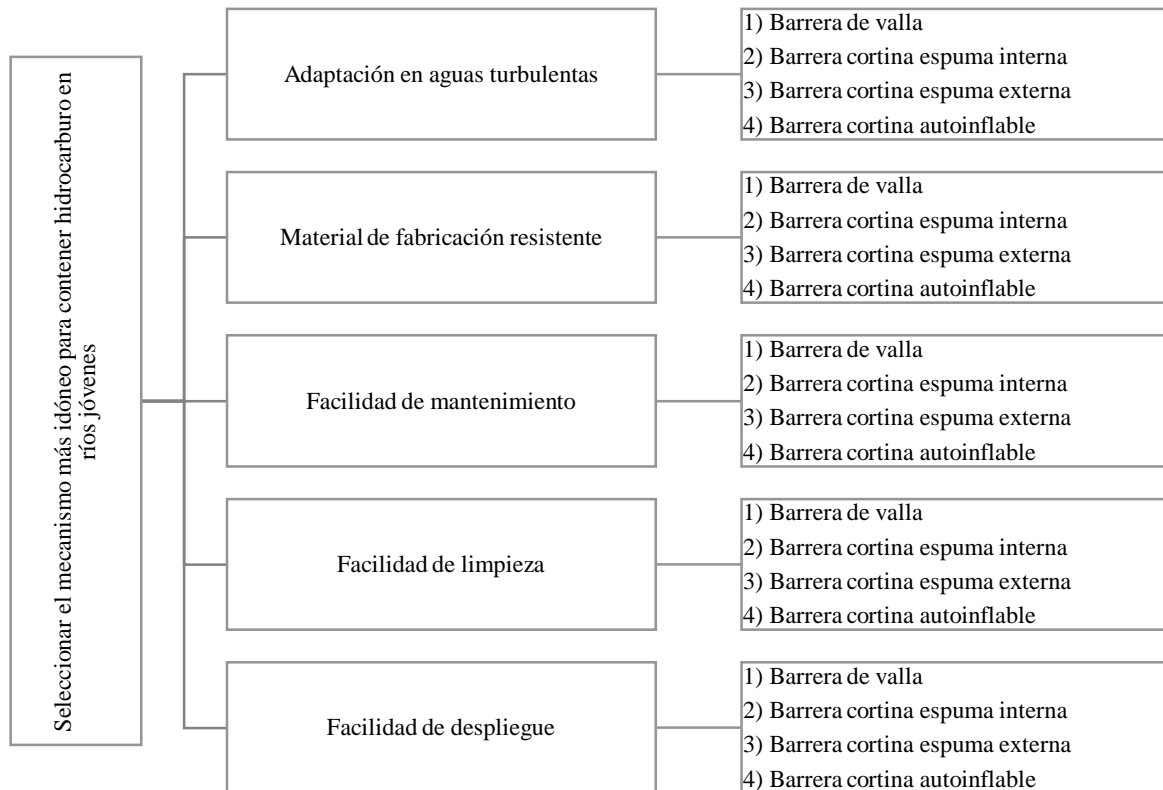


Figura 19. Modelo jerárquico para la toma de decisiones en ríos jóvenes.

Tabla 8.

Criterios para el modelo jerárquico en aguas continentales tipo ríos jóvenes

Nº	Criterio	Descripción del criterio
1	Adaptación en aguas turbulentas	El mecanismo que se seleccione debe tener buena respuesta ante condiciones de corrientes altas
2	Material de fabricación resistente	El mecanismo que se seleccione debe garantizar que el material que se utiliza para su fabricación debe ser altamente robusto y resistente ante condiciones climáticas anormales
3	Facilidad de mantenimiento	El mecanismo que se seleccione debe permitir procedimientos fáciles de revisión y reparación periódica a fin de prolongar su vida útil
4	Facilidad de limpieza	El mecanismo que se seleccione debe permitir eliminar fácilmente todo residuo de hidrocarburo
5	Facilidad de despliegue	El mecanismo que se seleccione debe permitir una correcta puesta en marcha de las barreras en corto tiempo

Cabe resaltar que los cuatro modelos comparten los criterios de material de fabricación resistente, facilidad de mantenimiento, limpieza y despliegue.

7.3 Aplicación Del Proceso De Análisis Jerárquico (AHP)

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los diferentes modelos.

7.3.1 Modelo De Selección De La Barrera O Mecanismo Más Idóneo Para La Contención De Hidrocarburos En Alta Mar. Primero se mostrarán los resultados obtenidos para la priorización de criterios y posteriormente de las alternativas.

7.3.1.1 Priorización De Los Criterios Respecto Al Objetivo Principal. Se definieron ochos (8) criterios los cuales están relacionados directamente con el objetivo principal: 1) adaptación al fuerte oleaje, 2) respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables, 3) amigable con el medio ambiente, 4) capacidad de dispersar el hidrocarburo, 5) material de fabricación resistente, 6) facilidad de mantenimiento, 7) facilidad de limpieza y 8) facilidad de despliegue (ver Tabla 5).

Una vez asignados los valores numéricos, se obtiene la matriz de comparaciones pareadas respecto al objetivo principal (ver Figura 20). Al comparar el criterio “adaptación al fuerte oleaje” con el criterio “amigable con el medio ambiente”, el valor 9 indica que es extremadamente preferible que la barrera que se seleccione debe ser capaz de adaptarse al perfil de la ola y seguir su movimiento más que evitar ocasionar efectos negativos sobre el entorno marino. Por otra parte, los valores inversos como 1/9 que comparan el criterio “capacidad de dispersar el hidrocarburo” frente al “material de fabricación resistente”, evalúan que es extremadamente preferible que la barrera o el mecanismo que se seleccione debe garantizar que el material que se utiliza para su

fabricación sea altamente robusto y resistente ante condiciones climáticas anormales más que facilitar la formación de diminutas y numerosas gotitas de hidrocarburo a fin de evitar nuevamente la unión de esas gotas para formar manchas de hidrocarburo grandes. Se denota que la comparación de un elemento consigo mismo conlleva a obtener el valor de 1.

Criterios	Adaptación al fuerte oleaje	Respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables	Amigable con el medio ambiente	Capacidad de dispersar el hidrocarburo	Material de fabricación resistente	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de limpieza	Facilidad de despliegue
Adaptación al fuerte oleaje	1	3	9	9	3	3	5	3
Respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables	1/3	1	7	9	3	3	5	3
Amigable con el medio ambiente	1/9	1/7	1	3	1/7	1/3	1/3	1/3
Capacidad de dispersar el hidrocarburo	1/9	1/9	1/3	1	1/9	1/3	1/5	1/5
Material de fabricación resistente	1/3	1/3	7	9	1	3	7	3
Facilidad de mantenimiento	1/3	1/3	3	3	1/3	1	3	1/3
Facilidad de limpieza	1/5	1/5	3	5	1/7	1/3	1	1/3
Facilidad de despliegue	1/3	1/3	3	5	1/3	3	3	1

Figura 20. Matriz de comparaciones pareadas de criterios respecto al objetivo principal.

Para obtener el vector propio de los criterios, primero se normalizó la matriz mediante la división de cada término sobre la suma total de la columna. Posteriormente, se promediaron los valores de las filas de todos los criterios (ver Figura 21).

Criterios	Matriz normalizada								Vector propio de los criterios
	Adaptación al fuerte oleaje	Respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables	Amigable con el medio ambiente	Capacidad de dispersar el hidrocarburo	Material de fabricación resistente	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de limpieza	Facilidad de despliegue	
Adaptación al fuerte oleaje	0,3629	0,5501	0,2700	0,2045	0,3720	0,2143	0,2038	0,2679	0,3057
Respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables	0,1210	0,1834	0,2100	0,2045	0,3720	0,2143	0,2038	0,2679	0,2221
Amigable con el medio ambiente	0,0403	0,0262	0,0300	0,0682	0,0177	0,0238	0,0136	0,0298	0,0312
Capacidad de dispersar el hidrocarburo	0,0403	0,0204	0,0100	0,0227	0,0138	0,0238	0,0082	0,0179	0,0196
Material de fabricación resistente	0,1210	0,0611	0,2100	0,2045	0,1240	0,2143	0,2853	0,2679	0,1860
Facilidad de mantenimiento	0,1210	0,0611	0,0900	0,0682	0,0413	0,0714	0,1223	0,0298	0,0756
Facilidad de limpieza	0,0726	0,0367	0,0900	0,1136	0,0177	0,0238	0,0408	0,0298	0,0531
Facilidad de despliegue	0,1210	0,0611	0,0900	0,1136	0,0413	0,2143	0,1223	0,0893	0,1066

Figura 21. Matriz normalizada y vector propio de los criterios.

De la Figura 21 se evidencia que la barrera o mecanismo que se seleccione debe adaptarse muy bien ante oleajes fuertes, seguidamente se espera que tengan una respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables, que los materiales con los que se fabrican estos mecanismos deben ser hechos con materiales resistentes ante el contacto con hidrocarburos, a la exposición a la radiación solar, frente a la presencia de agentes externos, etc. Lo menos importante es que el mecanismo que se seleccione tenga la capacidad de dispersar el hidrocarburo ante el uso de agentes surfactantes.

7.3.1.2 Priorización De Las Alternativas Respecto A Los Criterios. Para este caso se definieron cuatro (4) alternativas: 1) barrera cortina inflable a presión, 2) barrera cortina autoinflable, 3) barrera resistente al fuego y 4) dispersante químico.

Al realizar el análisis de comparación de las alternativas según cada uno de los criterios se obtuvo ocho (8) matrices (ver Apéndice A), las cuales fueron normalizadas para obtener los vectores propios de cada uno de los criterios, representados en la Figura 22.

Vector propio adaptación al fuerte oleaje	Vector propio respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables	Vector propio amigable con el medio ambiente	Vector propio capacidad de dispersar el hidrocarburo	Vector propio material de fabricación resistente	Vector propio facilidad de mantenimiento	Vector propio facilidad de limpieza	Vector propio facilidad de despliegue
0,5475	0,5475	0,5739	0,1193	0,1367	0,5162	0,5016	0,3060
0,3060	0,3060	0,2913	0,0879	0,0990	0,3681	0,3571	0,5475
0,1015	0,1015	0,0445	0,0601	0,7008	0,0713	0,0989	0,1015
0,0450	0,0450	0,0903	0,7328	0,0635	0,0443	0,0424	0,0450

Figura 22. Vector propio de cada uno de los criterios.

7.3.1.3 Vector Prioridad De Las Alternativas. Luego de realizar las operaciones de matrices entre los vectores obtenidos en el numeral 7.3.1 y 7.3.2 se obtiene que la barrera de cortina inflable a presión es la barrera más indicada para emplearse en aguas oceánicas tipo alta mar, con una prioridad respecto al objetivo principal de 43,29% (ver Figura 23). Como segunda alternativa de uso se encuentra la barrera de cortina autoinflable con un porcentaje de prioridad del 29,59%.

Cabe resaltar que el grado de consistencia tanto para la matriz de comparación de criterios como la matriz de comparación de alternativas es inferior al 10%, de manera que es coherente la valoración de juicios realizados.

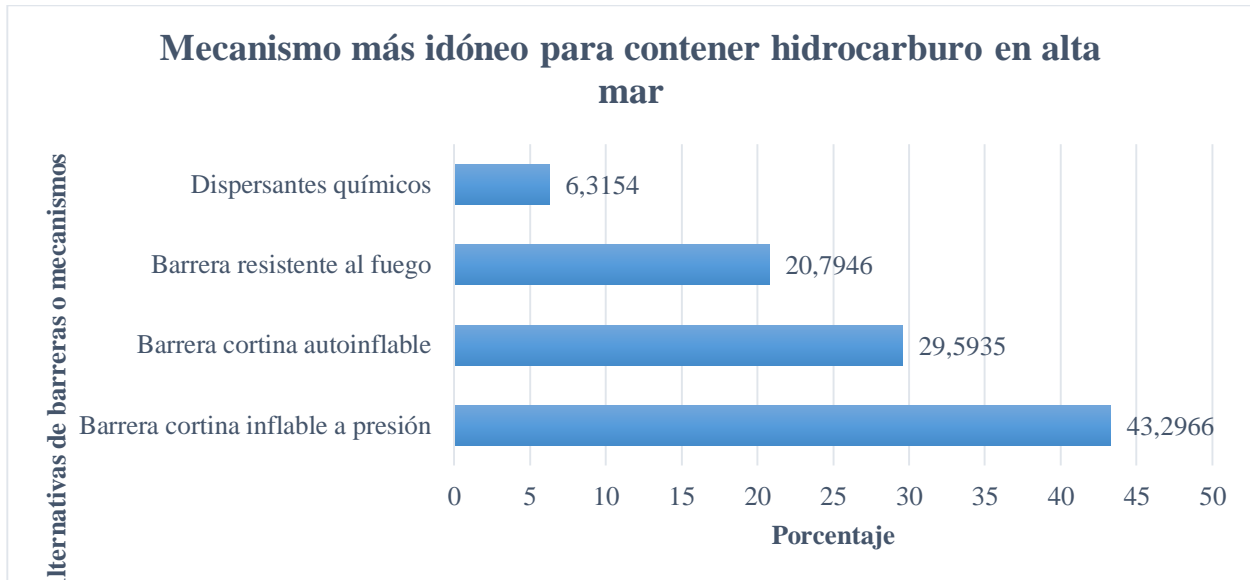


Figura 23. Vector de prioridades de alternativas – mejor alternativa de barrera para uso en alta mar.

7.3.2 Modelo De Selección De La Barrera O Mecanismo Más Idóneo Para La Contención De Hidrocarburos En Puertos Marítimos Y Ríos Jóvenes. Una vez aplicado el modelo se obtiene que la barrera de cortina autoinflable es la barrera más idónea para emplearse en aguas oceánicas tipo puertos marítimos y aguas continentales tipo ríos jóvenes, con una prioridad respecto al objetivo principal del 38,92% (ver Figura 24). Seguidamente sobresale la barrera de cortina con espuma externa con un porcentaje del 32,15%.

Cabe resaltar que los dos modelos son prácticamente iguales debido a que cuando se realizó el análisis de determinación de los criterios no se encontró ningún elemento diferenciador entre las características propias del tipo de fuente hídrica; criterio definido para puertos marítimos “adaptación al movimiento del mar” y criterio definido para aguas intranquilas “adaptación en aguas turbulentas”. De igual forma, las alternativas de uso de barreras o mecanismos son compartidas en los dos modelos.

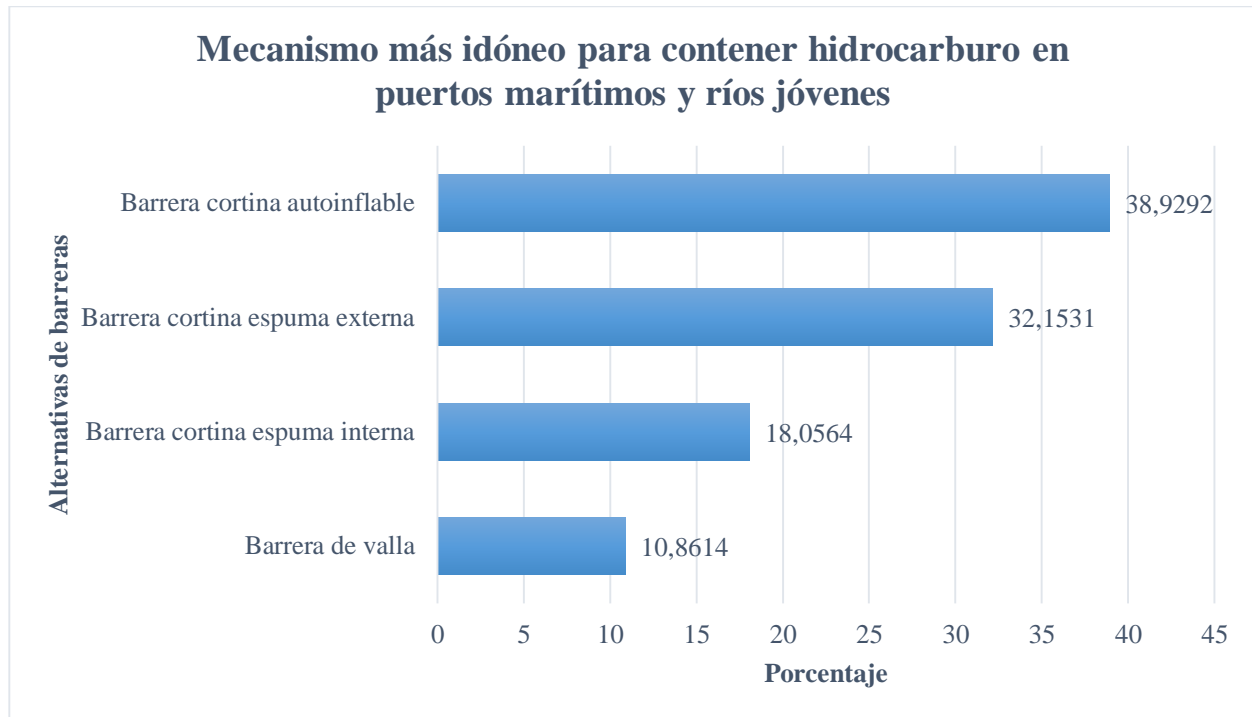


Figura 24. Vector de prioridades de alternativas – mejor alternativa de barrera para uso en puertos marítimos y ríos jóvenes.

El detalle de la valoración de los juicios así como de las alternativas se presenta a profundidad en el Apéndice B.

7.3.3 Modelo De Selección De La Barrera O Mecanismo Más Idóneo Para La Contención De Hidrocarburos En Lagos Y Ríos Viejos. Finalmente se obtiene que la barrera de valla es la barrera más indicada para emplearse en aguas oceánicas tipo lagos y ríos viejos, con una prioridad de 59,29% (ver Figura 25). Como segunda alternativa de uso sobresale la barrera de sellado con 24,77%.

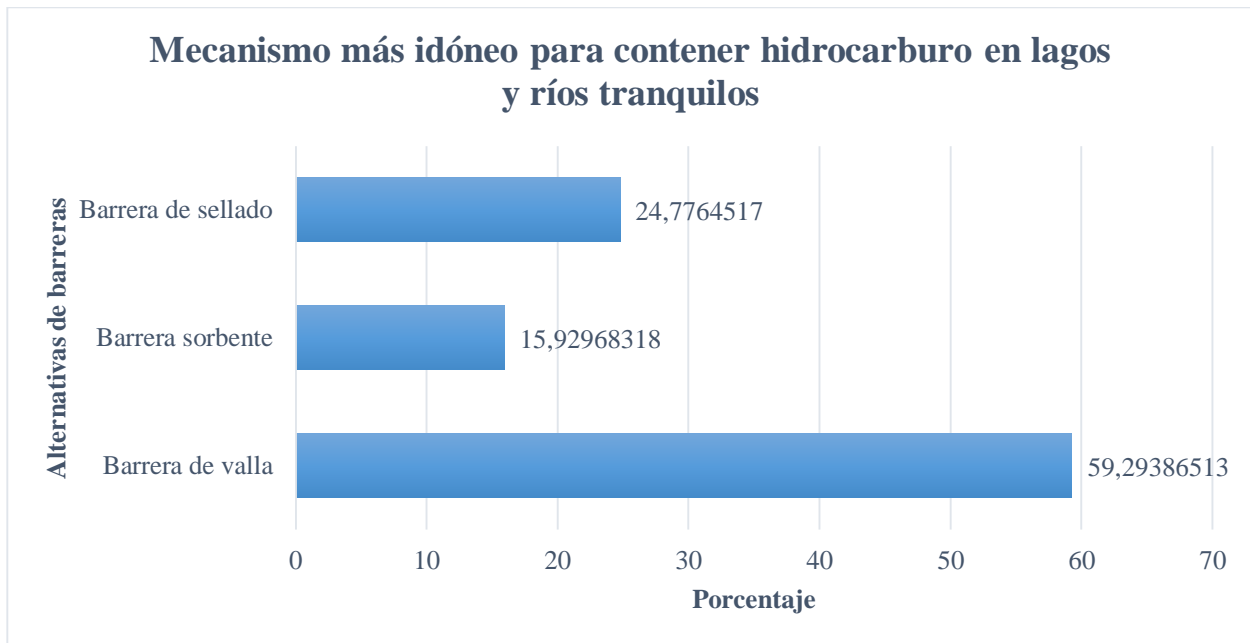


Figura 25. Vector de prioridades de alternativas – mejor alternativa de barrera para uso en lagos y ríos viejos.

De igual manera, en el Apéndice C se encuentra en detalle la valoración de los juicios y de las alternativas para este modelo.

7.4 Desarrollo De La Herramienta Para La Selección Del Mecanismo De Contención

BOOM SOLUTIONS es una herramienta que permite seleccionar entre un conjunto de alternativas, cuál de ellas es la más interesante. En otras palabras, selecciona la barrera o el mecanismo de contención más apropiado para emplearse ante un derrame de hidrocarburo en un cuerpo de agua en específico (alta mar, puertos marítimos, lagos, ríos jóvenes y ríos viejos).

La herramienta de toma de decisiones utiliza la metodología de Análisis Jerárquico, la cual fue desarrollada en Python con el propósito de facilitar la aplicación de la metodología.

Python utiliza un lenguaje de programación simple, versátil, rápido de desarrollar y gratuito (no requiere de una licencia para programar). Contiene una gran cantidad de librerías, tipos de datos y funciones incorporadas en el propio lenguaje, que ayudan a realizar muchas tareas comunes sin necesidad de tener que programarlas desde cero. Además, permite la implementación de algoritmos para el tratamiento de matrices al igual que genera gráficas estadísticas.

Python ofrece una gran variedad de opciones para el manejo de la interfaz gráfica. Para el diseño de esta herramienta se seleccionó la librería *Tkinter*; esta librería permitió la manipulación de todo lo relacionado a colores, formas, fuentes, botones, casillas de texto y demás elementos gráficos que conforman la interfaz de la aplicación. También se empleó la librería *Numpy* para el tratamiento de cálculo de matrices; por defecto, esta librería ya tiene establecido un gran número de funciones. Para la representación gráfica de los resultados finales se utilizó la librería *Matplotlib*. Así mismo, se generó un ejecutable a fin de que la herramienta se pueda ejecutar en cualquier equipo de escritorio, aun si éste no tiene instalado en su sistema el intérprete de lenguaje Python.

La herramienta se diseñó teniendo en cuenta la automatización de todos los cálculos de matrices, inclusión de los módulos glosario, manual, escala del juicio y criterios, análisis independiente de la comparación por pares de los criterios (primera fase) y alternativas (segunda fase), cálculo del grado de consistencia de las decisiones, interfaz gráfica para la presentación de los resultados y posibilidad de incluir en el esquema más criterios con el propósito de hacer más robusto la toma de decisiones.

BOOM SOLUTIONS no presenta el grado de inconsistencia mientras se llevan a cabo las comparaciones por pares; éste se presenta como resultado final en cada una de las fases (análisis de criterios y análisis de alternativas). Lo anterior se realizó para evitar la manipulación de quien toma las decisiones, lo que haría el método poco eficiente. La herramienta se diseñó para que aparezca un mensaje en el que se manifieste el grado de inconsistencia de los juicios.

En el Apéndice D se presenta la guía de usuario en el que se indican las instrucciones que se deben seguir paso a paso para el manejo adecuado de la herramienta BOOM SOLUTIONS.

8 Conclusiones

Las barreras seleccionadas para este estudio fueron las barreras: de valla, de cortina con flotación de espuma interna, de cortina con flotación de espuma externa, de cortina autoinflable, de cortina inflable a presión, de sellado, resistente al fuego y sorbente, siendo estas las más empleadas para la contención de derrames de hidrocarburos, para uso exclusivo en fuentes hídricas.

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) permitió seleccionar la barrera más idónea para su implementación en los diferentes tipos de aguas, oceánicas y continentales. Es un método muy eficaz para la toma de decisiones, que involucra la evaluación de un conjunto de alternativas en términos de un conjunto de criterios, que se definen para evaluar un propósito. El modelo está estructurado por la definición de un objetivo principal o meta, criterios y alternativas. El AHP se

basa en la comparación de elementos pares, mediante el uso de una escala definida con valores que oscilan entre 1 y 9, a fin de emitir un juicio sobre la importancia relativa de los criterios y las alternativas. Es un método que tiene un grado de confiabilidad del 90%.

El proceso analítico jerárquico (AHP) permitió definir como criterios, aspectos cualitativos propios de las barreras, más específicamente características físicas, mecánicas, técnicas y medioambientales. Los criterios que se seleccionaron para la aplicación de este método fueron: adaptación al fuerte oleaje, adaptación al movimiento del mar, adaptación en aguas tranquilas, adaptación en aguas turbulentas, respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables, amigable con el medio ambiente, capacidad de dispersar el hidrocarburo, material de fabricación resistente, facilidad de mantenimiento, facilidad de limpieza y facilidad de despliegue. Por tanto, la definición de los criterios previamente mencionados garantizará que la barrera de contención a utilizar para un tipo de agua específica, cumpla con las características necesarias para aplicarse efectivamente ante un derrame en un cuerpo de agua (alta mar, puertos marítimos, lagos y ríos viejos y ríos jóvenes).

Los criterios que predominaron para cada uno de los cuatro (4) modelos definidos (alta mar, puertos marítimos, lagos y ríos viejos y ríos jóvenes), una vez aplicado el método AHP, fueron la adaptación al fuerte oleaje o movimiento del mar, para aguas oceánicas y la adaptación en aguas tranquilas y aguas turbulentas, para aguas continentales. Seguidamente predominaron el material de fabricación, la facilidad de despliegue en el agua, el área de almacenamiento, la facilidad de mantenimiento y de limpieza, entre otras.

La mejor opción de barrera para emplearse en aguas oceánicas tipo alta mar fue la barrera de cortina inflable a presión, con una prioridad respecto al objetivo principal del 43,29%. Así mismo, la barrera de cortina autoinflable es la barrera que mejor posibilidad brinda ante un derrame de hidrocarburo en aguas oceánicas tipo puertos marítimos y aguas continentales tipo ríos jóvenes (prioridad del 38,92%). Por último, la barrera de valla es la mejor barrera para emplearse en aguas oceánicas tipo lagos y ríos viejos (prioridad del 59,429).

La aplicación del método, mediante el uso de la herramienta BOOM SOLUTIONS, facilita la implementación del Proceso de Análisis Jerárquico para la toma de decisiones multicriterio, a fin de seleccionar la barrera más idóneo para la contención de petróleo.

9 Recomendaciones

Con el propósito de hacer más robusto el Proceso de Análisis Jerárquico, método matemático empleado para seleccionar la mejor barrera de contención de hidrocarburos en diferentes cuerpos de agua, se recomienda para futuros trabajos:

- Definir criterios cuantitativos que permitan evaluar las barreras de contención, tales como costos de las barreras y cantidad de petróleo derramado, a fin de tener una mirada más crítica frente a la toma de decisiones ante un derrame de hidrocarburo.

- Incluir mecanismos de recolección de petróleo dentro de la herramienta, a fin de evaluar no sólo la contención del hidrocarburo sino también la recolección de éste en la superficie del agua para su posterior almacenamiento y tratamiento.
- Incluir en la herramienta las características principales de los mecanismos de contención, con miras a incluir también los mecanismos de recolección, para que el usuario adquiriera un mejor conocimiento de los conceptos.

Referencias Bibliográficas

Anish (2019). *Different Types of Dispersants Used in an Oil Spill*. Recuperado de <https://www.marineinsight.com/environment/different-types-of-dispersants-used-in-an-oil-spill/>.

Aguilar Llamas, R. (2016). *Derrames de petróleo en el océano. Aplicación preliminar al estuario del Guadalquivir* (Trabajo de pregrado). Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Bowden, M. (2017). *Aguas continentales, características y tipos*. Recuperado de <https://naturaleza.paradais-sphynx.com/hidrosfera/aguas-continentales.htm>.

Casado Ferreiro, P. (2013). *Las barreras anticontaminación contra los vertidos hidrocarburos* (Trabajo de pregrado). Universidad de Cantabria, Cantabria, España.

Dagorn, L., Dumont, A. (2012). *Manufactured spill response booms. Operational guide*. Cedre: Francia.

Equipo Editorial Naturaleza (2017). *Agua de los océanos, características y tipos de movimientos*. Recuperado de <https://naturaleza.paradais-sphynx.com/hidrosfera/agua-de-los-oceanos.htm>.

Escrivá, L. J. (2015). *Aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP) al dimensionamiento de sistemas renovables* (Trabajo de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Fernández Roldán, L. (2019). *Aguas continentales: qué son, características e importancia*.

Recuperado de <https://www.ecologiaverde.com/aguas-continentales-que-son-caracteristicas-e-importancia-2363.html>. España.

Fingas, M. (2011). *Oil spill science and technology. Prevention, response, and cleanup*. Estados Unidos: Elsevier.

JXY (2011). *Oil Spill Fire Resistant Boom*. Recuperado de <https://www.oilabsorbspill.com/productshow/Oil-Containment-Boom/Oil-Spill-Fire-Resistant-Boom/81.htm>. China.

Global Spill & Safety (2020). *Troilboom beach shore sealing boom*. Recuperado de <https://www.globalspill.com.au/product/troilboom-beach-shore-sealing-boom/>. Australia.

ITOPF (2011). *Destino de los derrames de hidrocarburos en el medio marino*. Recuperado de https://www.itopf.org/uploads/translated/TIP2_SPFateofMarineOilSpills.pdf. Canterbury, Inglaterra.

ITOPF (2012). *Uso de materiales adsorbentes en la respuesta a derrames a hidrocarburos*. Recuperado de https://www.itopf.org/uploads/translated/Final_TIP_8_2012_SP.pdf. Canterbury, Inglaterra.

Marine Spill Response Corporation (2020). *Boom*. Recuperado de <https://www.msrmc.org/services/oil-spill-response/equipment/type/5>. Estados Unidos.

Marine Spill Response Corporation (2020). *Boom*. Recuperado de <https://www.msrmc.org/services/oil-spill-response/equipment/type/141>. Estados Unidos.

Mavi Deniz (2018). *Self-Inflatable Boom*. Recuperado de <https://mavideniz.com.tr/our-production/oil-boom/oil-containment-booms/self-inflatable-boom/>. Turquía.

Mavi Deniz (2018). *Beach Sealing Boom + Shore Boom*. Recuperado de <https://mavideniz.com.tr/our-production/oil-boom/oil-containment-booms/beach-sealing-boom/>.

Turquía.

Osorio Gómez, J. C., Orejuela Cabrera, J. P. (2008). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, XIV (39), 247-252.

Pardal Lareo, A. (2015). *Estudio del sistema de respuesta por derrame de hidrocarburos* (Trabajo de pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Quispe Loyola, C. R. (2017). *Aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP) en la selección de un marco de referencia para gestionar los proyectos de una empresa consultora* (Trabajo de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Schulze, R. (2000). *Oil spill response performance review of booms*. Estados Unidos: Minerals Management Service.

SpillPro (2019). *Fire Booms – How do they work?* Recuperado de <https://spillpro.com.au/information-and-news/fire-booms-how-do-they-work>. Australia.

University of Miami (2018). *A review of different methods for responding to an oil spill*. Recuperado de <https://sharkresearch.rsmas.miami.edu/a-review-of-different-methods-for-responding-to-an-oil-spill/>. Estados Unidos.

Vergara, I., Pizarro, F. (1981). *Manual control de derrames de petróleo*. Chile: IMCO – CPPS – PNUMA.

Vikoma International (2020). *Containment Booms*. Recuperado de https://www.vikoma.com/Oil_Spill_Solutions/Booms/Vikoflex.html.

Wikipedia (2020). *Aguas continentales*. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Aguas_continentales.

Apéndice A. Matriz de comparaciones pareadas de alternativas, matriz normalizada y vector propio de cada uno de los criterios para el modelo en alta mar

Criterio: Adaptación al fuerte oleaje									
Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio adaptación al fuerte oleaje
Barrera cortina inflable a presión	1	3	5	9	0,6081	0,6908	0,4412	0,4500	0,5475
Barrera cortina autoinflable	1/3	1	5	7	0,2027	0,2303	0,4412	0,3500	0,3060
Barrera resistente al fuego	1/5	1/5	1	3	0,1216	0,0461	0,0882	0,1500	0,1015
Dispersantes químicos	1/9	1/7	1/3	1	0,0676	0,0329	0,0294	0,0500	0,0450
Total	1,6444	4,3429	11,3333	20,0000					

Criterio: Respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables									
Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio respuesta rápida ante condiciones climatológicas desfavorables
Barrera cortina inflable a presión	1	3	5	9	0,6081	0,6908	0,4412	0,4500	0,5475
Barrera cortina autoinflable	1/3	1	5	7	0,2027	0,2303	0,4412	0,3500	0,3060
Barrera resistente al fuego	1/5	1/5	1	3	0,1216	0,0461	0,0882	0,1500	0,1015
Dispersantes químicos	1/9	1/7	1/3	1	0,0676	0,0329	0,0294	0,0500	0,0450
Total	1,6444	4,3429	11,3333	20,0000					

Criterio: Amigable con el medio ambiente

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio amigable con el medio ambiente
Barrera cortina inflable a presión	1	3	9	7	0,6300	0,6908	0,4500	0,5250	0,5739
Barrera cortina autoinflable	1/3	1	7	5	0,2100	0,2303	0,3500	0,3750	0,2913
Barrera resistente al fuego	1/9	1/7	1	1/3	0,0700	0,0329	0,0500	0,0250	0,0445
Dispersantes químicos	1/7	1/5	3	1	0,0900	0,0461	0,1500	0,0750	0,0903
Total	1,5873	4,3429	20,0000	13,3333					

Criterio: Capacidad de dispersar el hidrocarburo

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio capacidad de dispersar el hidrocarburo
Barrera cortina inflable a presión	1	2	2	1/9	0,0909	0,1600	0,1429	0,0833	0,1193
Barrera cortina autoinflable	1/2	1	2	1/9	0,0455	0,0800	0,1429	0,0833	0,0879
Barrera resistente al fuego	1/2	½	1	1/9	0,0455	0,0400	0,0714	0,0833	0,0601
Dispersantes químicos	9	9	9	1	0,8182	0,7200	0,6429	0,7500	0,7328
Total	11,0000	12,5000	14,0000	1,3333					

Criterio: Material de fabricación resistente

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio material de fabricación resistente
Barrera cortina inflable a presión	1	2	1/7	2	0,1111	0,1905	0,1023	0,1429	0,1367
Barrera cortina autoinflable	1/2	1	1/7	2	0,0556	0,0952	0,1023	0,1429	0,0990
Barrera resistente al fuego	7	7	1	9	0,7778	0,6667	0,7159	0,6429	0,7008
Dispersantes químicos	1/2	½	1/9	1	0,0556	0,0476	0,0795	0,0714	0,0635
Total	9,0000	10,5000	1,3968	14,0000					

Criterio: Facilidad de mantenimiento

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio facilidad de mantenimiento
Barrera cortina inflable a presión	1	2	7	9	0,5701	0,6146	0,4516	0,4286	0,5162
Barrera cortina autoinflable	1/2	1	7	9	0,2851	0,3073	0,4516	0,4286	0,3681
Barrera resistente al fuego	1/7	1/7	1	2	0,0814	0,0439	0,0645	0,0952	0,0713
Dispersantes químicos	1/9	1/9	1/2	1	0,0633	0,0341	0,0323	0,0476	0,0443
Total	1,7540	3,2540	15,5000	21,0000					

Criterio: Facilidad de limpieza

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio facilidad de limpieza
Barrera cortina inflable a presión	1	2	5	9	0,5521	0,6040	0,4412	0,4091	0,5016
Barrera cortina autoinflable	1/2	1	5	9	0,2761	0,3020	0,4412	0,4091	0,3571
Barrera resistente al fuego	1/5	1/5	1	3	0,1104	0,0604	0,0882	0,1364	0,0989
Dispersantes químicos	1/9	1/9	1/3	1	0,0613	0,0336	0,0294	0,0455	0,0424
Total	1,8111	3,3111	11,3333	22,0000					

Criterio: Facilidad de despliegue

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera cortina inflable a presión	Barrera cortina autoinflable	Barrera resistente al fuego	Dispersantes químicos	Matriz normalizada				Vector propio facilidad de despliegue
Barrera cortina inflable a presión	1	1/3	5	7	0,2303	0,2027	0,4412	0,3500	0,3060
Barrera cortina autoinflable	3	1	5	9	0,6908	0,6081	0,4412	0,4500	0,5475
Barrera resistente al fuego	1/5	1/5	1	3	0,0461	0,1216	0,0882	0,1500	0,1015
Dispersantes químicos	1/7	1/9	1/3	1	0,0329	0,0676	0,0294	0,0500	0,0450
Total	4,3429	1,6444	11,3333	20,0000					

Apéndice B. Matriz de comparaciones pareadas de criterios y alternativas, matriz normalizada y vector propio de cada uno de los criterios para el modelo de puertos marítimos y ríos jóvenes

- Matriz de comparación, matriz normalizada y vector propio de los criterios

Matriz de comparación de criterios											Vector propio de los criterios
Criterios	Adaptación en aguas turbulentas	Material de fabricación resistente	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de limpieza	Facilidad de despliegue	Matriz normalizada					
Adaptación en aguas turbulentas	1	3	5	9	5	0,5422	0,6238	0,4098	0,3333	0,5245	0,4867
Material de fabricación resistente	1/3	1	3	7	3	0,1807	0,2079	0,2459	0,2593	0,3147	0,2417
Facilidad de mantenimiento	1/5	1/3	1	5	1/3	0,1084	0,0693	0,0820	0,1852	0,0350	0,0960
Facilidad de limpieza	1/9	1/7	1/5	1	1/5	0,0602	0,0297	0,0164	0,0370	0,0210	0,0329
Facilidad de despliegue	1/5	1/3	3	5	1	0,1084	0,0693	0,2459	0,1852	0,1049	0,1427
Total	1,8444	4,8095	12,2000	27,0000	9,5333						

- Matriz de comparación y matriz normalizada de las alternativas y vector propio de cada uno de los criterios

Criterio: Adaptación en aguas turbulentas										
Matriz de comparación de alternativas										
Criterios	Barrera de valla	Barrera cortina espuma interna	Barrera cortina espuma externa	Barrera cortina autoinflable	Matriz normalizada				Vector propio adaptación en aguas turbulentas	
Barrera de valla	1	1/5	1/5	1/9	0,0500	0,0217	0,0441	0,0676	0,0459	
Barrera cortina espuma interna	5	1	1/3	1/5	0,2500	0,1087	0,0735	0,1216	0,1385	
Barrera cortina espuma externa	5	3	1	1/3	0,2500	0,3261	0,2206	0,2027	0,2498	
Barrera cortina autoinflable	9	5	3	1	0,4500	0,5435	0,6618	0,6081	0,5658	
Total	20,0000	9,2000	4,5333	1,6444						

Criterio: Material de fabricación resistente

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera de valla	Barrera cortina espuma interna	Barrera cortina espuma externa	Barrera cortina autoinflable	Matriz normalizada				Vector propio material de fabricación resistente
Barrera de valla	1	1/3	1/7	3	0,0882	0,0500	0,0983	0,1875	0,1060
Barrera cortina espuma interna	3	1	1/5	3	0,2647	0,1500	0,1376	0,1875	0,1849
Barrera cortina espuma externa	7	5	1	9	0,6176	0,7500	0,6878	0,5625	0,6545
Barrera cortina autoinflable	1/3	1/3	1/9	1	0,0294	0,0500	0,0764	0,0625	0,0546
Total	11,3333	6,6667	1,4540	16,0000					

Criterio: Facilidad de mantenimiento

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera de valla	Barrera cortina espuma interna	Barrera cortina espuma externa	Barrera cortina autoinflable	Matriz normalizada				Vector propio facilidad de mantenimiento
Barrera de valla	1	3	3	9	0,5625	0,4091	0,6429	0,5625	0,5442
Barrera cortina espuma interna	1/3	1	1/3	3	0,1875	0,1364	0,0714	0,1875	0,1457
Barrera cortina espuma externa	1/3	3	1	3	0,1875	0,4091	0,2143	0,1875	0,2496
Barrera cortina autoinflable	1/9	1/3	1/3	1	0,0625	0,0455	0,0714	0,0625	0,0605
Total	1,7778	7,3333	4,6667	16,0000					

Criterio: Facilidad de limpieza

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera de valla	Barrera cortina espuma interna	Barrera cortina espuma externa	Barrera cortina autoinflable	Matriz normalizada				Vector propio facilidad de limpieza
Barrera de valla	1	1/9	1/5	1/5	0,0500	0,0625	0,0278	0,0441	0,0461
Barrera cortina espuma interna	9	1	3	3	0,4500	0,5625	0,4167	0,6618	0,5227
Barrera cortina espuma externa	5	1/3	1	1/3	0,2500	0,1875	0,1389	0,0735	0,1625
Barrera cortina autoinflable	5	1/3	3	1	0,2500	0,1875	0,4167	0,2206	0,2687
Total	20,0000	1,7778	7,2000	4,5333					

Criterio: Facilidad de despliegue

Matriz de comparación de alternativas									
Criterios	Barrera de valla	Barrera cortina espuma interna	Barrera cortina espuma externa	Barrera cortina autoinflable	Matriz normalizada				Vector propio facilidad de despliegue
Barrera de valla	1	1/5	1/3	1/9	0,0556	0,0455	0,0217	0,0714	0,0485
Barrera cortina espuma interna	5	1	5	1/3	0,2778	0,2273	0,3261	0,2143	0,2614
Barrera cortina espuma externa	3	1/5	1	1/9	0,1667	0,0455	0,0652	0,0714	0,0872
Barrera cortina autoinflable	9	3	9	1	0,5000	0,6818	0,5870	0,6429	0,6029
Total	18,0000	4,4000	15,3333	1,5556					

Apéndice C. Matriz de comparaciones pareadas de criterios y alternativas, matriz normalizada y vector propio de cada uno de los criterios para el modelo de lagos y ríos viejos

- Matriz de comparación, matriz normalizada y vector propio de los criterios

Matriz de comparación de criterios											Vector propio de los criterios
Criterios	Adaptación en aguas tranquilas	Material de fabricación resistente	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de limpieza	Facilidad de despliegue	Matriz normalizada					
Adaptación en aguas tranquilas	1	3	5	9	5	0,5422	0,6238	0,4098	0,3333	0,5245	0,4867
Material de fabricación resistente	1/3	1	3	7	3	0,1807	0,2079	0,2459	0,2593	0,3147	0,2417
Facilidad de mantenimiento	1/5	1/3	1	5	1/3	0,1084	0,0693	0,0820	0,1852	0,0350	0,0960
Facilidad de limpieza	1/9	1/7	1/5	1	1/5	0,0602	0,0297	0,0164	0,0370	0,0210	0,0329
Facilidad de despliegue	1/5	1/3	3	5	1	0,1084	0,0693	0,2459	0,1852	0,1049	0,1427
Total	1,8444	4,8095	12,2000	27,0000	9,5333						

- Matriz de comparación y matriz normalizada de las alternativas y vector propio de cada uno de los criterios

Criterio: Adaptación en aguas tranquilas							
Matriz de comparación de alternativas							
Criterios	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado	Matriz normalizada			Vector propio adaptación en aguas tranquilas
Barrera de valla	1	9	3	0,6923	0,6000	0,7143	0,6689
Barrera sorbente	1/9	1	1/5	0,0769	0,0667	0,0476	0,0637
Barrera de sellado	1/3	5	1	0,2308	0,3333	0,2381	0,2674
Total	1,4444	15,0000	4,2000				

Criterio: Material de fabricación resistente							
Matriz de comparación de alternativas							
Criterios	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado	Matriz normalizada			Vector propio material de fabricación resistente
Barrera de valla	1	9	3	0,6923	0,6000	0,7143	0,6689
Barrera sorbente	1/9	1	1/5	0,0769	0,0667	0,0476	0,0637
Barrera de sellado	1/3	5	1	0,2308	0,3333	0,2381	0,2674
Total	1,4444	15,0000	4,2000				

Criterio: Facilidad de mantenimiento

Matriz de comparación de alternativas

Criterios	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado	Matriz normalizada			Vector propio facilidad de mantenimiento
Barrera de valla	1	9	5	0,7627	0,6923	0,7895	0,7482
Barrera sorbente	1/9	1	1/3	0,0847	0,0769	0,0526	0,0714
Barrera de sellado	1/5	3	1	0,1525	0,2308	0,1579	0,1804
Total	1,3111	13,0000	6,3333				

Criterio: Facilidad de limpieza

Matriz de comparación de alternativas

Criterios	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado	Matriz normalizada			Vector propio facilidad de limpieza
Barrera de valla	1	3	1/5	0,1579	0,2727	0,1489	0,1932
Barrera sorbente	1/3	1	1/7	0,0526	0,0909	0,1064	0,0833
Barrera de sellado	5	7	1	0,7895	0,6364	0,7447	0,7235
Total	6,3333	11,0000	1,3429				

Criterio: Facilidad de despliegue

Matriz de comparación de alternativas

Criterios	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado	Matriz normalizada			Vector propio facilidad de despliegue
Barrera de valla	1	1/5	3	0,1579	0,1489	0,2727	0,1932
Barrera sorbente	5	1	7	0,7895	0,7447	0,6364	0,7235
Barrera de sellado	1/3	1/7	1	0,0526	0,1064	0,0909	0,0833
Total	6,3333	1,3429	11,0000				

Apéndice D. Manual de procedimiento BOOM SOLUTIONS

BOOM SOLUTIONS



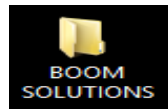
Manual De Procedimiento

Selección De Mecanismos De Contención En Cuerpos Hídricos

Manual De Procedimiento

El presente manual de procedimiento guiará al usuario en la selección del mecanismo más idóneo para contener derrames de petróleo en diferentes cuerpos de agua usando la herramienta **“BOOM SOLUTIONS”**.

- 1 Seleccione la carpeta *BOOM SOLUTIONS* para empezar a navegar en la herramienta.



- 2 Haga doble clic sobre el archivo *“Boom.exe”* para abrir la herramienta *BOOM SOLUTIONS*.


Nombre	Fecha de ...	Tipo	Tamaño
api-ms-win-crt-multibyte-l1-1-0.dll	22/02/202...	Extensión de la apl...	27 KB
api-ms-win-crt-process-l1-1-0.dll	22/02/202...	Extensión de la apl...	20 KB
api-ms-win-crt-runtime-l1-1-0.dll	22/02/202...	Extensión de la apl...	23 KB
api-ms-win-crt-stdio-l1-1-0.dll	22/02/202...	Extensión de la apl...	25 KB
api-ms-win-crt-string-l1-1-0.dll	22/02/202...	Extensión de la apl...	25 KB
api-ms-win-crt-time-l1-1-0.dll	22/02/202...	Extensión de la apl...	21 KB
api-ms-win-crt-utility-l1-1-0.dll	22/02/202...	Extensión de la apl...	19 KB
base_library.zip	28/02/202...	Archivo ZIP	763 KB
boom.exe	28/02/202...	Aplicación	14,491 KB
boom.exe.manifest	28/02/202...	Archivo MANIFEST	2 KB
button_alta_mar.png	26/02/202...	Imagen PNG	6 KB
button_lagos.png	26/02/202...	Imagen PNG	6 KB
button_puerto.png	26/02/202...	Imagen PNG	6 KB
button_rio_joven.png	26/02/202...	Imagen PNG	7 KB

3 Reconocimiento de la interfaz de usuario.



- 4 Seleccione la zona en la que desea analizar el derrame de hidrocarburo. Para ello, el usuario tendrá la posibilidad de analizar cuatro (4) zonas: lagos, ríos jóvenes, alta mar y puertos marítimos.



- 5 Haga clic en la casilla  “*Criterios*” para conocer los criterios definidos para cada una de las zonas.



N°	Criterio	Descripción del criterio
1	Adaptación en aguas tranquilas	El mecanismo que se seleccione debe tener buena respuesta ante condiciones de corrientes bajas
2	Material de fabricación resistente	El mecanismo que se seleccione debe garantizar que el material que se utiliza para su fabricación debe ser altamente robusto y resistente ante condiciones climáticas anormales
3	Facilidad de mantenimiento	El mecanismo que se seleccione debe permitir procedimientos fáciles de revisión y reparación periódica a fin de prolongar su vida útil
4	Facilidad de limpieza	El mecanismo que se seleccione debe permitir eliminar fácilmente todo residuo de hidrocarburo
5	Facilidad de despliegue	El mecanismo que se seleccione debe permitir una correcta puesta en marcha de las barreras en corto tiempo

- 6 Haga clic en la casilla “*Escala de juicios*” para conocer la escala de valoración. Estos elementos son fundamentales ya que serán de gran utilidad en el momento de evaluar las

matrices pareadas de los criterios y las alternativas. La escala tiene valores cuantitativos de 1 a 9.



Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y muy moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

- 7 Complete la matriz de comparación de criterios, para ello utilice la escala de juicios. Tenga en cuenta que las casillas deben reflejar la intensidad de preferencia de dos elementos comparados. Como ejemplo se compara el criterio “*Adaptación de aguas tranquilas*” con el

criterio “*Facilidad de mantenimiento*”, el valor tres (3) indica que es moderadamente preferible que los mecanismos se adapten en aguas tranquilas más que sean fáciles de realizar el respectivo mantenimiento. Por tanto, si se analiza el criterio “*Facilidad de mantenimiento*” versus “*Adaptación de aguas tranquilas*” será su recíproco, $1/3$.

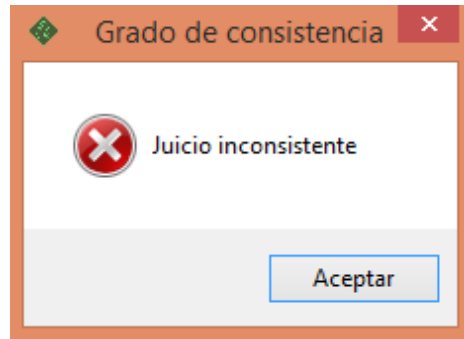
Matriz de comparación de criterios

	Adaptación de aguas tranquilas	Material de fabricación resistente	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de limpieza	Facilidad de despliegue
Adaptación de aguas tranquilas	1		3		
Material de fabricación resistente		1			
Facilidad de mantenimiento	1/3		1		
Facilidad de limpieza				1	
Facilidad de despliegue					1

Añadir criterio

Guardar

- 8 Una vez se complete la matriz de comparación de criterios, haga clic en el botón “*Guardar*”. En dado caso de asignar juicios no coherentes, la herramienta está diseñada para que aparezca un mensaje de “*Juicio inconsistente*”. Por tanto, el usuario deberá analizar nuevamente la matriz de comparación de criterios y comparar los elementos hasta lograr valores consistentes.



9 Seguidamente complete la matriz de comparaciones de alternativas disponibles para la contención de hidrocarburo. Utilice el mismo razonamiento descrito en los numerales 6 y 7.

Matriz de comparación de alternativas

Criterio: Adaptación de aguas tranquilas

	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado
Barrera de valla	1	1/3	1/7
Barrera sorbente	3	1	1/5
Barrera de sellado	7	5	1

Añadir alternativa

Guardar

Matriz de comparación de alternativas

Criterio: Material de fabricación resistente

	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado
Barrera de valla	1	7	4
Barrera sorbente	1/7	1	1/3
Barrera de sellado	1/4	3	1

Añadir alternativa

Guardar

Matriz de comparación de alternativas

Criterio: Facilidad de mantenimiento

	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado
Barrera de valla	1	2	1/7
Barrera sorbente	1/2	1	1/7
Barrera de sellado	7	7	1

Añadir alternativa

Guardar

Matriz de comparación de alternativas

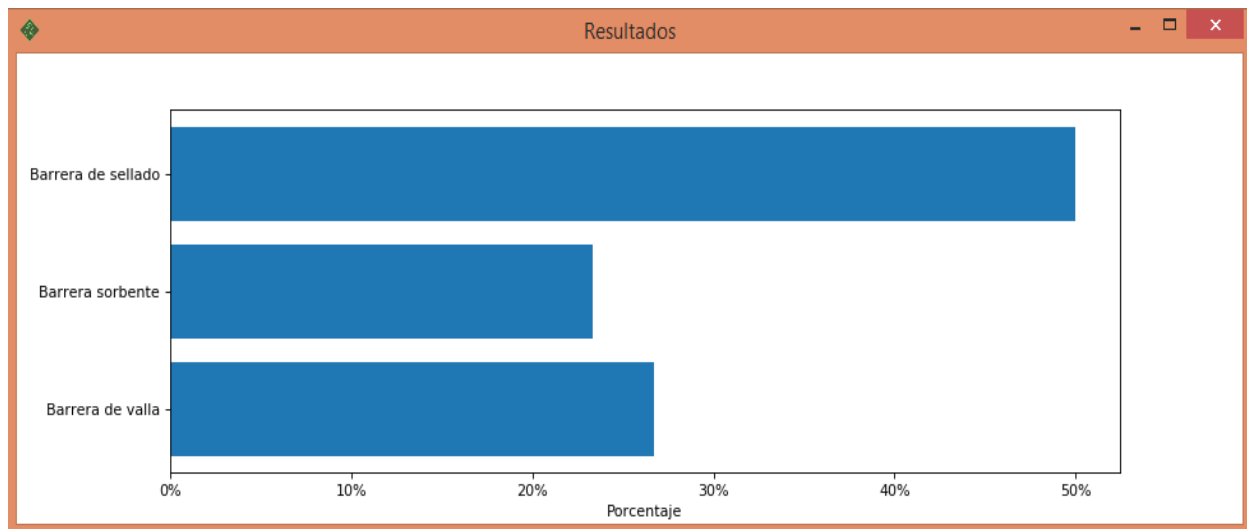
Criterio: Facilidad de limpieza

	Barrera de valla	Barrera sorbente	Barrera de sellado
Barrera de valla	1	2	1/7
Barrera sorbente	1/2	1	1/7
Barrera de sellado	7	7	1

Añadir alternativa

Guardar

- 10 Finalmente, se obtiene el resumen del proceso de síntesis al aplicar el Proceso de Análisis Jerárquico, en el que se indica la mejor alternativa según el tipo de cuerpo hídrico seleccionado en relación a los criterios previamente definidos. Los resultados se presentan en porcentaje.



- 11 Fin del proceso.