

ANÁLISIS DE TRAYECTORIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN UN
SECTOR DEL RÍO MAGDALENA MEDIANTE SIMULACIÓN

DIEGO FERNANDO DURAN ANAYA
KAREN JULLIETH FORERO ARIZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2017

ANÁLISIS DE TRAYECTORIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN UN
SECTOR DEL RÍO MAGDALENA MEDIANTE SIMULACIÓN

DIEGO FERNANDO DURAN ANAYA

KAREN JULLIETH FORERO ARIZA

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero químico

Director

CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA

Ingeniero Químico, MSc

Codirector

DIANA MARCELA IBARRA MOJICA

Ingeniera Sanitaria y Ambiental

MSc. Ingeniería química

CRISÓSTOMO ALBERTO BARAJAS SOLANO

Ingeniero de Sistemas, MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2017

PÁGINA DE DEDICATORIA

En primer lugar, agradecerle a Dios por permitirme cumplir una meta más en mi vida, dedicarle este logro a mi madre Ruth Anaya que ha sido mi gran heroína y mi mayor admiración por que con lucha y fortaleza ha sido mi gran soporte y mi mayor apoyo, sin ella no sería la persona que soy hoy en día,

A mi hijo Juan Diego Durán que ha sido la fuerza promotora, mi orgullo y mi mayor felicidad para salir adelante,

A mi futura esposa Leidy Patarroyo que, con sus consejos, su compañía y amor he podido aprender sobre el valor de nunca rendirme,

A mi hermana Edna Durán que desde que empecé este nuevo ciclo siempre fue mi soporte incondicional,

También a mi abuelita Adela Castillo y a mi padre Rodrigo Durán que siempre estuvieron cuando los necesite

Diego Duran Anaya

PÁGINA DE DEDICATORIA

Este triunfo va dedicado con todo mi amor y esfuerzo a mi padre, porque
gracias al pude culminar mis estudios,
porque confió en mi aun cuando nadie lo hacía, porque no necesito de palabras,
ni sermones para demostrarme que siempre estaría conmigo,
sin importar que tan grande este o que tan lejos me encuentre, porque, aunque
no es una persona con estudios, me enseñó mucho más que cualquier educador
que haya conocido, no porque sea mi padre, no por lo que le enseñaron a él,
sino porque es un vivo ejemplo de que en ocasiones un padre percibe más de los
sentimientos de sus hijos,
hoy no me graduó yo como Ingeniera Química, hoy nos graduamos los dos
porque este triunfo también es tuyo.

Te adoro papito

Karen Forero Ariza

PAGINA DE AGRADECIMIENTOS

Agradecerle a mi compañera Karen, a mi director de proyecto Crisóstomo Barajas, a mis codirectores Diana Ibarra y Crisóstomo Alberto Barajas, que a pesar de las circunstancias siempre fueron los promotores de este gran logro, así también a compañeros y compañeras que hicieron parte durante este largo trayecto y fueron un apoyo más, Gracias.

Diego Duran Anaya

Primeramente agradezco a Dios que me protegió en todo este camino, llenándome de bendiciones a lo largo de mi vida, a mi madre que me enseñó a superar todos los problemas y a pesar de las adversidades nunca desfallecer, a todos los profesores que me han acompañado en el desarrollo de mi vida profesional, en especial a mi director y profesor, Crisóstomo Barajas, quien se convirtió en mi guía dentro de la universidad, llenándome con sus sabias palabras y anécdotas, gracias a todos aquellos que hicieron parte de esta triunfo.

Karen Forero Ariza

CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO	19
2.1 COMPORTAMIENTO DEL PETRÓLEO EN EL AGUA	20
2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS EN EL MEDIO FLUVIAL.....	21
2.2.1 Transporte Advectivo.....	23
2.2.2 Transporte difusivo.....	24
3. METODOLOGÍA.....	25
4. RESULTADOS Y ANALISIS.....	26
4.1 FASE 1. IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS HIDROCARBUROS EN EL MODELO DE TRAYECTORIA.....	26
4.2 FASE 2. SELECCIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL MODELADO DE TRAYECTORIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN UN SECTOR DEL RÍO MAGDALENA.....	27
4.2.1 General NOAA Operational Modeling Environment- GNOME.....	28
4.3 FASE III: ANÁLISIS DE TRAYECTORIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN RÍOS MEDIANTE ESCENARIOS HIPOTÉTICOS EN UN SECTOR DEL RÍO MAGDALENA.....	31
4.3.1 Diseño de escenarios de derrame para simulación..	31

4.3.1.1 Características del área de estudio.....	32
4.3.1.2 Características del derrame.....	33
4.3.1.3 Área de derrame.....	34
4.3.1.4 Modelo hidrodinámico para la obtención de las velocidades de corrientes.....	35
4.3.1.5 Matriz de escenarios hipotéticos de derrame.....	36
4.3.2 Comportamiento de la trayectoria respecto a la dirección el viento.....	38
4.3.3 Comportamiento de la trayectoria respecto al tiempo con viento variable.....	44
4. CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS.....	60

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Proceso de transporte y degradación del petróleo.	21
Figura 2 Diagrama del canal del flujo de trayectoria	22
Figura 3. Diagrama de vectores que explica el movimiento del vertido	23
Figura 4. Metodología para el desarrollo de la investigación	25
Figura 5. Sector de Estudio.	32
Figura 6. Mapa Geo-referenciado en coordenadas WGS84 vista de ArcGIS 10.1.....	35
Figura 7. Trayectoria de la mancha para el escenario 1.	37
Figura 8. Resultados de producto Flotando, en la orilla y evaporado y dispersado con respecto a la dirección del viento y cantidad derramada.	39
Figura 9. Comportamiento de los hidrocarburos para una cantidad de derrame media.	40
Figura 10. Efecto de la dirección del viento en la trayectoria del Crudo medio con una cantidad derramada media ($332,5 \text{ m}^3$), en (a) dirección norte y (b) dirección sur.....	41
Figura 11. Alcance de la mancha de acuerdo con la cantidad derramada, tipo de crudo y dirección del viento.....	42
Figura 12. Trayectoria de la mancha para un crudo liviano (Gasolina) y un crudo pesado (Fuel oil 6) de acuerdo con la cantidad derramada.	43
Figura 13. Efecto del tiempo para el hidrocarburo Diésel en % de flotabilidad, % en orillas, % evaporada-dispersada para una cantidad de derrame mínima, media y máxima.....	44
Figura 14. Trayectoria de la mancha en el tiempo para un crudo pesado (Fuel oil 6) y un crudo liviano (Gasolina) para una cantidad de derrame medio ($332,5 \text{ m}^3$).	45
Figura 15. Variación de la trayectoria respecto a una cantidad de derrame mínima ($23,85 \text{ m}^3$), una cantidad de derrame media ($332,5 \text{ m}^3$) y una cantidad de derrame máxima ($2225,8 \text{ m}^3$) del Diésel.....	47

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Principales características del medio ambiente y de los hidrocarburos que determinan la trayectoria.....	26
Tabla 2. Herramientas Computacionales que predicen la trayectoria de un derrame en sectores fluviales	28
Tabla 3. Algoritmo de GNOME	29
Tabla 4. Datos de entrada requeridos por GNOME, sus formatos de entrada y las variables de respuesta que entrega el modelo.....	31
Tabla 5. Valores de Entrada	33
Tabla 6. Valores de entrada de Viento variable	33
Tabla 7. Propiedades de los crudos de GNOME	33
Tabla 8. Coeficiente de difusividad según el tipo de hidrocarburo y la cantidad derramada a 28,24°C.....	34
Tabla 9. Factores base para el diseño de los escenarios de derrame.....	36
Tabla 10. Condiciones de entrada para el escenario 1.....	37

LISTA DE ANEXOS

	Pag
ANEXO A. DATOS DEL ALGORITMO	60
ANEXO B. SELECCIÓN DE VALORES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA .	61
ANEXO C. MATRIZ DE ESCENARIOS	70
ANEXO D. DATOS REPORTADOS	72

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE TRAYECTORIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN UN SECTOR DEL RÍO MAGDALENA MEDIANTE SIMULACIÓN *

AUTORES: DIEGO FERNANDO DURAN ANAYA, KAREN JULLIETH FORERO ARIZA **

PALABRAS CLAVES: Derrame de hidrocarburos, modelado computacional, análisis de trayectoria de partículas, Puerto de Barrancabermeja.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente el intenso consumo de petróleo y sus derivados en todo el mundo ha aumentado el riesgo de derrames de estos productos en ambientes acuáticos. En Colombia, datos reportados a 2002 registran que más del 70% de accidentes relacionados con derrames de hidrocarburos afectan ríos y caños. Es por esto que a escala mundial se han diseñado planes de contingencia, para los cuales los modelos de predicción de trayectoria de derrames significan una herramienta importante.

En el presente proyecto se realizó el análisis de trayectoria de derrames de hidrocarburos en un medio fluvial, a partir de la revisión literaria, se estableció las principales características fisicoquímicas y del medio que influyen en el recorrido de una mancha de crudo sobre un medio acuático, así también se encontraron diversos software de simulación de derrames para el desarrollo del análisis de trayectoria; se utilizó el modelo computacional General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME) como herramienta útil en la predicción del movimiento del hidrocarburo y se eligió el sector del río Magdalena comprendido entre Barrancabermeja y la desembocadura del río Sogamoso. Diferentes escenarios fueron simulados variando la cantidad derramada, la dirección del viento y el tipo de hidrocarburo, teniendo como punto inicial de derrame el puerto de Barrancabermeja. Los resultados permitieron la visualización gráfica de la estimación de la trayectoria de la mancha de crudo para cada escenario, a partir del cual fue posible identificar las tendencias en el alcance y destino final según las condiciones de entrada establecidas. Adicionalmente, se obtuvieron los valores de la cantidad de crudo que alcanzó la rivera, el total vaporizado y el total del fluido que permaneció en la superficie en diferentes instantes, haciendo posible un mejor entendimiento y correlación entre esos procesos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química.
Director Crisóstomo Barajas Ferreira, Ingeniero Químico, MSc.

SUMMARY

TITLE: ANALYSIS OF HYDROCARBON SPILL TRAJECTORY IN A MAGDALENA RIVER SECTOR BY SIMULATION*

AUTHOR: DIEGO FERNANDO DURAN ANAYA, KAREN JULLIETH FORERO ARIZA**

KEYWORDS: Oil spill, computational modeling, particle trajectory analysis, Port of B/bermeja.

DESCRIPTION:

Currently the intense consumption of oil and its derivatives around the world has increased the risk of spills of these products in aquatic environments. In Colombia, data reported to 2002 show that more than 70% of accidents related to oil spills affect rivers and pipes. This is why contingency plans have been designed on a global scale, for which spill trajectory prediction models are an important tool.

In the present project, the trajectory analysis of oil spills in a fluvial environment was based on literature on the main physicochemical and environmental characteristics that influence the path of a crude oil slick on an aquatic environment; on this review also was found a great variety of oil spill simulation software for the development of trajectory analysis. The General NOAA Operational Modeling Environment – GNOME was used as a useful tool to predict the trajectory of hydrocarbons in a sector of the Magdalena River between Barrancabermeja and the mouth of the Sogamoso River. Different scenarios were simulated by varying the amount released, wind direction and oil type, considering that the location of the oil spill started at the Port of Barrancabermeja. The results allowed the graphic visualization showing the predicted trajectory of the oil spilled for each scenario; for which it was possible to identify trends in the scope and fate of oil according to the oil spill information. Additionally, it was estimated the amount of oil beached, still floating and evaporated at different times; this information allowed to understand a correlation between weathering processes and the behavior of oil spills.

* Grade Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Crisóstomo Barajas Ferreira, Ingeniero Químico, MSc.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el intenso consumo de petróleo y sus derivados en todo el mundo ha aumentado el riesgo de derrames de estos productos en ambientes acuáticos [1]. En Colombia, datos reportados a 2002 registran que más del 70% de accidentes relacionados con derrames de hidrocarburos afectan ríos y caños [2]. Desde la antigüedad el río Magdalena es la principal ruta fluvial del país [3], y actualmente los hidrocarburos representan el 91% de los productos que se transportan a través de este [4].

Estudios muestran que los vertidos de hidrocarburos causan considerables pérdidas medioambientales donde la recuperación total de áreas afectadas puede tardar entre una y dos décadas [2]. Estos accidentes no solo deterioran el medio ambiente acuático y la vida silvestre, sino también el abastecimiento de agua en las áreas cercanas [5].

Es por esto que a escala mundial se han diseñado planes de contingencia, para los cuales los modelos de predicción de trayectoria de derrames significan una herramienta importante en la elaboración de estrategias necesarias para su contención y recobro [6]. Existe gran cantidad de modelos de trayectoria que definen el área de influencia a través de la simulación de escenarios hipotéticos de derrame, teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos, la cantidad vertida al cuerpo de agua y las condiciones meteorológicas e hidrológicas del lugar del accidente [6]. La mayoría de estos han sido diseñados para zonas costeras, pero muy pocos permiten simular el comportamiento en ríos [7].

Mediante el presente trabajo se buscó analizar la trayectoria de derrames de hidrocarburos usando las condiciones hidrológicas y meteorológicas de un sector del río Magdalena mediante escenarios diseñados para varios tipos de hidrocarburo y cantidades derramadas. El análisis se realizó haciendo uso de una herramienta abierta al público, la cual permitió predecir el comportamiento de la mancha en el medio fluvial ante las diferentes variaciones de las condiciones de entrada establecidas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la Trayectoria de escenarios de derrames de Hidrocarburos en un sector del Río Magdalena mediante simulación con software especializado.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las principales características fisicoquímicas del entorno y de los crudos que intervienen en la trayectoria de un derrame de hidrocarburos en ríos.
- Seleccionar una herramienta computacional para evaluar la trayectoria de derrames de hidrocarburos en un sector del río Magdalena.
- Analizar el comportamiento de trayectoria de derrames de hidrocarburos en ríos mediante el diseño de diferentes escenarios hipotéticos en un sector del río Magdalena.

2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO

Los modelos de simulación de derrames de petróleo en agua generalmente son contruidos por medio de la integración de correlaciones que representan los diferentes procesos físicos y químicos transcurridos durante el recorrido de la mancha en el cuerpo fluvial [8].

En 1971 Fay [9] propuso los primeros parámetros para la dinámica de un derrame de hidrocarburos sobre un medio fluvial, estableciendo que la mancha se rige por las características del petróleo, además de la hidrodinámica del cuerpo de agua. En 1979 Tsahalis [9] propuso el primer modelo de simulación para derrames de petróleo en cuerpos de agua dulce, el cual consistía en un modelo unidimensional para el cálculo del esparcimiento mecánico de la mancha. Más adelante, en 1987 Shen y Yapa plantearon un modelo bidimensional usando métodos lagrangianos y eulerianos para la distribución de la velocidad de la mancha, considerando los procesos de transformación del crudo como la dispersión, la evaporación y la disolución [8].

En 1988, Reed, Kana y Gundlach [9] desarrollaron su propio modelo para tres zonas de ocurrencia y fin del derrame (playa, mar abierto y zona de oleaje) aportando significativamente al trabajo de Yapa en 1993 [9], en el cual se tuvieron en cuenta los procesos de transformación y concluyó que la advección y la difusión son las principales características que determinan la trayectoria de la mancha en ríos. En la actualidad existen diversos software de modelado de trayectoria, comerciales y de acceso libre, tales como Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS), General Noaa Operational Modeling Environment (GNOME), Integrated Oil Spill Impact Model System (SIMAP), Oil Spill Model and Response System OILMAP, entre otros [10].

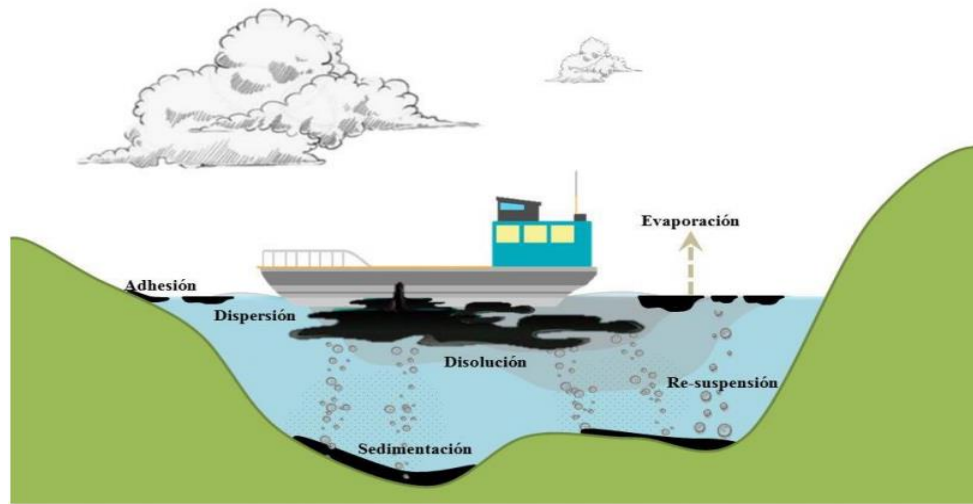
2.1. COMPORTAMIENTO DEL PETRÓLEO EN EL AGUA

El petróleo está constituido principalmente por hidrocarburos y por una pequeña fracción de impurezas como el nitrógeno, azufre, oxígeno y metales pesados [11]. Los hidrocarburos se diferencian según su estructura y peso molecular bajo el criterio de los °API (American Petroleum Institute) en hidrocarburos ligeros, medios e hidrocarburos pesados [9]. Para crudos ligeros se conoce que presentan altas velocidades de propagación sobre la superficie de los cuerpos de agua debido a que poseen un peso específico elevado, baja tendencia aditiva y baja viscosidad [12]; Lo inverso ocurre para los crudos pesados [10].

Respecto al comportamiento de la mancha, autores como Reed et-al (1988) [11] y Fay (1971) [13] afirman que la depositación en las riveras ocurrirá más rápidamente para áreas de derrame pequeñas, tales como ríos o lagos. Los derrames de petróleo se pueden clasificar según la cantidad derramada como: derrames mínimos (menor a 30 m³), derrames medianos (entre 30 y 800 m³) y derrames máximos (mayor de 800 m³) [11].

Cuando un hidrocarburo es derramado en un medio fluvial, se esparce y forma una película sobre la superficie [13] donde las características físicas y químicas del petróleo empiezan a modificarse debido a los fenómenos de advección, difusión y dispersión durante sus primeras etapas; para etapas posteriores los procesos de envejecimiento son los que rigen el destino final de la mancha. En la figura 1 se pueden observar los diferentes procesos que interviene en la mancha cuando ocurre un derrame de hidrocarburos.

Figura 1. Proceso de transporte y degradación del petróleo.



Fuente: Ibarra-Mojica, Romero, Barajas-Ferreira, & Kafarov, 2017,[14].

2.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS EN EL MEDIO FLUVIAL

En el medio fluvial, el transporte de los hidrocarburos se determina partir de las ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes [15]. las cuales están integradas por la ecuación de continuidad y la ecuación de momentum. La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de la materia para un líquido incompresible, donde en un determinado volumen infinitesimal de control se cumple que la diferencia entre la variación del flujo de agua que entra en el volumen de manera lateral y del flujo de agua que lo atraviesa en la dirección de la corriente equivale a la variación temporal del área transversal que queda cubierta por el agua. ver ecuación 1 [15] [16].

$$\frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{\delta A}{\delta t} = q_L \quad (1)$$

A = Área transversal de flujo [m^2]

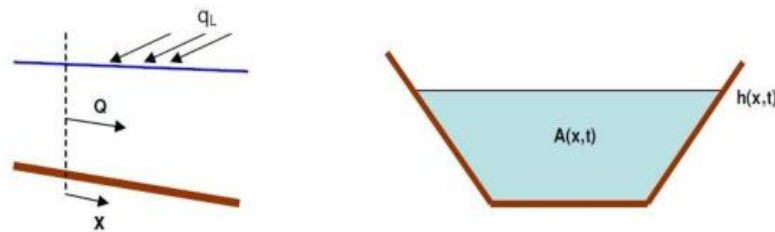
q_L = Variación del flujo de agua lateral por unidad de longitud [$\frac{m^3}{m*s}$]

$Q = \text{flujo volumetrico de agua } [\frac{m^3}{s}]$

$\frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta t} = \text{Variación longitudinal y variacion temporal de flujo}$

El primer término se refiere a la variación longitudinal del flujo que atraviesa el volumen de control, es por donde se transfiere el agua ver figura 2, el segundo término de la ecuación hace referencia a la variación temporal que tiene el agua con su sección transversal y el tercer término representa la variación del flujo que entra de manera lateral al volumen de control [16][17].

Figura 2 Diagrama del canal del flujo de trayectoria



Fuente: Alvarez S, 2011, [16].

Mientras que la ecuación de momentum; hace referencia a la conservación de la cantidad de movimiento longitudinal, ver ecuación.2 [15].

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta Q^2}{A_l \delta x} + g * A_l * \frac{\delta z}{\delta x} + g * A_l * S_f - g * A_l * S_o = 0 \quad (2)$$

$Q = \text{flujo volumetrico de agua } [\frac{m^3}{s}]$

$A_l = \text{Área transversal lateral de flujo } [m^2]$

$z = \text{profundidad del agua } [m]$

$g = \text{gravedad } [\frac{m}{s^2}]$

$\frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta t} = \text{Variación longitudinal y variacion temporal de flujo}$

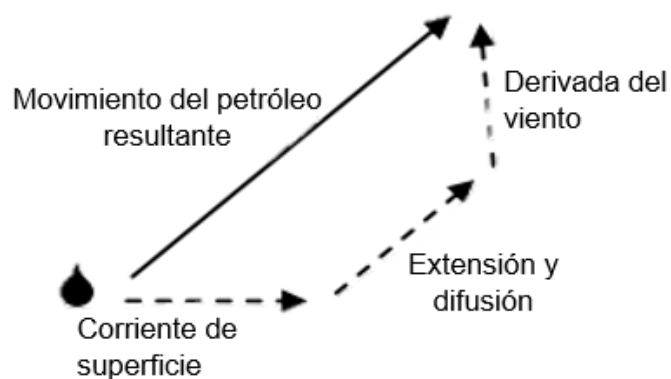
$S_o, S_f = \text{pendientes de fricción del canal [adimensional]}$

Estas ecuaciones simplificadas de Navier-Stokes permiten abordar el cálculo del transporte Advectivo y el transporte difusivo [18].

2.2.1 Transporte Advectivo. El transporte advectivo horizontal está regido por las variables hidrológicas y meteorológicas de viento y corrientes [19], [20], donde los flujos de agua determinan la migración del petróleo según el rango de velocidades presentes, las cuales varían de acuerdo a su ubicación [18] [11]. Generalmente, esta información es obtenida a través de modelos hidrodinámicos, los cuales simulan la velocidad y dirección de las corrientes en el cuerpo de agua [19], [21]. Mientras, que el desplazamiento debido a los vientos dependerá de la intensidad y dirección de los mismos, afectando los patrones de flujo de la mancha y su trayectoria.

Para determinar la posición de cada partícula de la mancha, los modelos de trayectoria predicen su ubicación como la suma vectorial de la derivada del viento y de las corrientes. En la figura 3 se observa la iteración de estos vectores que definen el recorrido de la mancha y la ubicación final [10] [18].

Figura 3. Diagrama de vectores que explica el movimiento del vertido



Fuente: Marzialetti, 2011, [10].

2.2.2 Transporte difusivo. Los procesos de transporte difusivo horizontal se refieren a la dispersión o difusión turbulenta [18]. En un derrame de hidrocarburos, la difusión se produce por la influencia de las fuerzas de gravedad, viscosidad, flotabilidad y tensión superficial, que hacen que una fina capa de aceite cubra una gran superficie [22]. Los estudios realizados por Fay, (1969) y Houtt (1972) [11] exponen adicionalmente que el espesor y el área del derrame son factores claves para la estimación de los procesos naturales del derrame del petróleo. Por esta razón, dichos factores son incluidos en el cálculo del coeficiente de difusividad y el área de la mancha con el fin de mejorar la aproximación para la estimación de la trayectoria [11].

En la actualidad se emplean modelos estocásticos lagrangianos para simular los procesos de difusión horizontal. En estos modelos la partícula evoluciona de forma Markoviana, es decir que describen procesos cuya densidad de probabilidad condicionada en un instante t (t_n) depende únicamente del valor del proceso en su estado precedente (t_{n-1}) sin importar sus estados anteriores. Existen tres modelos Markovianos, el random walk, en el cual la dispersión de partículas crece linealmente con el tiempo, un segundo modelo el “Random flight“, donde la dispersión de partículas sigue una función exponencial y un tercer modelo en el cual se asume que tanto la posición x , como la velocidad u y la aceleración a , son conjuntamente Markovianas [18] ya que estos modelos dependen del coeficiente difusivo. Betancur (2011) [11] propone la siguiente ecuación 3 para su cálculo a partir de los estudios realizados por Fay (1969) y Houtt (1972) [11]:

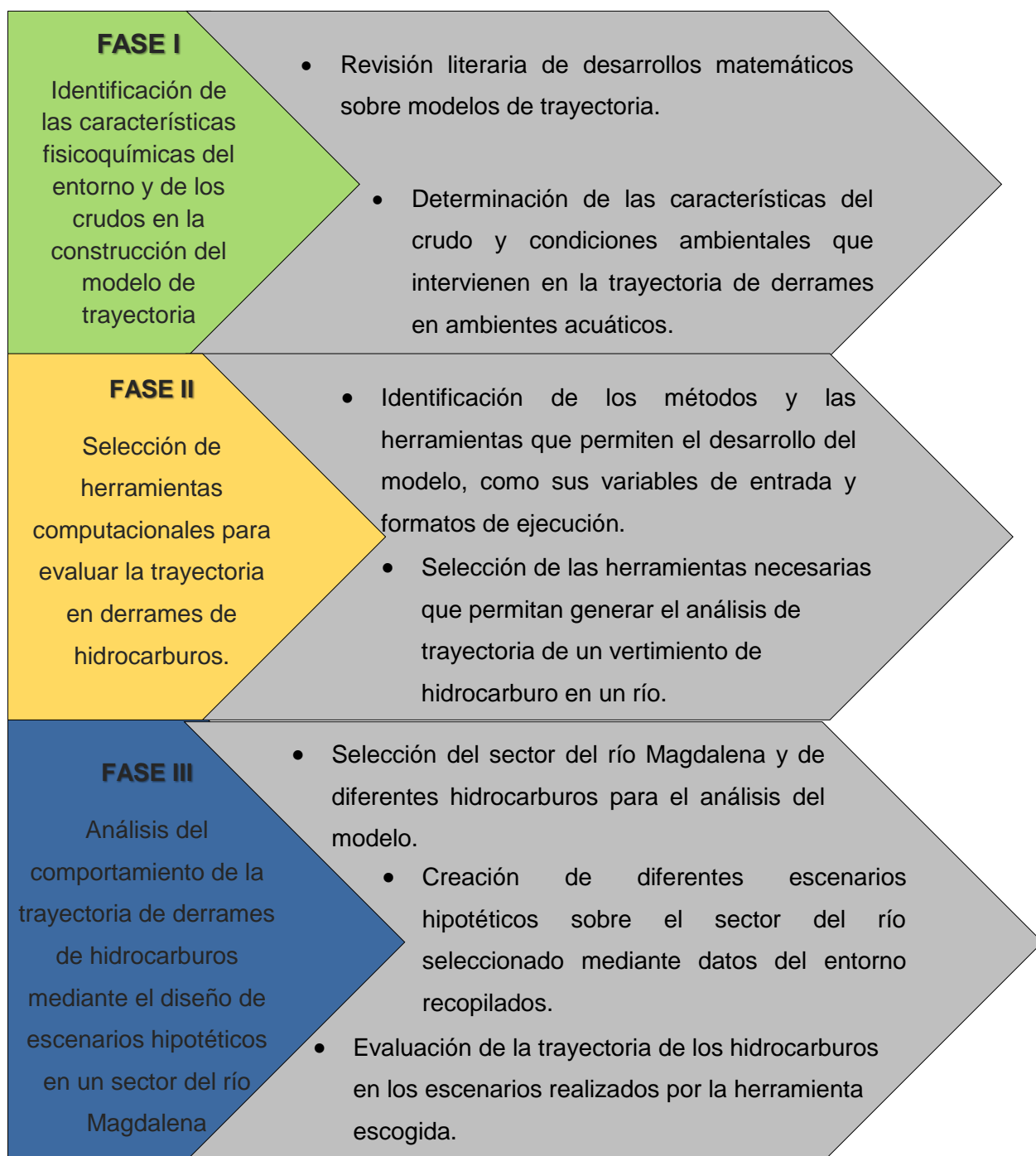
$$\alpha = 0,5 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_w} Vg \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Dónde: α , es el coeficiente de difusividad en m^2 /s ; g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 ; $\Delta\rho$ es la diferencia de densidades del agua y el petróleo, respectivamente, en kg/m^3 ; y V es el volumen inicial de petróleo derramado m^3 .

3. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología establecida para el desarrollo de la investigación de manera general en la figura 4.

Figura 4. Metodología para el desarrollo de la investigación



4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 FASE 1. IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS HIDROCARBUROS EN EL MODELO DE TRAYECTORIA

De acuerdo con la revisión de literatura, en la tabla 1 se describen las principales variables que tienen mayor influencia en las características del medio ambiente y de los hidrocarburos en la trayectoria de derrames en ambientes acuáticos según diferentes autores. Dado que el objetivo del proyecto fue analizar la trayectoria del derrame, los procesos de degradación no fueron considerados.

Tabla 1. Principales características del medio ambiente y de los hidrocarburos que determinan la trayectoria

		PROCESOS QUE DESCRIBEN EL COMPORTAMIENTO DE LA MANCHA								
		ADVECCIÓN			DIFUSIÓN			DISPERSIÓN		
		Autor	Silos J, 2008.[24]	Stolzenb 1977.[25]	Lonin 1999. [8]	Rosman 20 [8]	Hoult, 1992.[11]	Zapata et 2002. [9]	Fay 1971 [26],[25]	Zapata et 2002. [9]
Condiciones del área	meteorológicas	x		x	x	x	x	x	X	X
	hidrodinámicas		x	x	x	x	x		X	X
	Temperatura	x								
Propiedades del crudo	Composición molecular		x	x		x				
	Densidad		x					x		
	Solubilidad del agua									
	Coef. de difusividad	x	x	X		x		x		X

Condiciones del derrame	Volumen derramado	x		x			x	x		
	Tipo de derrame				x		x			

Fuente: Zapata et al. 2002 [9], Betancourt 2001 [11], Trento and Álvarez 2013 [8], Silos 2008 [24] y Wang et al. 2008 [25].

coeficiente de difusividad y la cantidad derramada son las condiciones que afectan en mayor parte el recorrido de la mancha. La densidad, el tipo de derrame y la temperatura del sector son las variables de menor incidencia en los procesos de trayectoria.

4.2 FASE 2. SELECCIÓN DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL MODELADO DE TRAYECTORIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN UN SECTOR DEL RÍO MAGDALENA.

La revisión bibliográfica de la fase 1 permitió Identificar las principales variables del entorno para un derrame de hidrocarburos sobre cuerpos de agua dulce, sin embargo, no se enfocó en la influencia de cada característica para el proceso del recorrido de la mancha sobre este medio fluvial; Posteriormente se buscó una herramienta computacional que permita evaluar la trayectoria de derrames de hidrocarburos en un sector del rio Magdalena.

La selección de la herramienta computacional se llevó a cabo; teniendo como criterios si el software es o no de acceso libre, si tenía en cuenta las características identificadas en la fase anterior y su desarrollador con el fin de determinar su confiabilidad, tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Herramientas Computacionales que predicen la trayectoria de un derrame en sectores fluviales

Modelo	Libre Acceso	Evaluación de características identificadas en la fase I	Desarrollador
GNOME General Operational Environment NOAA Modeling	SI	SI	NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)
SIMAP Integrated Oil Spill Impact Model System	NO	SI	Applied Science Associates, Inc. (ASA),
OILMAP Oil Spill Model and Response System	NO	SI	Applied Science Associates, Inc. (ASA)
PRIMI Progetto pilota Inquinamento Marino da Idrocarburi	NO	SI	ASI, eGeos, CNR, INGV, ENEA, ACS, INNOVA.
CHEMMAP Chemical Discharge Model System	NO	SI	Applied Science Associates, Inc. (ASA)
Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures (MOTHY)	NO	SI	Applied Science Associates, Inc. (ASA)

De acuerdo a los criterios anteriormente establecidos se observó que el software que más se ajusta para el caso de estudio es GNOME, el cual según la literatura es uno de los software más utilizados a nivel mundial [10], [19], [6] [20]; Además, cuenta con los procesos de advección, dispersión y difusión de la mancha identificados en la fase 1. Para el caso de estudio y poder abarcar los objetivos planteados se escoge GNOME.

4.2.1 General NOAA Operational Modeling Environment- GNOME. GNOME es un sistema interactivo de simulación ambiental con un lenguaje de programación C++, [27], diseñado para el modelado rápido de trayectorias de contaminantes en un medio marino y fluvial. En la tabla 3 se describen los principales procesos evaluados por GNOME para la creación de escenarios de trayectoria, con base en el uso del modelo Euleriano / Lagrangiano (LEs) bidimensional (2-D), donde la mancha es definida como una nube de partículas, llamadas en el software como elemento lagrangianos (LE) [28].

Aunque GNOME cuenta con una base de datos on-line, con información base para el modelado de derrames de hidrocarburos en zonas de interés, estas solo son de Estados Unidos. En el caso de países diferentes a EEUU el módulo de diagnóstico del software permite que el usuario ingrese información específica de un área de estudio.

Tabla 3. Algoritmo de GNOME

Procesos o Propiedad	Definición
Movimiento	$\Delta x = \frac{\mu}{111120,00024 \cdot \cos(y)} * \Delta t, \Delta x = \frac{v}{111120,00024} * \Delta t, \text{ and } \Delta z = 0 \quad (4)$ <p>Esquema de Euler hacia adelante (Runge-Kutta de primer orden), donde cada LE se moverá de acuerdo con la suma de las componentes de velocidad de las corrientes, del viento y de la difusión. Donde u (este-oeste) y v (norte-sur), Δt es el tiempo transcurrido entre los pasos, Y es la latitud en radianes, Δx, Δy son el desplazamiento de longitud y latitud y Δz es el desplazamiento vertical, el cual es ero porque el modelo es en 2D.</p>
Mapas	<p>Determinan la costa donde se derrama el material, a partir de dos polígonos, uno es el límite del mapa para mapas no rectangulares y el otro es un área de derrame. En la actualidad GNOME solo utiliza formatos de archivo de mapas. BNA (Atlas Boundary asociado), el cual es una lista de puntos donde cada secuencia de puntos sigue la siguiente lógica: "X", "Y", Z, donde X es el nombre de la secuencia, Y es el tipo de secuencia, "1" tierra, "2" agua y Z es el número de puntos de la secuencia.</p>
Corrientes	<p>Utiliza el algoritmo DAG para identificar en que celda de rejilla está él LE y lleva consigo (entre otras propiedades) sus coordenadas de latitud y longitud en cada momento dado. Para introducir las corrientes reconoce modelos hidrodinámicos en una serie de formas diferentes, en elementos finitos, rectangular y una grilla curvilínea, dependiente o independiente de tiempo.</p>
Viento	<p>Se basa en la derivación analítica y empírica de que el crudo se extiende en la dirección del viento de 1% al 4%, este rango se utiliza aleatoriamente para mover cada LE</p> $\frac{d\sigma^2}{dt} = S(t) \quad (5)$ <p>Donde σ es la varianza de las localizaciones del LEs y S(t) es el parámetro de propagación en función del tiempo. Permite introducir sus valores en una cuadrícula regular o curvilínea o directamente en la plataforma de GNOME.</p>

Difusión	<p>Ocurre de manera aleatoria, donde el recorrido aleatorio se basa en el coeficiente de difusión, el cual representa la difusividad de remolino horizontal en el agua, debido a que la difusión y la propagación se tratan como procesos estocásticos los efectos gravitacionales y de tensión superficial son ignorados.</p> $\frac{\partial C}{\partial t} = D \Delta^2 C ; (6) \qquad \frac{\partial C}{\partial t} = D_x * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y * \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} (7)$ <p>Ecuación de Fick donde C es la concentración de un material y D es coeficiente de difusión</p>
Evaporación	<p>Utiliza un algoritmo simple de evaporación de tres fases donde el contaminante es tratado como una sustancia de tres componentes con semividas independientes.</p> $X_{prob} = \frac{P_1 * \left(\frac{-t_i}{2^{H_1-2}} \frac{t_{i-1}-2*t_i}{H_2} \right) + P_2 * \left(\frac{-t_i}{2^{H_2-2}} \frac{t_{i-1}-2*t_i}{H_2} \right) + P_3 * \left(\frac{-t_i}{2^{H_3-2}} \frac{t_{i-1}-2*t_i}{H_2} \right)}{P_1 * 2^{H_1} + P_2 * 2^{H_2} + P_3 * 2^{H_3}} (8)$ <p>Donde t es el tiempo transcurrido en horas, en el paso del tiempo i y el paso del tiempo anterior i-1, H₁, H₂ y H₃ son las semividas de cada componente (en horas) y P₁, P₂ y P₃ son los porcentajes de cada componente.</p>
Dispersión	<p>Simula la dispersión a través la de probabilidad que la LE vuelva a la superficie con un periodo de una hora de la semivida, este se determinado por un numero aleatorio en un intervalo de 0 a 1, R (0,1) si R(0,1) del LE < p, el simulan con el modelo antes descrito "random walk". Donde se introduce un coeficiente de difusión, que se utiliza para calcular la longitud del paso aleatorio en las direcciones x y y de una distribución uniforme.</p>
Refloting	<p>Es un parámetro llamado "semivida" que describe el número de horas que se espera que la mitad del aceite se elimine sí; 1 hay viento o difusión y 2 si el nivel agua está al mismo nivel, o más alto, que el nivel del aceite cuando este se deposita en la costa. La vida media de refloat es una hora por defecto; Si el valor es mayor, el aceite se pega a la línea de costa, mientras que para valores muy pequeños el aceite se vuelve al medio fluvial.</p>

Fuente: Beegle-Krause 2001 [27] y NOAA 2012 [28].

En la tabla 4 se describen las variables de entrada requeridas y el formato en que deben ser ingresadas al software; así como las variables de respuesta entregadas luego de la simulación.

Tabla 4. Datos de entrada requeridos por GNOME, sus formatos de entrada y las variables de respuesta que entrega el modelo.

Variables de entrada	Formato de entrada	Variables de salida
Tipo de hidrocarburo.	Tomado del programa	✓ Porcentaje evaporado y dispersado
Velocidad y dirección del viento [m/s].	se introduce en el software	✓ Porcentaje remanente
Área de derrame	Mapa en formato. BNA (Atlas Boundary asociado)	✓ Porcentaje en la rivera
Coeficiente de difusión	Se calcula y se introduce en el programa	✓ Alcance de la mancha
Velocidad de la corriente de agua [m/s].	. CUR a partir de un modelo hidrodinámico	✓ Distribución en la costa
Tipo de derrame.	Se determina en la interfase continuo o instantáneo	
Cantidad derramada [m ³].	Se escribe en el software	

4.3 FASE III: ANÁLISIS DE TRAYECTORIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN RÍOS MEDIANTE ESCENARIOS HIPOTÉTICOS EN UN SECTOR DEL RÍO MAGDALENA

Teniendo en cuenta que el software seleccionado requiere información de características del ambiente y del hidrocarburo, y que se busca implementar la herramienta para su uso en ríos, se procedió a diseñar los escenarios hipotéticos.

4.3.1 Diseño de escenarios de derrame para simulación. El diseño de escenarios de derrames se realizó teniendo en cuenta las características del ambiente y de los hidrocarburos, requeridas para el análisis de trayectoria, según lo evidenciado en la fase I y II del proyecto.

4.3.1.1 Características del área de estudio. Se seleccionó como área de estudio el sector comprendido entre Barrancabermeja y la desembocadura del río Sogamoso, en donde históricamente se han presentado varios incidentes de derrames de hidrocarburos. [29], [30]. La información base de condiciones ambientales en el área de estudio se obtuvo de la estación meteorológica Yariguíes e hidrodinámicas Maldonado y de Peñas Blancas, del IDEAM; desde 1977 hasta 2016. En la figura 5 se puede observar el sector que comprende el área de estudio y la ubicación de las estaciones.

Figura 5. Sector de Estudio.



Fuente: Google Heart

En la tabla 5 se resume los valores representativos establecidos para las condiciones meteorológicas e hidrodinámicas. La información detallada del tratamiento estadístico de los datos históricos para la temperatura, la velocidad del agua y la velocidad del viento se encuentra consignada en el anexo B.

Tabla 5. Valores de Entrada

Variable de entrada	Valor
Temperatura Promedio	28,94 °C
Viento Constante	1,8 N ó S
Caudal Maldonado	2,750 m ³ /s
Caudal De Peñas Blancas	3,250 m ³ /s

Adicionalmente algunos escenarios fueron analizados con condiciones de viento variable, teniendo en cuenta un periodo de 12 horas, tal como se resume en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de entrada de Viento variable

VIENTO VARIABLE					
HORA	Dirección	Magnitud	Hora	Dirección	Magnitud
1	E	1,7	7	NE	0,8
2	E	2	8	NE	0,9
3	S	1,5	9	S	0,9
4	S	1,7	10	SW	1,3
5	S	1,3	11	S	1,3
6	E	0,8	12	S	1,6

4.3.1.2 Características del derrame. Para la selección de los hidrocarburos, GNOME posee información de características de 6 tipos de hidrocarburos y no permite el ingreso de información específica de otros. En la tabla 7 se resume las propiedades de los hidrocarburos de GNOME.

Tabla 7. Propiedades de los crudos de GNOME

Hidrocarburo	°API	Densidad [kg/m ³]
Diésel	37,2	829
Fuel Oil # 6	14,1	959,7
Crudo Medio	29,7	869,5
Gasolina	57,2	626
Queroseno	43	785,2
Fuel Oil # 4	32	826,3

Se estableció un derrame puntual instantáneo a la altura de Barrancabermeja. Para seleccionar la cantidad derrama se establecieron tres cantidades, una mínima (150bbl o 23,85m³), máxima (14000 bbl o 2225,8m³) y media (2093.7 bbl o 332,8m³) de acuerdo con los derrames que han ocurrido en Colombia en los últimos años según lo descrito por Ecopetrol (2015) [31].

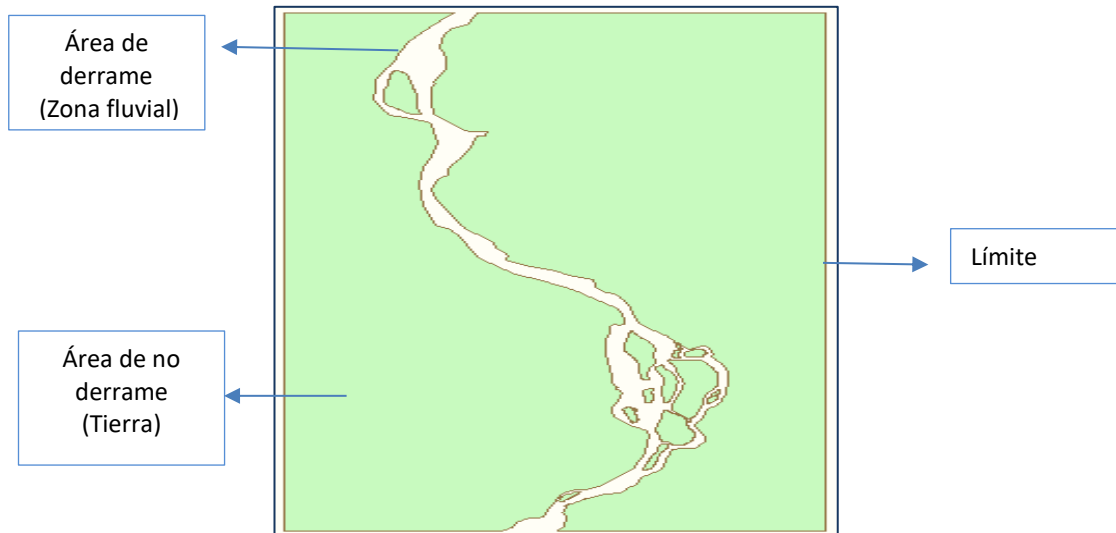
Para el cálculo del coeficiente de difusividad, también requerido por GNOME, se utilizó la ecuación planteada por Betancourt, 2001 [9], consignada en la sección 2.2. En la tabla 8 se resumen los resultados obtenidos de acuerdo con la cantidad derramada y tipo de hidrocarburo

Tabla 8. Coeficiente de difusividad según el tipo de hidrocarburo y la cantidad derramada a 28,24°C.

Hidrocarburo	API	Densidad [kg/m ³]	Coeficiente [m ² /s] (vol. 23,85 m ³)	Coeficiente [m ² /s] (vol 332,8 m ³)	Coeficiente [m ² /s] (vol 2225,8 m ³)
Diésel	37,2	829	31456,13	117504,04	303881,45
Fuel Oil # 6	14,1	959,7	14974,81	55938,24	144663,92
Medio Crudo	29,7	869,5	27429,22	102461,57	264979,58
Gasolina	57,2	626	46669,53	174333,52	450850,24
Queroseno	43	785,2	35297,81	131854,59	340993,93
Fuel Oil # 4	32	826,3	31706,41	118438,96	306299,29

4.3.1.3 Área de derrame. En GNOME, el área de derrame es representada mediante un mapa en formato. BNA. (Atlas Boundary asociado) Para obtenerlo, fue necesario procesar cartografía base del área de interés, usando el software especializado ArcGis. 10.1. En la figura 6 se puede apreciar el mapa del sector que divide las áreas de frontera en dos, el sector de tierra o no derrame (verde) y el área donde puede transitar el derrame o área de zona fluvial (Blanco).

Figura 6. Mapa Geo-referenciado en coordenadas WGS84 vista de ArcGIS 10.1.



Fuente: ArcGis

4.3.1.4 Modelo hidrodinámico para la obtención de las velocidades de corrientes. Para el caso de estudio se seleccionó el software HECRAS desarrollado por USACE (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos) [32], el cual simula los procesos de conservación de masa y de cantidad de movimiento entre dos secciones continuas del río con las ecuaciones de Saint-Venant [33], a partir de datos geométricos, régimen de flujo y de caudales. Los datos geométricos fueron realizados en ArcGis, el régimen de flujo se seleccionó estacionario y se introdujeron los caudales de la sección de Maldonado ($2,750 \text{ m}^3/\text{s}$) y Peñas blancas ($3,250 \text{ m}^3/\text{s}$) en el anexo B se da una descripción del desarrollo y obtención del modelo hidrodinámico.

4.3.1.5 Matriz de escenarios hipotéticos de derrame. El diseño de los escenarios hipotéticos de derrame se desarrolló bajo criterios de simulación estocástica, con el fin de evaluar los diferentes resultados en función de las variables de entrada. Los distintos escenarios se establecieron mediante software Statgraphics bajo el diseño experimental factorial, en la tabla 9 se resumen los factores base para el diseño de los escenarios de derrame.

Tabla 9. Factores base para el diseño de los escenarios de derrame

HIDROCARBURO		
Diésel	Queroseno	Crudo Medio
Gasolina	Fuel Oil # 4	Fuel Oil # 6
CANTIDAD DE DERRAME		
Mínimo (22,25 m ³)	Medio (332,25 m ³)	Máximo (2228,8 m ³)
DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DE LOS VIENTOS		
Hacia El Norte- 1,8 m/s- Constante	Hacia El Sur- 1,8 m/s- Constante	Variable
TIEMPO		
6 Horas	12 Horas	24 Horas
48 Horas	72 Horas	

Obteniendo un total de 54 escenarios, de los cuales 36 escenarios se realizaron variando la dirección del viento en un tiempo de 12 horas y 18 escenarios con viento variables en un tiempo de 6h, 12h, 24h, 48h y 72h de acuerdo con las condiciones específicas del ambiente y características de los derrames anteriormente establecidas. Ver anexo C, tabla C1.

Cada uno de los escenarios establecidos como resultado de la etapa anterior, fue simulado usando GNOME. A continuación, en la tabla 10 se muestra a manera de ejemplo las condiciones de entrada para el escenario 1.

Tabla 10. Condiciones de entrada para el escenario 1.

Datos De Entrada	
Tipo de crudo [°Api]	Fuel Oil # 4 (32 °Api)
Velocidad viento [m/s]	1,8 S
Cantidad derramada [m ³]	23,85
Coeficiente de difusividad [m ² /s]	31706,41

En la figura 7 se muestra la trayectoria para el escenario 1 simulado con Fuel Oil #4. Los resultados presentados corresponden a la evolución de las variables de respuesta 12 horas después de ocurrido el derrame.

Figura 7. Trayectoria de la mancha para el escenario 1.

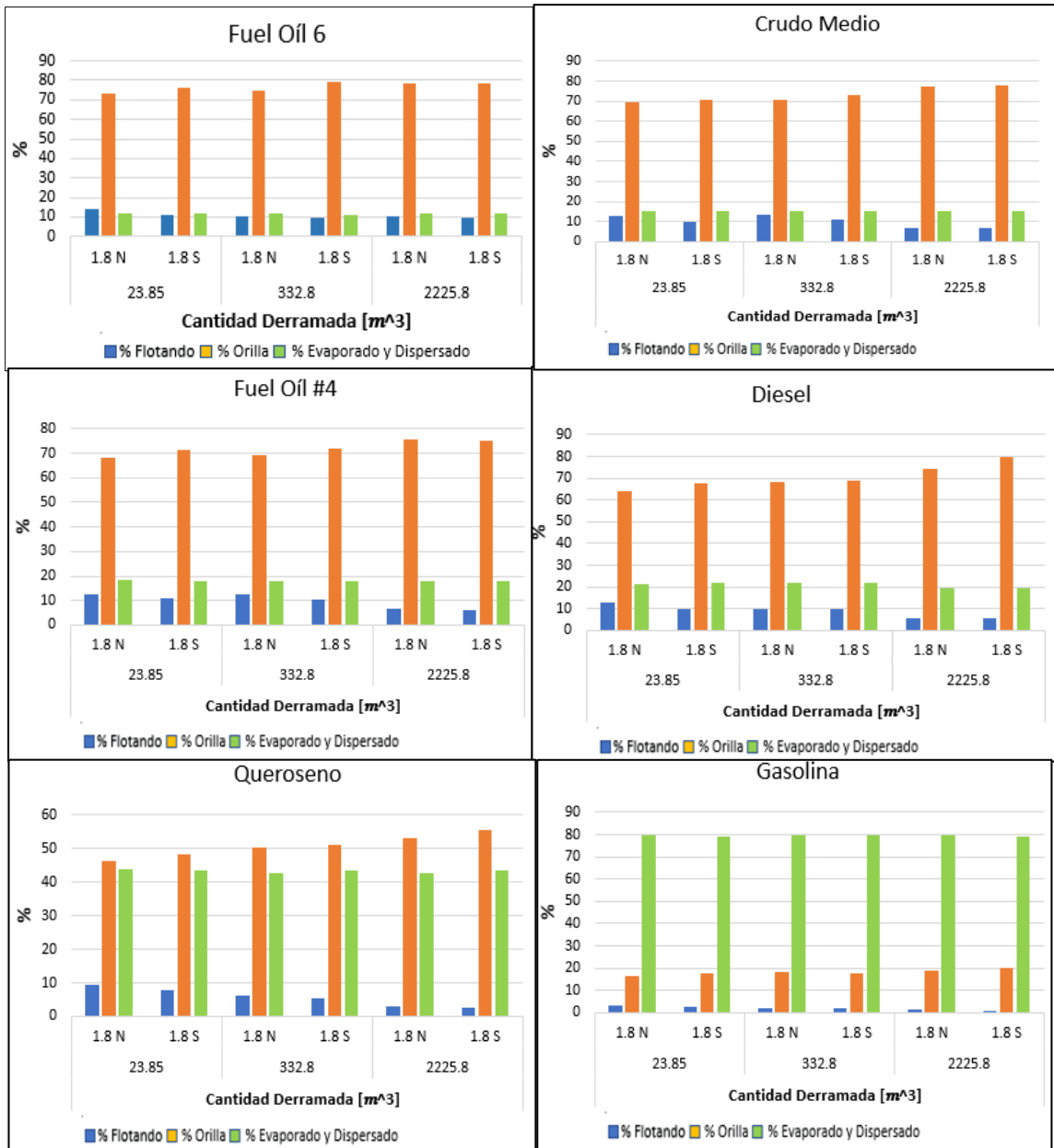


Fuente: Resultado de simulación –GNOME

En la figura 7, se puede observar que en el caso de ocurrir un escenario con las condiciones presentadas en la tabla 10. El mayor porcentaje correspondería al crudo depositado en las orillas (71,3 %), y se puede identificar que esta depositación se realizaría sobre el lado oeste del río. La cantidad de crudo que alcanza a quedar fuera del mapa, es decir, fuera del alcance de la simulación, es baja (0,1 %). La cantidad restante se distribuiría entre el porcentaje evaporado-dispersado, con un 17,70% y el porcentaje remanente en la superficie del agua, con solo el 10,90%. La mancha tendría un alcance aproximadamente de 10 kilómetros.

4.3.2 Comportamiento de la trayectoria respecto a la dirección el viento. A continuación, en la figura 8 se muestran los resultados obtenidos de GNOME para las variables de salida respecto a las variaciones de la dirección del viento y la cantidad derramada del crudo.

Figura 8. Resultados de producto Flotando, en la orilla y evaporado y dispersado con respecto a la dirección del viento y cantidad derramada.



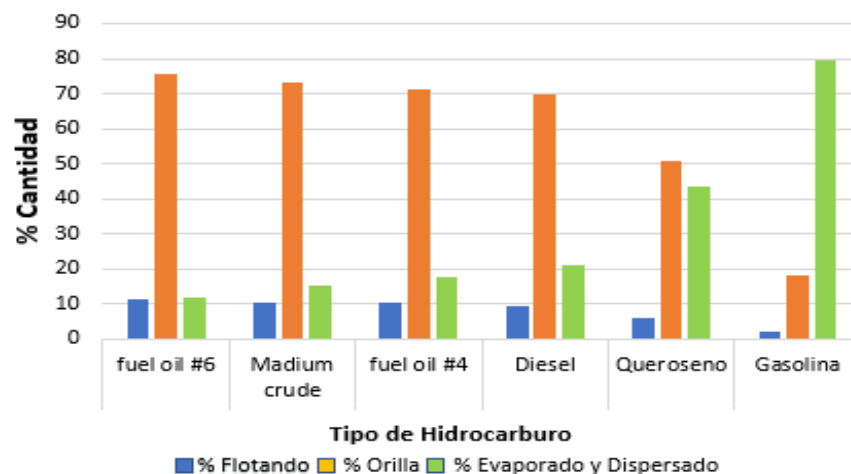
A partir de la figura 8 se puede identificar la fuerte influencia de la dirección del viento en el porcentaje de crudo que queda suspendido en la orilla. Esto se debe principalmente a que cuando un contaminante es vertido en un medio fluvial, se ve sometido al conjunto de los forzamientos advectivos de las corrientes y de los vientos, identificados en la sección 2.2 como la suma vectorial de la derivada del viento y de las corrientes, generando el arrastre de la mancha en la dirección

predominante [10] [18]. Teniendo en cuenta que la corriente de agua del río Magdalena va en dirección norte, cuando el viento tenga esta dirección el desplazamiento de la mancha será dirigido sobre la corriente de agua, favoreciendo la cantidad que permanece remanente sobre esta; de manera contraria ocurre cuando la dirección del viento se dirige hacia el sur, ya que la fuerza del viento le genera resistencia a al movimiento de la mancha, haciendo que esta se disipe y se vaya a las orillas generando mayor concentración en la rivera.

En la figura 8 también se puede observar que la dirección del viento no tiene influencia significativa sobre la cantidad evaporada-dispersada para ningún tipo de hidrocarburo. En cuanto al efecto de la cantidad derramada, es posible plantear que mantiene una relación directamente proporcional con la cantidad que queda en la orilla del río y es inversamente proporcional a la cantidad que queda suspendida. Esto se debe a que el coeficiente de difusión va directamente relacionado con la densidad del hidrocarburo y la cantidad derramada [10].

En la figura 9 se muestra el comportamiento de las variables de salida para cada tipo de crudo en condiciones de una cantidad media de derrame.

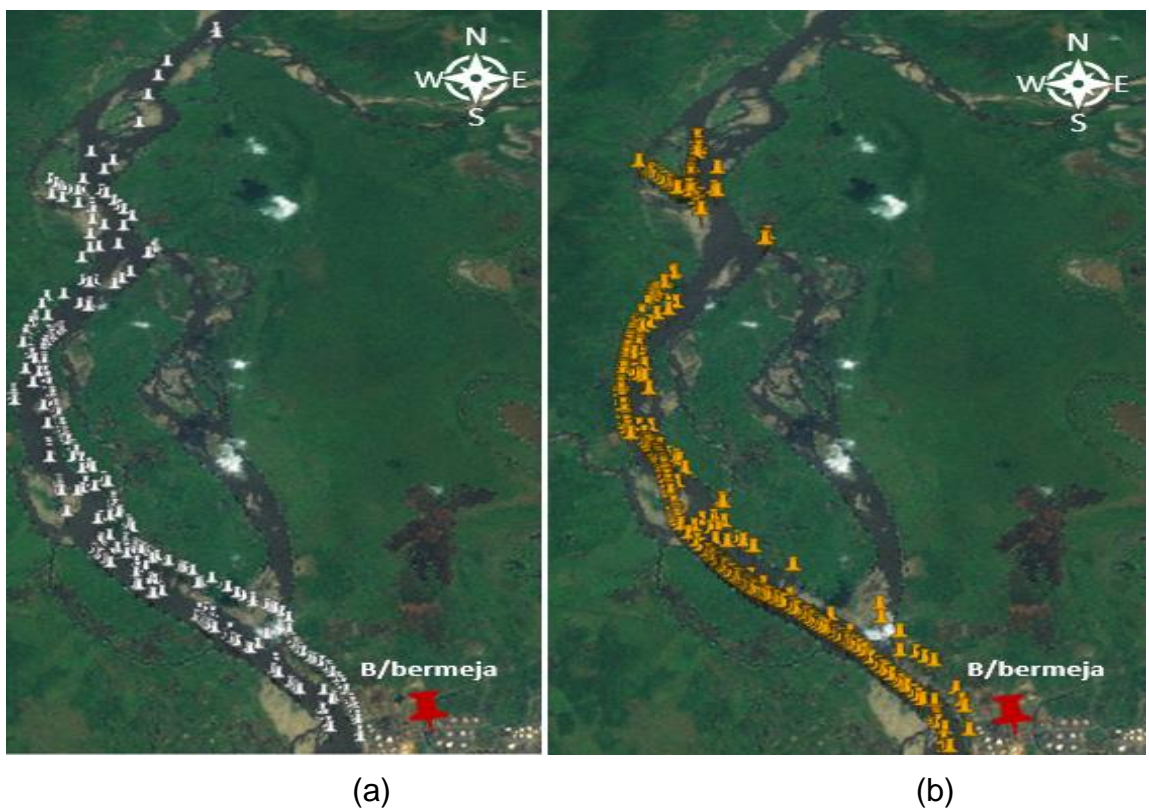
Figura 9. Comportamiento de los hidrocarburos para una cantidad de derrame media.



De la figura 9 se observa que, independientemente del tipo de crudo, los mayores porcentajes corresponden a la depositación en la rívera. Esto se debe que cuando ocurre un derrame en áreas pequeñas como los ríos, la mancha se depositara en la costa más rápidamente que cuando ocurre en áreas más grandes como los mares [18], sin embargo cuando se trata de crudos muy livianos como la gasolina los efectos de evaporación y dispersión son mayores, debido a los componentes volatiles presentes en este [18].

En la figura 10 se puede observar otro efecto de la dirección del viento en la distribución de la mancha. A manera de ejemplo los escenarios 14 y 18 en la trayectoria del Crudo medio con una cantidad derramada media ($332,5 \text{ m}^3$).

Figura 10. Efecto de la dirección del viento en la trayectoria del Crudo medio con una cantidad derramada media ($332,5 \text{ m}^3$), en (a) dirección norte y (b) dirección sur.



Fuente: ArcGis, GNOME

En la figura 10 se puede observar, que cuando la dirección del viento va a favor de la corriente (norte), la mancha tiene un mayor alcance y se depositaría en gran cantidad hacia el lado este del río, mientras que cuando la dirección del viento es hacia el sur se deposita al lado oeste, esto sucede por los forzamientos advectivos de las corrientes y de los viento anteriormente descritos en la sección 2.2 [10] [18].

En la figura 11 y 12 se puede observar que sin importar el tipo de hidrocarburo, cuando la dirección del viento está en la misma dirección de las corrientes el alcance de la mancha es mayor, mientras que la cantidad derramada es inversamente proporcional con la distancia recorrida. Esto se debe al coeficiente de difusión de los hidrocarburos. El cual, aumenta con la cantidad derramada, permitiendo una mayor dispersión de la mancha, dividiéndola en unidades más pequeñas que se dirigen a la rivera mientras que con una cantidad menor su configuración es variable o compacta haciendo que la mancha quede remanente en el río [11], cabe aclarar que con respecto a una misma cantidad derramada los crudos más pesados tendrán un mayor coeficiente de difusión.

Figura 11. Alcance de la mancha de acuerdo con la cantidad derramada, tipo de crudo y dirección del viento.

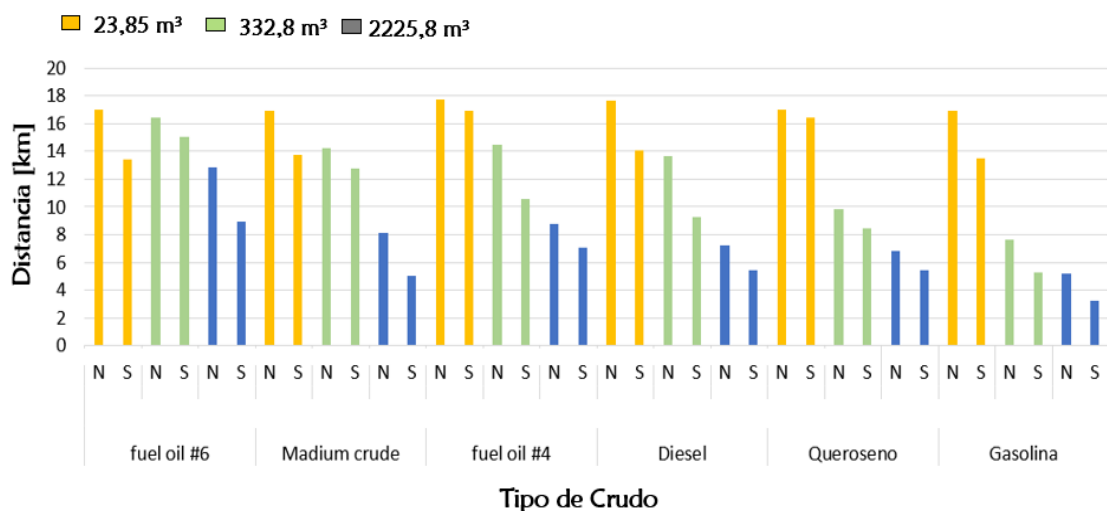
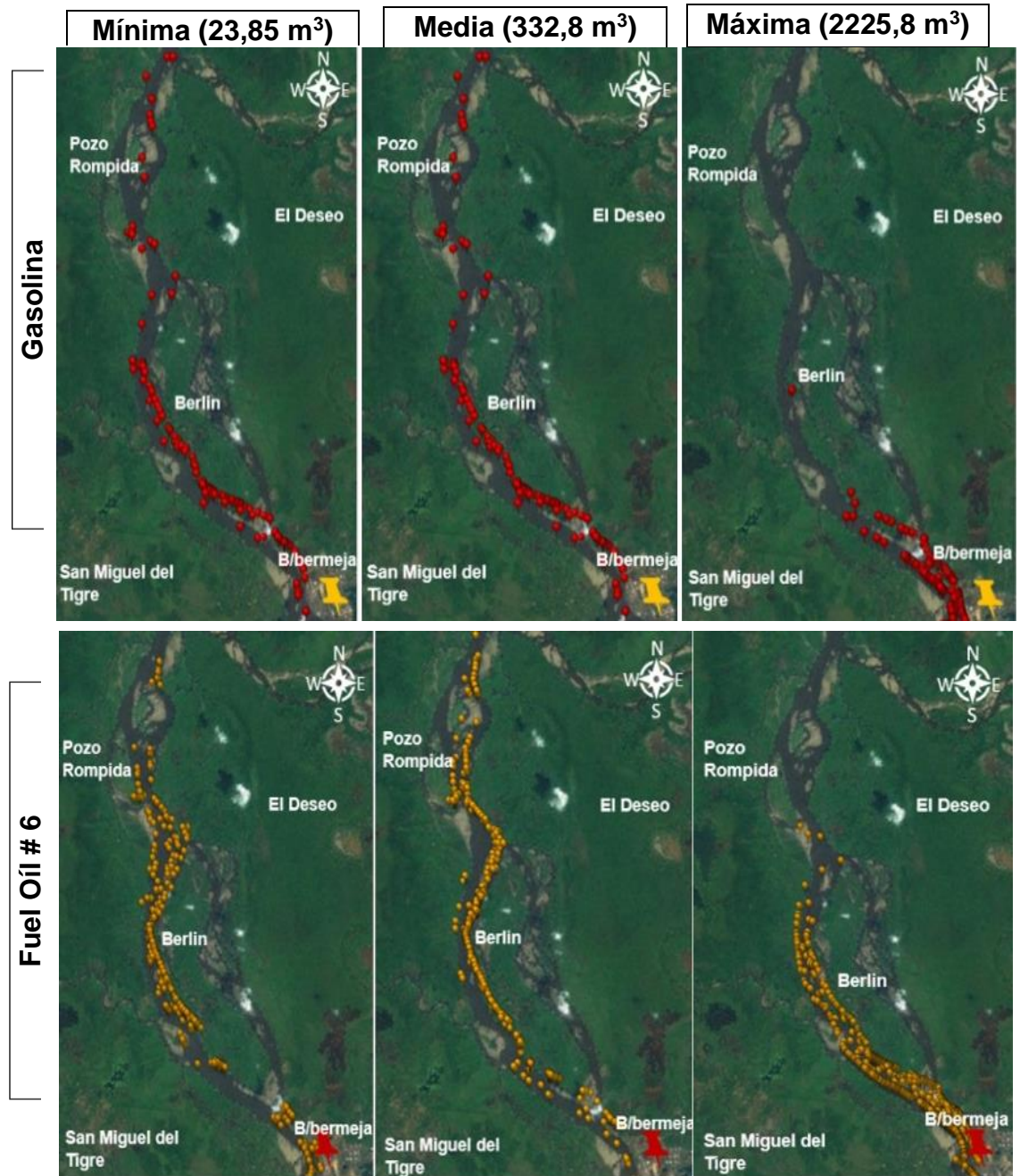


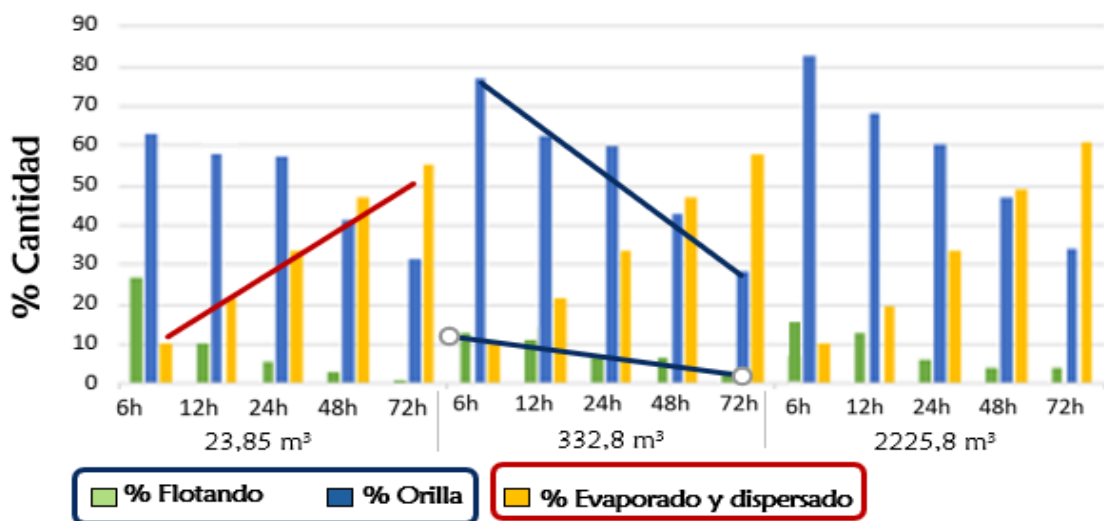
Figura 12. Trayectoria de la mancha para un crudo liviano (Gasolina) y un crudo pesado (Fuel oíl # 6) de acuerdo con la cantidad derramada.



Fuente: GNOME, ArcGis

4.3.3 Comportamiento de la trayectoria respecto al tiempo con viento variable. En la figura 13 se puede observar que para el diésel, a medida que pasa el tiempo, la evaporación y la dispersión aumentan mientras que las cantidades suspendidas y el porcentaje en las orillas durante las primeras 12 horas disminuyen, lo cual se debe posiblemente a que en el tiempo los procesos de degradación determinan la distribución de la mancha y estos son los únicos procesos de degradación que tiene GNOME [29] . También se puede observar que en el tiempo a mayor cantidad derramada mayor depositación en la rivera y a menor cantidad derramada mayor evaporación; este mismo efecto se observó para los demás hidrocarburos ver anexo D.

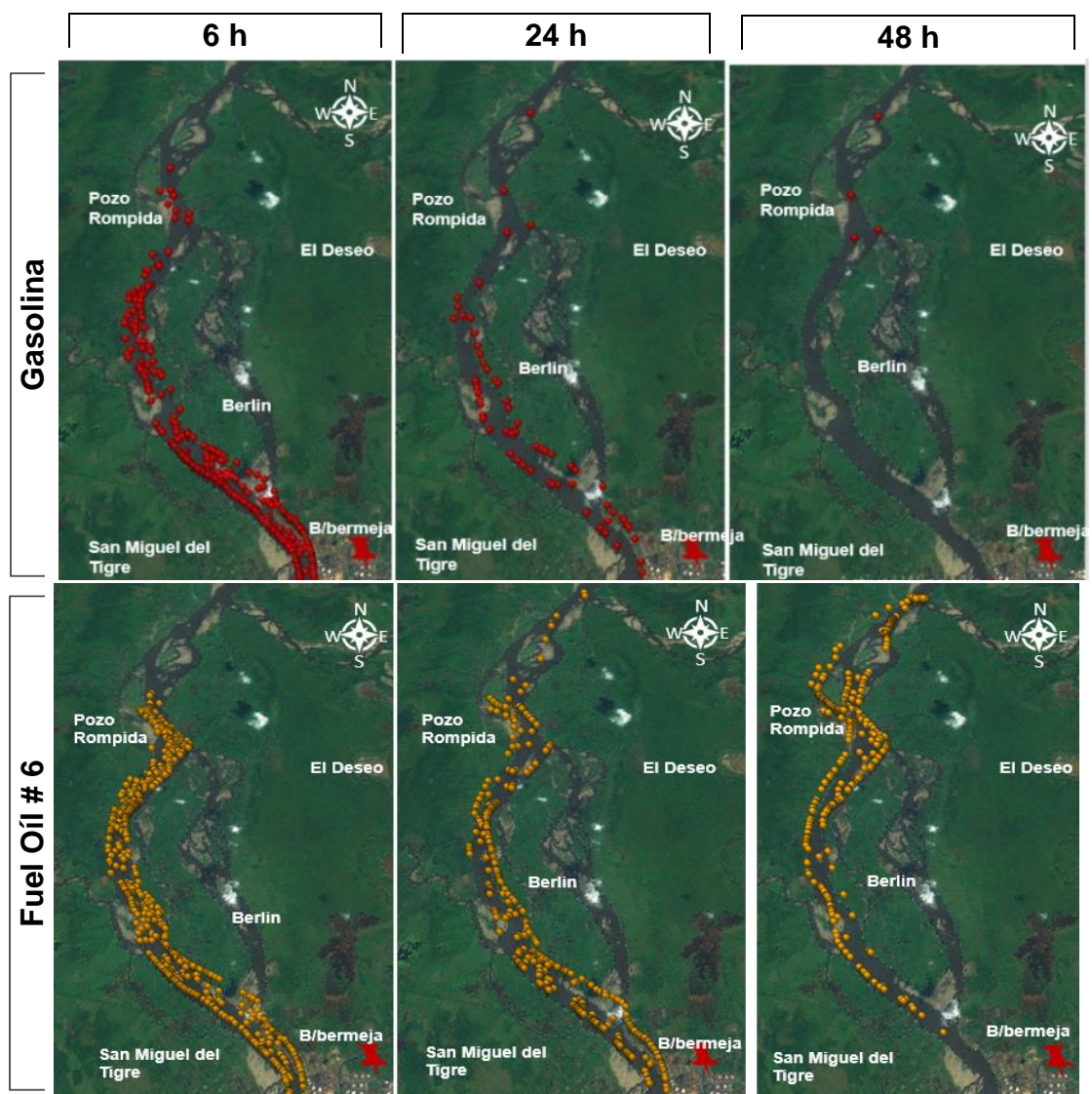
Figura 13. Efecto del tiempo para el hidrocarburo Diésel en % de flotabilidad, % en orillas, % evaporada-dispersada para una cantidad de derrame mínima, media y máxima



En la figura 14 se muestra la trayectoria de la mancha en el tiempo para un crudo pesado (Fuel oil 6) y un crudo liviano (Gasolina) para una cantidad de derrame medio (332,5 m³). Se puede apreciar que para las primeras 24 horas la mancha alcanza a tener un alcance de hasta 18 km y, que luego de tres días mantiene el mismo alcance, pero con una menor concentración de derrame. La disminución de la concentración puede ser atribuida a las pérdidas de crudo debidas a la evaporación y la dispersión [38].

También se puede notar que para después del primer día las zonas más afectadas para el control y remediación de derrames, son los sectores de Berlín y el deseo (parte derecha alta del mapa), estos sectores son los de mayor sensibilidad ante este tipo de accidentes, por lo que crudos pesados pueden permanecer hasta semanas presentando daños para el medio ambiente y alrededores [24].

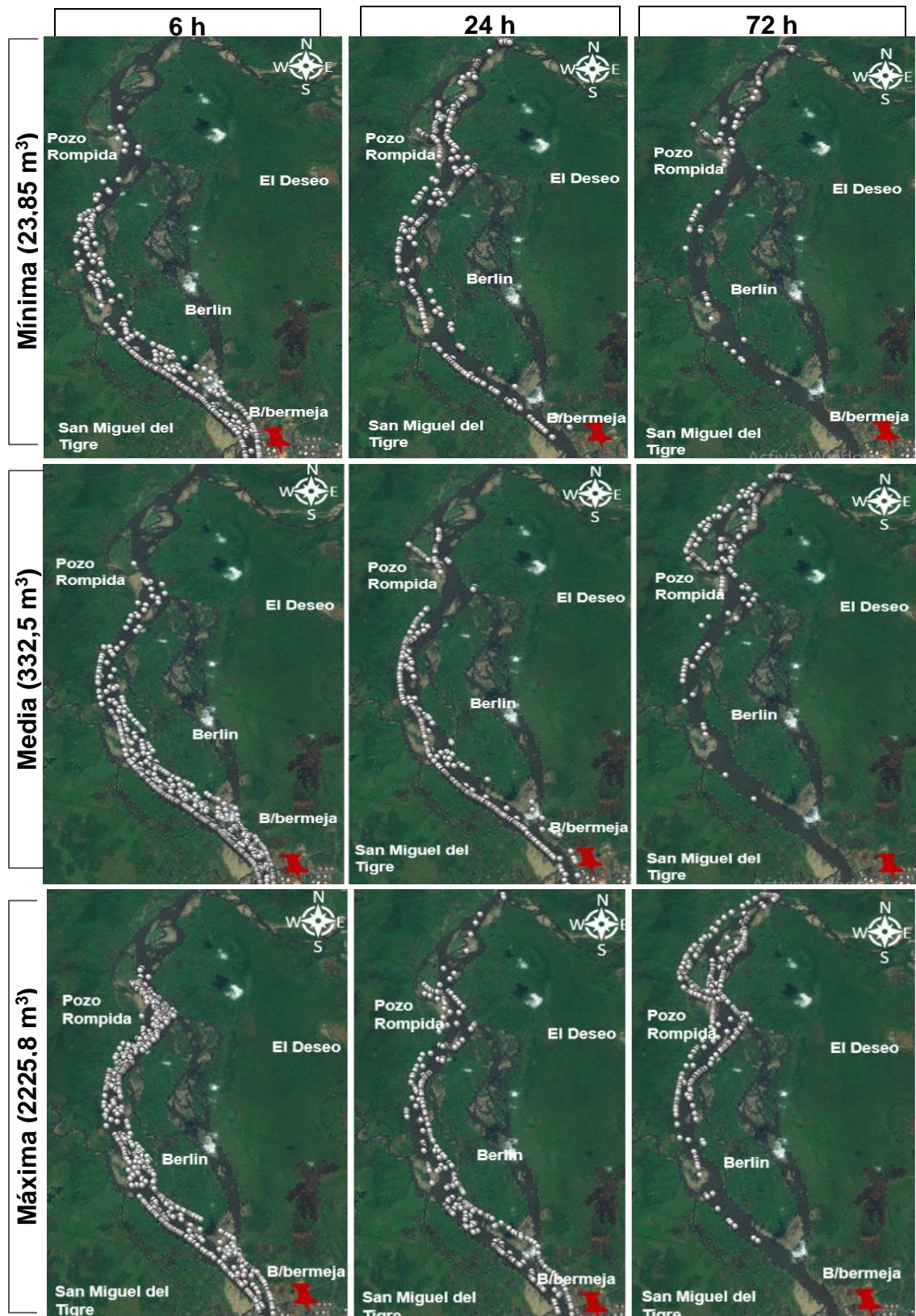
Figura 14. Trayectoria de la mancha en el tiempo para un crudo pesado (Fuel oil 6) y un crudo liviano (Gasolina) para una cantidad de derrame medio (332,5 m³).



Fuente: GNOME, ArcGis

En la figura 15 se presenta la variación de la trayectoria respecto a una cantidad de derrame mínima (23,85 m³), una cantidad de derrame media (332,8 m³) y una cantidad de derrame máxima (2225,8 m³) del diésel. Se puede apreciar que la cantidad de derrame mínimo, transcurridas las 72 horas, es la que presenta menor cantidad de concentración de derrame sobre el río, mientras que la cantidad de derrame máximo y medio presentan un recorrido más lento, esparciéndose hacia las orillas y afectando las zonas aledañas.

Figura 15. Variación de la trayectoria respecto a una cantidad de derrame mínima ($23,85 \text{ m}^3$), una cantidad de derrame media ($332,5 \text{ m}^3$) y una cantidad de derrame máxima ($2225,8 \text{ m}^3$) del Diésel.



Fuente: GNOME, ArcGis

4. CONCLUSIONES

- Mediante literatura se identificaron que las condiciones del lugar (dirección-velocidad de vientos, oleajes, corrientes), las propiedades de los hidrocarburos (composición, coeficiente de transferencia de masa) y las condiciones del derrame (volumen, tipo de derrame) son las características más relevantes e influyentes para la trayectoria de un derrame de hidrocarburos.
- La selección del software se fundamentó en caracterizar y entrelazar las condiciones de entorno base, para el análisis de trayectoria en un cuerpo de agua dulce. GNOME se perfila como una herramienta útil para la predicción del movimiento y destino final de la mancha en Colombia, puesto que además de ser de un software de libre acceso, evalúa las principales características que influyen en el desplazamiento de la mancha de hidrocarburos según los autores consultados obteniendo resultados coherentes.
- El análisis del comportamiento de los hidrocarburos sobre el río Magdalena evidencio que la dirección del viento, el tipo de crudo y la cantidad derramada serían las características de mayor influencia en el alcance de la mancha de hidrocarburos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a el lector realizar una integración con otro software que contemple los procesos de degradación con el fin de obtener mejores estimaciones de la distribución de la mancha en el sector fluvial.
- si el objetivo es realizar un modelado completo del rio magdalena, se recomienda realizar estudios sobre la topografía del cauce, mediciones meteorológicas y hidrológicas en diferentes estaciones del año, ya que los datos requeridos por el proyecto provienen de datos históricos, y en algunos casos, estos datos son de hace más de 10 años, lo cual puede generar una mayor incertidumbre en el momento de determinar trayectoria de la mancha [34].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SOARES, Ivan Dias; ALVES, Fernando y PIOVESAN, Rodrigo. Simulação da dispersão de óleo na bacia de Santos: 3° Congreso do Brasil, P&D em petróleo e gás, 2004. p. 1–7.
- [2] MIRANDA, Dario y RESTREPO, Ricardo. Los derrames de petróleo en ecosistemas tropicales - Impactos, consecuencias y prevención: La experiencia de Colombia, vol. 1, 2005. p. 5.
- [3] RUBIO, Andrés. Navegabilidad por el río Magdalena y los planes expansivos de transporte de carga: Expo oil and gas, 2014. p. 2-3.
- [4] VIATCHESLAV, Kafarov, et al. Analysis of the Behaviour of Oil Spills in a Sector of the Magdalena River (Colombia): Chemical Engineering Transactions, vol. 57, 2017. p. 349–354.
- [5] YAPA, Poojitha. et al. A Mathematical Model for Oil Slick Transport and Mixing in Rivers: Special Report, vol. 2401, 1993. p. 71.
- [6] PARREIRA, Vanesa. Modelagem da trajetória da pluma de óleo para derramamentos na região do porto de tubarão: Universidade Federal do Espírito Santo. Brasil, 2008. p. 11-26
- [7] YAPA, Poojitha; SHEN Hung y ANGAMMANA, Keerthisri. Modeling oil spills in a river-lake system: Journal of Marine Systems. vol. 4. 1994. p. 453–471.
- [8] TRENTO, Alfredo y ÁLVAREZ, Ana. Simulación del derrame de petróleo en un escenario fluvial: Universidad Nacional del Litoral. Argentina, vol XXXII. 2013. p. 2825–2835.

- [9] ZAPATA, Carmen; CALLE, Edgar y PARRA, Luis. Simulación del comportamiento fisicoquímico de derrames de hidrocarburos en ríos: Universidad Nacional de Colombia. vol. 9. 2002. p. 7-17
- [10] MARZIALETTI, Pablo . Monitoreo de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua mediante técnicas de sensado remoto: Universidad Nacional de Córdoba. 2011. p. 128-141.
- [11] BETANCOURT, Fabian. Modelado numérico de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua: Universidad Nacional Autónoma de México. 2001. p. 6-44.
- [12] REED, Mark, et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art: Spill Science and Technology Bulletin. vol. 5. 1999. p. 3–16.
- [13] FAY, James. Physical processes in the spread of oil on a water surface: Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts. 1971. p. 463–468.
- [14] IBARRA, Diana, et al. Methodological proposal for evaluation of oil spills environmental vulnerability in rivers: International oil Spill Conference. 2017. p. 5.
- [15] BETANCUR, Alfonso. Metodología para la Selección de Modelos Hidrodinámicos Tridimensionales: Universidad Nacional de Colombia. 2013. p. 7-16.
- [16] ALVAREZ, Antonio. Modelado y control de un canal hidráulico: Universidad de Sevilla, España. 2012. p. 6-19.
- [17] NIÑO, Yarco. Ecuaciones diferenciales de flujo y transporte en aguas superficiales: Universidad de Chile. 2002. p. 1-15.

- [18] SIGUERO GUEMES, Augusto. Modelado numérico del comportamiento de los vertidos de hidrocarburos vertidos al mar PhD Thesis. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. 2010 , p. 19-57.
- [19] LEE, Caitlyn. Oil spill modeling software: benefits, requirements & recommendations: Universidad de Columbia Británica, Vancouver, Canadá. 2013. p. 8-14.
- [20] MARÍN JARRÍN, María José y CHANG GÓMEZ, José. Simulación de un derrame de hidrocarburos en el puerto pesquero de santa rosa del canton salinas: Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. 2011. p.1-9.
- [21] GALT, J. The integration of trajectory models and analysis into spill response information systems: Spill Science and Technology Bulletin. vol. 4. no. 2. 1997. p. 123–129.
- [22] FINGAS, Merv y HOLLEBONE, Bruce. Review of behaviour of oil in freezing environments: Elsevier. vol. 47, 2003. p. 333–340.
- [23] FAY, James. The spread of oil slicks on a calm sea: Springer Science-Business Media, New York. 1969. p. 53–54.
- [24] SILOS, Jose. Manual de Lucha Contra la Contaminación de Hidrocarburos: Universidad de Cádiz, España. 2008. p. 81-200.
- [25] WANG, Shou, et al. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas: Elsevier vol. 35, no. 5–6, 2008. p. 503–510.
- [26] YAPA, Poojitha D; SHEN Hung T. y ANGAMMANA, Keerthisri. An integrated computer model for simulating oil spills in the UPPER St. Lawrence river: Journal of Great Lakes Research. vol. 18, no. 2. 1992. p.

340–351.

- [27] BEEGLE KRAUSE, Cynthia Juyne. General noaa oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model: International oil spill conference proceedings. vol. 2. 2001. p. 865–871.
- [28] DEPARTMENT OF COMMERCE National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Ocean Service Office of Response and Restoration. General operacionales NOAA Modeling Environment GNOME Documentación técnica. Seattle, Washington. 2012 . p. 6-45.
- [29] JIMENEZ, Dario. Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estuarina, aledaña al terminal de ecopetrol en tumaco diana: Universidad de la Salle, Bogotá, D.C. 2006. p. 100-169.
- [30] ECOPETROL, “Boletín Informativo,” 2015 . [En línea]. Enero 15 del 2017. Disponible en <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es>.
- [31] CARVAJAL ORTIZ, Luis Henry. y GUTIERREZ, Fredy. Aspectos técnicos sobre derrames de crudo: Universidad Industria de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2005. p. 33-41.
- [32] BLADÉ, Ernest; CEA, Luis y CORESTEIN, Georgina. Numerical modelling of river inundations: Ingeniería del agua, Universidad de Coruña, Barcelona, España vol. 18, no. 1. 2014. p. 72-81.
- [33] NANIA, Leonardo y MOLERO, Emilio. Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRas 3.1.1: Universidad de Granada. 2007. p. 7-20.
- [34] DEPARTMENT OF COMMERCE National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Ocean Service Office of Response and

Restoration. Manual de análisis de trayectorias. Seattle, Washington. 2001 p. 1–42.

- [35] TORRES, Ernesto y GONZALES, Eulises. Aplicación del modelo de simulación hidráulica para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río bogota-sector alicachin: Universidad Libre, Bogota D.C. 2008. p. 3-5
- [36] CORMAGDALENA. Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena. [En línea]. Febrero 15 de 2017. Disponible en <http://www.cormagdalena.gov.co/>.
- [37] SANTOS, Ana Carolina; CUBILLOS, Carlos Eduardo, y VARGAS, Andres Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS: Universidad Nacional de Colombia. vol. 17. 2008. p. 43–54.
- [38] MCCOOL, Michael. Tutorial, Creating a regular grid for point sampling Tutorial: Software and Services. Santa Clara, California. 2012. p. 1–5.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ, Antonio. Modelado y control de un canal hidráulico: Universidad de Sevilla, España. 2012. p. 6-19.
- BEEGLE KRAUSE, Cynthia Juyne. General noaa oil modeling environment (GNOME): a new spill trajectory model: International oil spill conference proceedings. vol. 2. 2001. p. 865–871.
- BETANCOURT, Fabian. Modelado numérico de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua: Universidad Nacional Autónoma de México. 2001. p. 6-44.
- BETANCUR, Alfonso. Metodología para la Selección de Modelos Hidrodinámicos Tridimensionales: Universidad Nacional de Colombia. 2013. p. 7-16.
- BLADÉ, Ernest; CEA, Luis y CORESTEIN, Georgina. Numerical modelling of river inundations: Ingeniería del agua, Universidad de Coruña, Barcelona, España vol. 18, no. 1. 2014. p. 72-81.
- CARVAJAL ORTIZ, Luis Henry. y GUTIERREZ, Fredy. Aspectos técnicos sobre derrames de crudo: Universidad Industria de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2005. p. 33-41.
- CORMAGDALENA. Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena. [En línea]. Febrero 15 de 2017. Disponible en <http://www.cormagdalena.gov.co/>.
- DEPARTMENT OF COMMERCE National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Ocean Service Office of Response and Restoration. General operacionales NOAA Modeling Environment GNOME

Documentación técnica. Seattle, Washington. 2012 . p. 6-45.

DEPARTMENT OF COMMERCE National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Ocean Service Office of Response and Restoration. Manual de análisis de trayectorias. Seattle, Washington. 2001 p. 1–42.

ECOPETROL, “Boletín Informativo,” 2015 . [En línea]. Enero 15 del 2017. Disponible en <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es>.

FAY, James. Physical processes in the spread of oil on a water surface: Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts. 1971. p. 463–468.

FAY, James. The spread of oil slicks on a calm sea: Springer Science-Business Media, New York. 1969. p. 53–54.

FINGAS, Merv y HOLLEBONE, Bruce. Review of behaviour of oil in freezing environments: Elsevier. vol. 47, 2003. p. 333–340.

GALT, J. The integration of trajectory models and analysis into spill response information systems: Spill Science and Technology Bulletin. vol. 4. no. 2. 1997. p. 123–129.

IBARRA, Diana, et al. Methodological proposal for evaluation of oil spills environmental vulnerability in rivers: International oil Spill Conference. 2017. p. 5.

JIMENEZ, Dario. Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estuarina, aledaña al terminal de ecopetrol en tumaco diana: Universidad de la Salle, Bogotá, D.C. 2006. p. 100-169.

LEE, Caitlyn. Oil spill modeling software: benefits, requirements &

recommendations: Universidad de Columbia Británica, Vancouver, Canadá. 2013. p. 8-14.

MARÍN JARRÍN, María José y CHANG GÓMEZ, José. Simulación de un derrame de hidrocarburos en el puerto pesquero de santa rosa del canton salinas: Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. 2011. p.1-9.

MARZIALETTI, Pablo . Monitoreo de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua mediante técnicas de sensado remoto: Universidad Nacional de Córdoba. 2011. p. 128-141.

MCCOOL, Michael. Tutorial, Creating a regular grid for point sampling Tutorial: Software and Services. Santa Clara, California. 2012. p. 1–5.

MIRANDA, Dario y RESTREPO, Ricardo. Los derrames de petróleo en ecosistemas tropicales - Impactos, consecuencias y prevención: La experiencia de Colombia, vol. 1, 2005. p. 5.

NANIA, Leonardo y MOLERO, Emilio. Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRas 3.1.1: Universidad de Granada. 2007. p. 7-20.

NIÑO, Yarco. Ecuaciones diferenciales de flujo y transporte en aguas superficiales: Universidad de Chile. 2002. p. 1-15.

PARREIRA, Vanesa. Modelagem da trajetória da pluma de óleo para derramamentos na região do porto de tubarao: Universidade Federal do Espírito Santo. Brasil, 2008. p. 11-26

REED, Mark, et al. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art: Spill Science and Technology Bulletin. vol. 5. 1999. p. 3–16.

- RUBIO, Andrés. Navegabilidad por el río Magdalena y los planes expansivos de transporte de carga: Expo oil and gas, 2014. p. 2-3.
- SANTOS, Ana Carolina; CUBILLOS, Carlos Eduardo, y VARGAS, Andres Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS: Universidad Nacional de Colombia. vol. 17. 2008. p. 43–54.
- SIGUERO GUEMES, Augusto. Modelado numérico del comportamiento de los vertidos de hidrocarburos vertidos al mar PhD Thesis. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. 2010 , p. 19-57.
- SILOS, Jose. Manual de Lucha Contra la Contaminación de Hidrocarburos: Universidad de Cádiz, España. 2008. p. 81-200.
- SOARES, Ivan Dias; ALVES, Fernando y PIOVESAN, Rodrigo. Simulação da dispersão de óleo na bacia de Santos: 3º Congresso do Brasil, P&D em petróleo e gás, 2004. p. 1–7.
- TRENTO, Alfredo y ÁLVAREZ, Ana. Simulación del derrame de petróleo en un escenario fluvial: Universidad Nacional del Litoral. Argentina, vol XXXII. 2013. p. 2825–2835.
- TORRES, Ernesto y GONZALES, Eulises. Aplicación del modelo de simulación hidráulica para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río bogota-sector alicachin: Universidad Libre, Bogota D.C. 2008. p. 3-5
- VIATCHESLAV, Kafarov, et al. Analysis of the Behaviour of Oil Spills in a Sector of the Magdalena River (Colombia): Chemical Engineering Transactions, vol. 57, 2017. p. 349–354.

WANG, Shou, et al. Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas: Elsevier vol. 35, no. 5–6, 2008. p. 503–510.

YAPA, Poojitha D; SHEN Hung T. y ANGAMMANA, Keerthisri. An integrated computer model for simulating oil spills in the UPPER St. Lawrence river: Journal of Great Lakes Research. vol. 18, no. 2. 1992. p. 340–351.

YAPA, Poojitha. et al. A Mathematical Model for Oil Slick Transport and Mixing in Rivers: Special Report, vol. 2401, 1993. p. 71.

YAPA, Poojitha; SHEN Hung y ANGAMMANA, Keerthisri. Modeling oil spills in a river-lake system: Journal of Marine Systems. vol. 4. 1994. p. 453–471.

ZAPATA, Carmen; CALLE, Edgar y PARRA, Luis. Simulación del comportamiento fisicoquímico de derrames de hidrocarburos en ríos: Universidad Nacional de Colombia. vol. 9. 2002. p. 7-17

ANEXOS

ANEXO A. DATOS DEL ALGORITMO

Tabla A. 1 Tipos de contaminantes, su composición por defecto y vida media de GNOME

Tipo de Contaminante	Cantidad porcentual [%]	Vida media (horas)	Tiempo límite de observación (horas)
Gasolina	50,0	0,12	18,55
	50,0	5,3	18,55
	0,0	1,0×10 ⁹	18,55
Queroseno y combustible para reactores	35,0	5,3	50,44
	50,0	14,4	50,44
	15,0	69,2	50,44
Diesel	30,0	14,4	170,1
	45,0	48,6	170,1
	25,0	243,0	170,1
Fuel Oil # 4	24,0	14,4	170,1
	37,0	48,6	170,1
	39,0	1,0×10 ⁹	170,1
Medio Crudo	22,0	14,4	170,1
	26,0	48,6	170,1
	52,0	1,0×10 ⁹	170,1
Fuel Oil # 6	20,0	14,4	170,1
	15,0	48,6	170,1
	65,0	1,0×10 ⁹	170,1

Fuente: NOAA 2012 [28]

ANEXO B. SELECCIÓN DE VALORES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

- Datos Hidrológicos

Figura B 1. Histograma de Caudales medios Maldonado

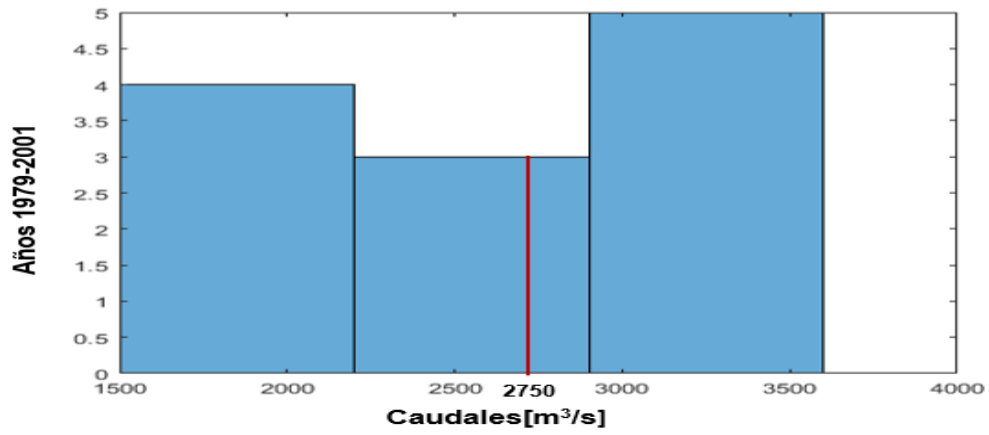
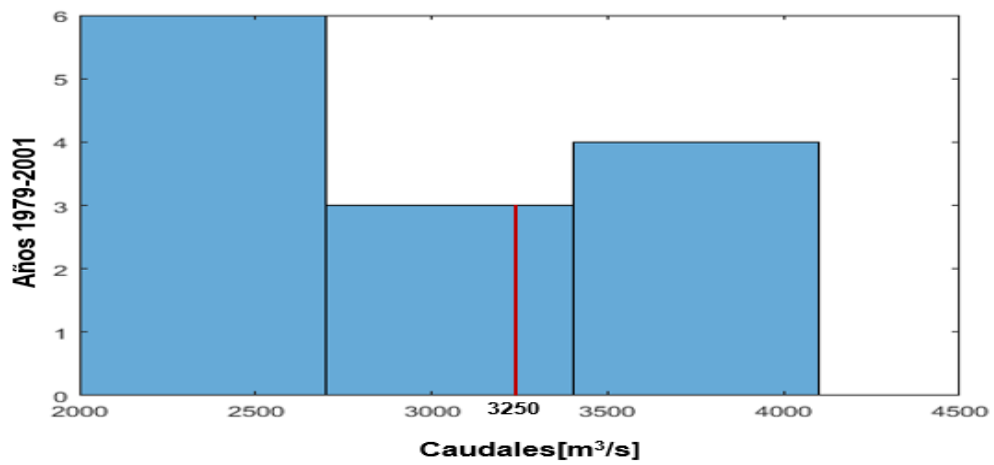
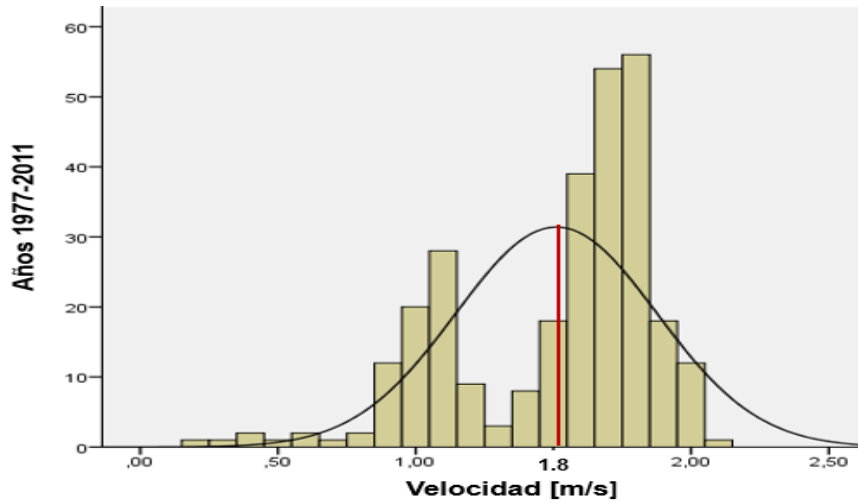


Figura B 2. Histograma de Caudales medios Peñas Blancas



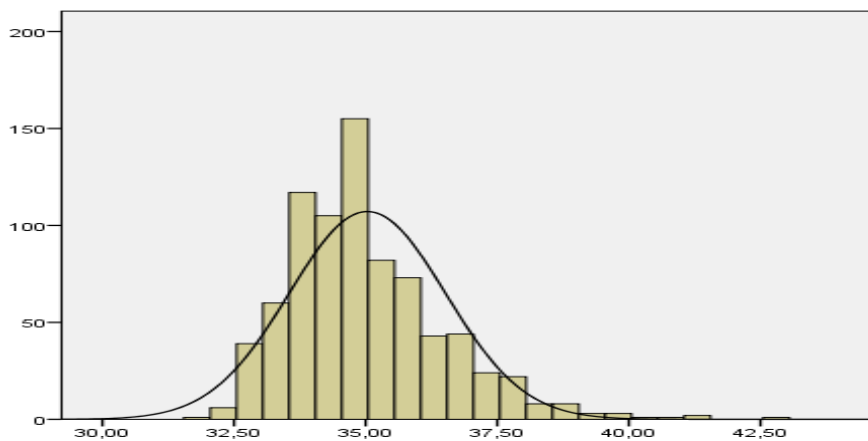
- Datos Meteorológicos

Figura B3. Histograma para velocidades del viento Constante, Estación Yariguies



Estos datos no se pueden considerar como gaussianos, no se recomienda usar la media y la desviación como descriptores, se recomienda usar el valor esperado, o más probable = 1,8 m/s

Figura B 4. Temperatura [°C] del Aeropuerto de Yariguies (1943-2016)



- Datos de derrame en Colombia

Tabla B. 1 Derrames en Colombia

Año	Cantidad Derramada	Departamento	Municipio	Zona	Causa
1994	800	Arauca	Arauquita	kilómetro 43 Brasilia	ELN
1995	10000	Cesar	La Gloria	Río Simaña	ELN
1995	3000	Norte de Santander	Teorama	Río Catatumbo	ELN
2003	7000	Norte de Santander	Guamalito	arroyo Cimitarra	FARC
1995	500	Santander	B/bermeja	Poliducto Barranca	ELN
1995	150	Santander	B/bermeja	Ref Barranca, sector de Campo 38	ELN
1995	14000	Norte de Santander	San Pablo	Río Ité afluente del Cimitarra	ELN

Fuente: los datos de los derrames ocurridos en Colombia fueron obtenidos de Carvajal Ortiz and Jara Gutierrez 2005 [31].

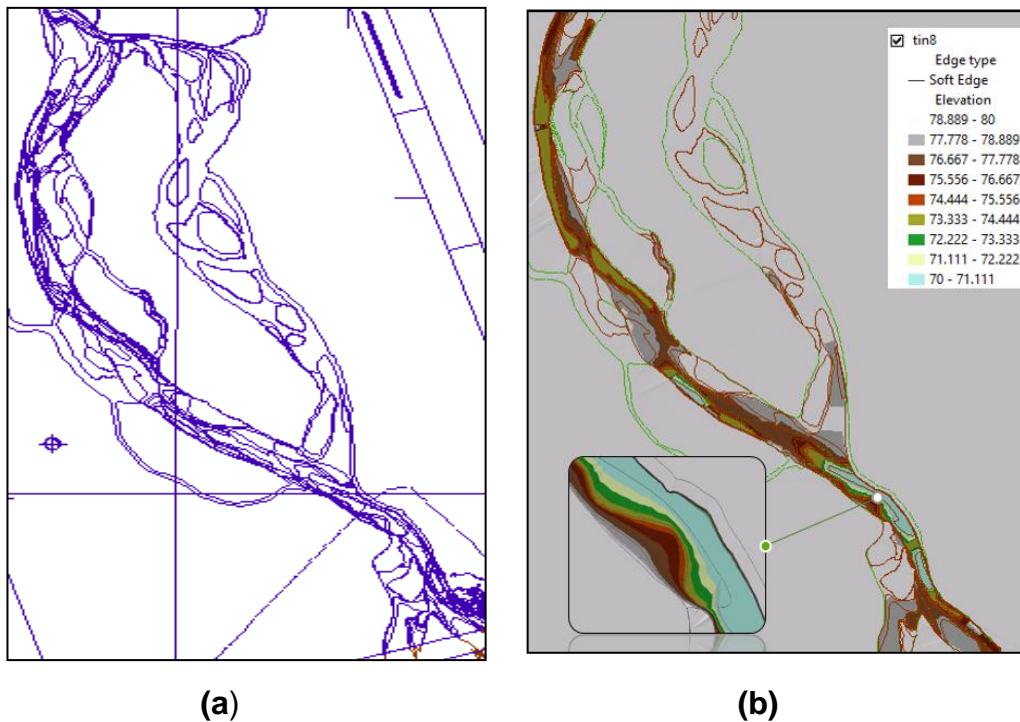
- Desarrollo y obtención del modelo hidrodinámico en HEC-RAS 4.0

La creación del modelo hidrodinámico se realizó en base a Nania y Molero, (2007) [33], la cual se constituye principalmente en tres pasos [35].

Paso 1

El Primer paso consistió en la creación del modelo Digital de Elevación (DEM o TIN) en ArcGIS 10.1 [35], El cual se construyó a partir de las batimetrías obtenidas del estudio de navegabilidad del río Magdalena [36] en la figura B.5 (a) se puede observar las curvas de nivel de la zona.

Figura B.5 (a) Curvas de nivel obtenidas de CORMAGDALENA (2002);
(b) Modelo digital de elevación TIN

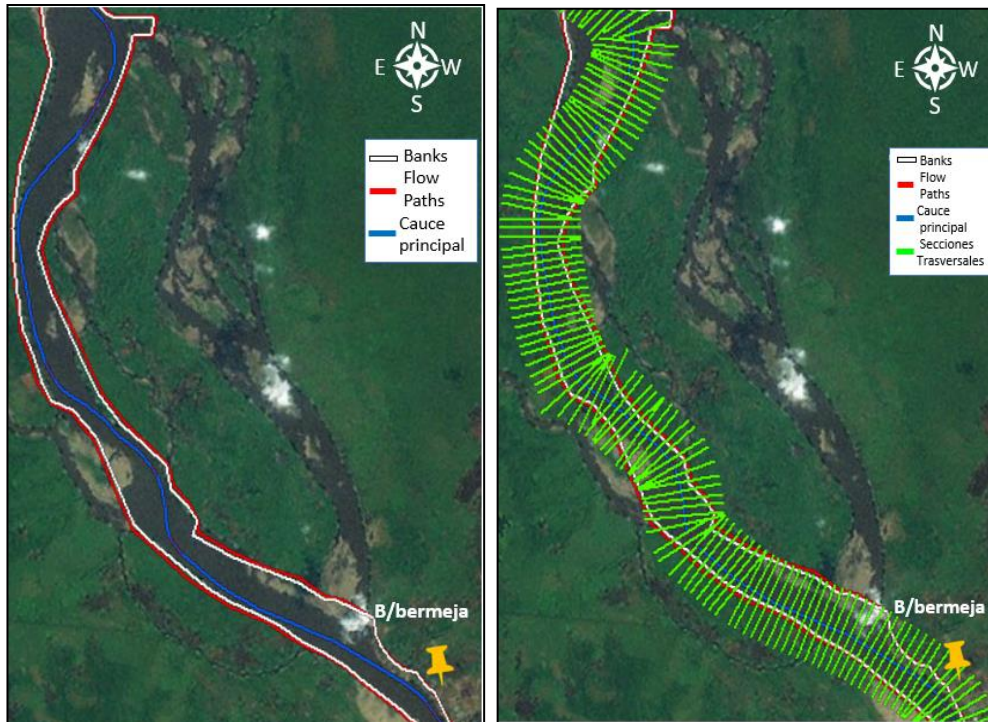


Fuente: ArcGis 10,1

Después de tener las curvas de nivel se creó la TIN-DEM con las profundidades y niveles de la zona a evaluar [35] (ver figura B.5 (b)), con esto se procedió a establecer el contorno del área de estudio con una extensión de la línea del río de unos 33 km aproximadamente, con la herramienta de extensión de HECRAS para ArcGis, llamada Hec-GeoRas.

Teniendo el contorno del río se trazó la línea del cauce principal; los Banks (límite donde transita el agua sin inundación), los Flow Paths (límites de inundación que podría llegar a tener el río Magdalena) y las secciones transversales [35] cada 100 m, conforme al canal navegable determinado a partir de CORMAGDALENA, (2002) [36], desde la estación Maldonado hasta Peñas Blancas para un total de 330 secciones. Posteriormente se exportó este archivo por medio de Hec-Georas obteniendo un formato .jpg compatible con Hecras, ver figura B.6.

Figura B 6. Imagen de la geometría del sector de estudio, Banks, Flow Paths y las secciones transversales

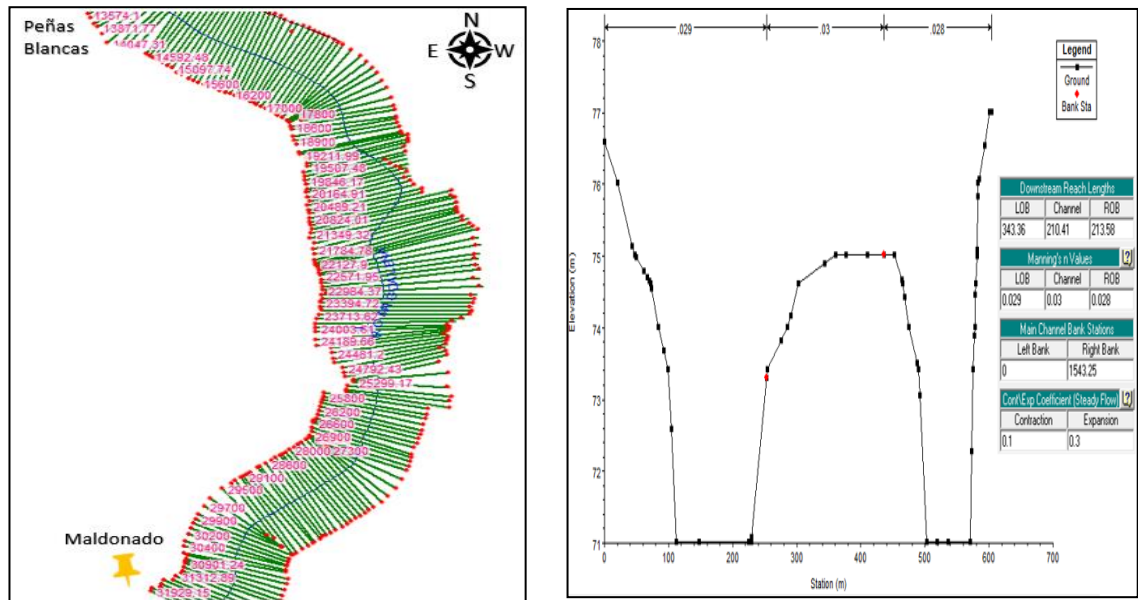


Fuente: ArcGis 10,1

Paso 2

A partir del archivo .jpr se procedió el desarrollo del modelo hidrodinámico en Hec-Ras donde se estableció el coeficiente de fricción (coeficiente de manning) y la pendiente del río [35]. La pendiente se obtuvo de las batimetrías desde las estaciones de Maldonado y Peñas Blancas, con el valor de 0,01 respecto a la siguiente sección. El coeficiente de fricción se tomó de los estudios realizados por Santos, 2008 [37] para el Canal del Dique, perteneciente al río Magdalena. estableciendo el valor de 0,029 para el lado izquierdo del río, 0.03 para el centro del río y 0.028 para el lado derecho del río [37], ver figura B.7 (a), (b).

Figura B 7. (a) Datos de geometría exportado de ArcGIS vista general , **(b)** Vista de una sección transversal en Hecras con los valores del coeficiente de manning y la pendiente.



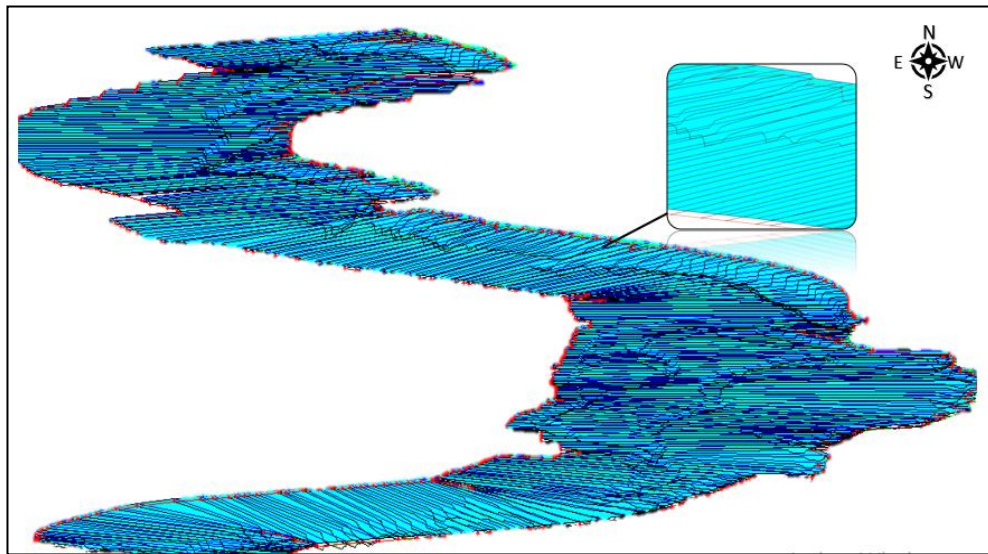
(a)

(b)

Fuente: HeCras 4,1

Después de tener todos los datos necesarios se procedió a correr el programa HECRAS obteniendo el modelo Hidrodinámico. En la figura B.8 se aprecia la vista de inundación por el trazado del río, el color azul se refiere a la cantidad de agua.

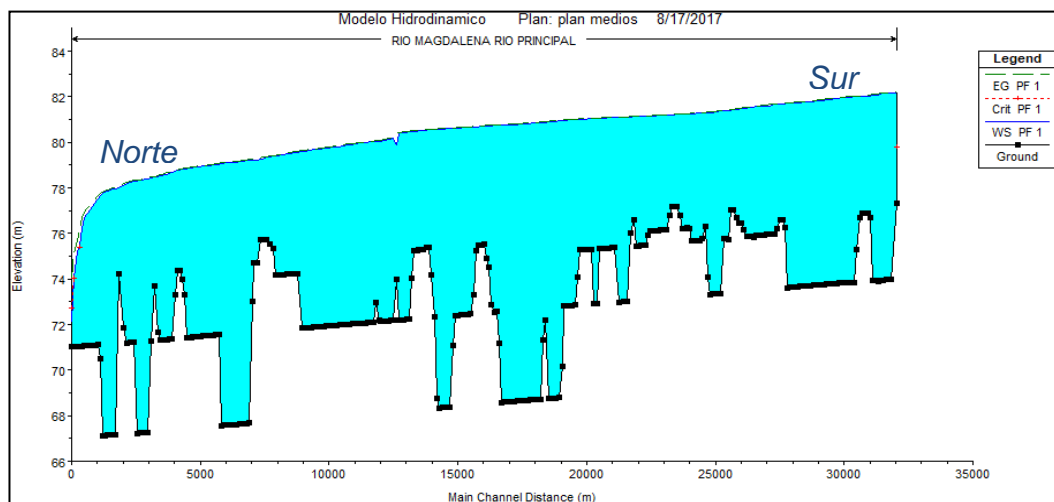
Figura B8. Vista del modelo hidrodinámico ya corrido completo



Fuente: HeCras 4,1

En la figura B9 se muestra el perfil de inundación del río Magdalena entre los sectores de Maldonado-Peñas Blancas, el perfil representa la pendiente del río corroborando lo descrito por según Nania y Molero (2007), que el río transita sobre la tierra desde un lugar de mayor altitud hasta un lugar de menor altitud [33].

Figura B 9. Sección longitudinal del sector del río



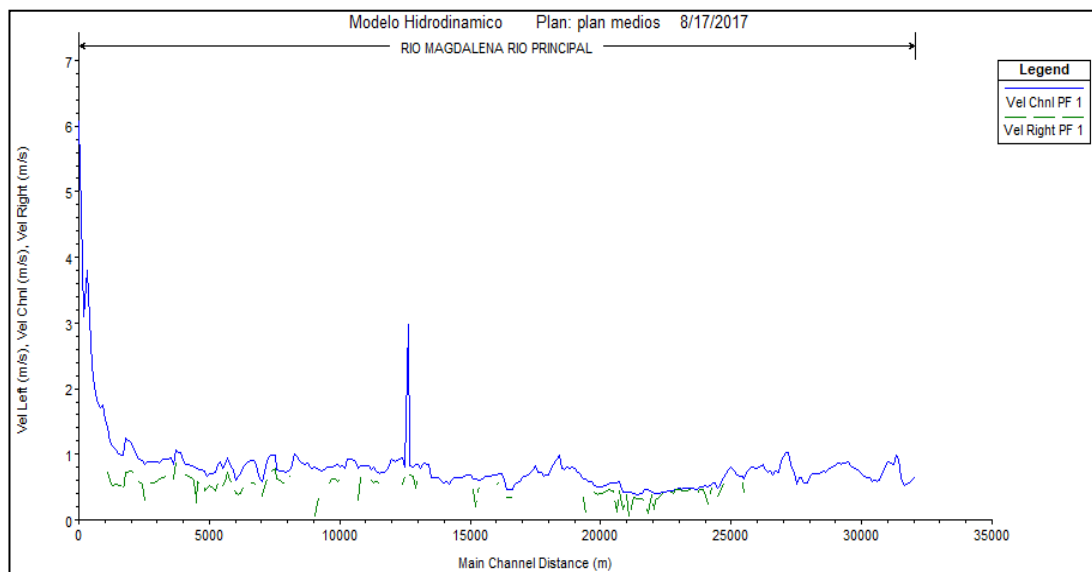
■ Agua o inundación

□ Tierra-Suelo

Fuente: HeCras 4,1

Después de correr el modelo hidrodinámico, se puede apreciar en la figura B10 los resultados generados por el programa en forma de perfil, estos datos de velocidad son atribuidos en tablas de contenido para luego ser llevada a ArcGis en seguimiento con el paso 3.

Figura B 10. Perfiles de velocidad obtenidos en el modelo

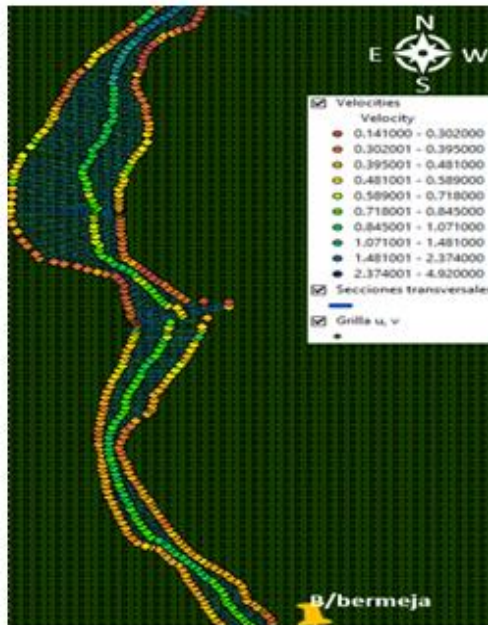


Fuente: HeCras 4,1

Paso 3

Al finalizar la simulación, el archivo generado de Hecras es exportado nuevamente a ArcGis, para generar el archivo .CUR que es compatible con el programa seleccionado GNOME [29]. Este formato consta de cuadrícula, con información de ubicación y velocidad en cada punto [38] tal como se muestra en la figura B.11.

Figura B 11. (a) Mapa con la cuadrícula en ArcGis, **(b)** Orden del archivo en formato .CUR



(a)

```
[GRIDCUR]
NUMROWS 100
NUMCOLS 100
STARTLAT 33.8
STARTLONG -120.4
DLAT .008
DLONG .01
row col u v
1 1 .10 .10
1 2 .10 .10
1 3 .10 .10
1 4 .10 .10
1 5 .10 .10
1 6 .10 .10.....
```

(b)

Fuente: ArcGis 10,1

Para la importación en GNOME, fue necesario vectorizar la velocidad por medio de la Herramienta computacional Matlab, paralelo al contorno del río. Posteriormente se creó una cuadrícula con datos de latitud y longitud, obteniendo 518 filas y 198 columnas, iniciando en las coordenadas 6,96792 de latitud y -73,950062 de longitud, con un diferencial de latitud y longitud de 0.00045 (diferencia de ubicación entre punto y punto), para un mejor entendimiento ver el ejemplo mostrado del formato de entrada a GNOME en la figura B.11 (b).

ANEXO C. MATRIZ DE ESCENARIOS

Tabla C. 1. Matriz de Escenarios, con un tiempo de 12 horas, variaciones de dirección del viento, de crudo y de cantidad derramada

Escenario	Velocidad del viento	Tipo crudo	Cantidad derramada [m ³]
1	1,8 S	Combustible No. 4	23,85
2	1,8 N	Combustible No. 4	2225,8
3	1,8 S	Combustible No. 4	2225,8
4	1,8 N	Combustible No. 4	332,8
5	1,8 N	Combustible No. 4	23,85
6	1,8 S	Combustible No. 4	332,8
7	1,8 N	Combustible No. 6	332,8
8	1,8 N	Combustible No. 6	2225,8
9	1,8 S	Combustible No. 6	23,85
10	1,8 S	Combustible No. 6	2225,8
11	1,8 S	Combustible No. 6	332,8
12	1,8 N	Combustible No. 6	23,85
13	1,8 S	Crudo medio	2225,8
14	1,8 N	Crudo medio	332,8
15	1,8 S	Crudo medio	23,85
16	1,8 N	Crudo medio	2225,8
17	1,8 N	Crudo medio	23,85
18	1,8 S	Crudo medio	332,8
19	1,8 S	Diésel	23,85
20	1,8 N	Diésel	23,85
21	1,8 N	Diésel	2225,8
22	1,8 S	Diésel	332,8
23	1,8 S	Diésel	2225,8
24	1,8 N	Diésel	332,8
25	1,8 S	Gasolina	332,8
26	1,8 N	Gasolina	23,85
27	1,8 N	Gasolina	2225,8
28	1,8 N	Gasolina	332,8
29	1,8 S	Gasolina	23,85
30	1,8 S	Gasolina	2225,8
31	1,8 N	Queroseno	2225,8
32	1,8 N	Queroseno	332,8

33	1,8 S	Queroseno	2225,8
34	1,8 S	Queroseno	23,85
35	1,8 S	Queroseno	332,8
36	1,8 N	Queroseno	23,85

Tabla C. 2. Escenarios respecto al tiempo variaciones, de dirección del viento, de crudo y de cantidad derramada

Esc.	Velocidad viento	Tipo crudo	Cantidad derramada	T [h]	T [h]	T [h]	T [h]	T [h]
1	Variable	Combustible No. 4	2225.8	6	12	24	48	72
2	Variable	Combustible No. 4	332.8	6	12	24	48	72
3	Variable	Combustible No. 4	23.85	6	12	24	48	72
4	Variable	Combustible No. 6	23.85	6	12	24	48	72
5	Variable	Combustible No. 6	332.8	6	12	24	48	72
6	Variable	Combustible No. 6	2225.8	6	12	24	48	72
7	Variable	Crudo medio	332.8	6	12	24	48	72
8	Variable	Crudo medio	2225.8	6	12	24	48	72
9	Variable	Crudo medio	23.85	6	12	24	48	72
10	Variable	Diésel	23.85	6	12	24	48	72
11	Variable	Diésel	2225.8	6	12	24	48	72
12	Variable	Diésel	332.8	6	12	24	48	72
13	Variable	Gasolina	23.85	6	12	24	48	72
14	Variable	Gasolina	2225.8	6	12	24	48	72
15	Variable	Gasolina	332.8	6	12	24	48	72
16	Variable	Queroseno	23.85	6	12	24	48	72
17	Variable	Queroseno	332.8	6	12	24	48	72
18	Variable	Queroseno	2225.8	6	12	24	48	72

ANEXO D. DATOS REPORTADOS

Figura D.1. Comportamiento del crudo en el tiempo

