



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIOS DE ESCENARIOS DE DERRAME DE HIDROCARBUROS EN EL MEDIO MARÍTIMO DE LA BASE NAVAL SUR DE GUAYAQUIL

Trabajo realizado por:

Jairo Viteri Viteri

Dirigido:

Andrés García Gómez

Ana Julia Abascal Santillana

Titulación:

**Máster Universitario en Gestión
Integral de Sistemas Hídricos**

Santander, Octubre de 2016

Agradecimiento

ESTUDIOS DE ESCENARIOS DE DERRAME DE HIDROCARBUROS EN EL MEDIO MARÍTIMO DE LA BASE NAVAL SUR DE GUAYAQUIL.

Autor: Jairo Viteri Viteri, Trabajo Final de Máster Universitario en Gestión Integral de Sistemas Hídricos. Convocatoria de Octubre de 2016.

Dirigido por: Andrés García Gómez – Ana Julia Abascal Santillana.

Resumen.

El presente trabajo analiza el cálculo de probabilidad de llegada del hidrocarburo a los tramos receptores que se encuentran ubicados alrededores de la Base Naval Sur de Guayaquil. La Base Naval se encuentra ubicada en el Ecuador y es parte de los estuarios interiores que integran el Golfo de Guayaquil. En este trabajo se recoge una metodología clásica basada en el Método de Monte Carlo para el cálculo de la probabilidad de llegada del hidrocarburo. A lo largo del trabajo se muestra las formulaciones teóricas del modelo hidrodinámico desarrollado y el análisis de los escenarios océano - meteorológico del área de estudio.

Palabras clave: Probabilidad de llegada del hidrocarburo, océano-meteorológico, tramos receptores, puntos críticos de vertido.

1. Introducción.

En los muelles de la Base Naval Sur se atracan aproximadamente 32 embarcaciones, de tipo de Guerra y Guardacostas. La Base Naval transfiere 2 millones de galones de combustible anualmente, estas actividades hidrocarburíferas generan la probabilidad de que exista un derrame, por tal motivo se vio la necesidad de realizar “Estudio de escenarios de derrame de hidrocarburo en medio marítimo de la Base Naval Sur”.

2. Objetivos y metodología.

El objetivo general de este trabajo es calcular la probabilidad de contaminación (o peligrosidad) en la zona estuarinas, debido a derrames de hidrocarburos que puedan originarse en la Base Naval Sur de Guayaquil.

Estos se podían resumir en los siguientes puntos:

- Selección de escenarios
- Implementación de un modelo hidrodinámico.

- Selección de puntos críticos de vertidos y tramos receptores del contaminante.
- Tipo de hidrocarburo y volumen derramado.
- Modelo numérico de los escenarios de derrame de hidrocarburos.

3. Selección de escenarios.

Los principales actores océano – meteorológicos en el medio marítimo de la Base Naval, son el viento y la marea. Por lo tanto la selección de los escenarios será en base al análisis de estos dos parámetros, en la que se define las variables de viento y marea que más inciden en el área de estudio. La base de datos de océano - meteorológicos son proporcionados por el Instituto Oceanográfico de La Armadas, en la Tabla 1, se describe los mareógrafos y anemómetro utilizados.

Tabla1. Base de Datos Océano-Meteorológicos.

	Base de Datos	Proveedor	Periodo Cubierto	ΔT
Viento	Anemómetro Base Sur	INOCAR	01/01/1997 - 01/12/2015	Mensuales
	Mareógrafo E1	INOCAR	01/09/2009 - 30/11/2009	Horarios
Marea Meteorológica	Mareógrafo Base Sur	INOCAR	01/07/2008 - 31/10/2008	Horarios
		INOCAR	01/02/2009 - 31/05/2009	Horarios
	Mareógrafo Puerto Nuevo	INOCAR	01/09/2011 - 30/11/2011	Horarios

Para la obtención de las carreras de marea más predominantes del área marítima de estudio, se realizó la reconstrucción de los datos armónicos del mareógrafo E1, y posteriormente se realizó una predicción de marea de 40 años, con la que se obtuvo la CDF de las carreras de mareas, y se determinó los percentiles de 5, 50 y 95 % como los más predominantes (Ver figura 1).

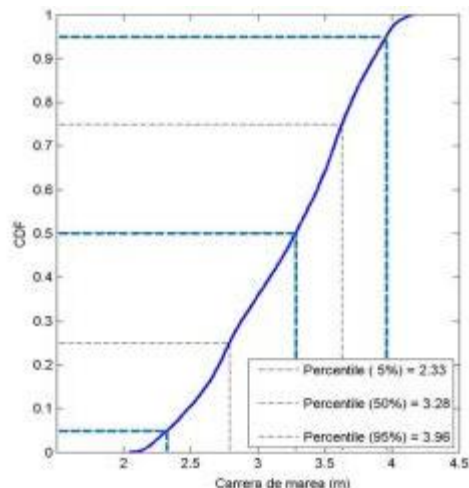


Figura 1. CDF de la carrera de marea.

El análisis de los factores más predominante de dirección y velocidad del viento que influyen en el área de estudio, se lo realizó en base a los datos del anemómetro ubicado en la Base Sur, con lo que se generó la rosa de viento, y se pudo determinar cuatro secciones probabilísticas de dirección y velocidad de viento (ver Figura 2).

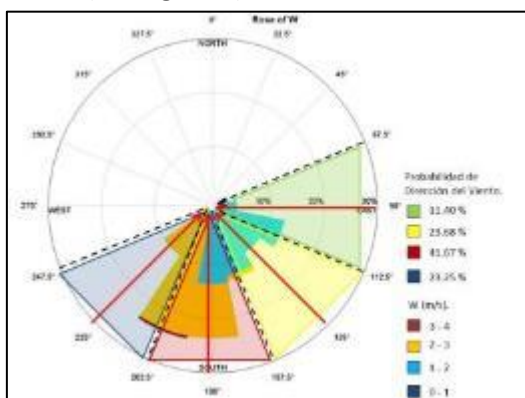


Figura 2. Rosa de viento del área de estudio.

4. Implementación de un modelo hidrodinámico.

La elaboración del modelo hidrodinámico se lo realizó en el modelo Delft3d, en las que se implementó la malla del área de estudio con una escala espacial adecuada (ver Figura 3), además de la incorporación de la batimetría y línea de costa.

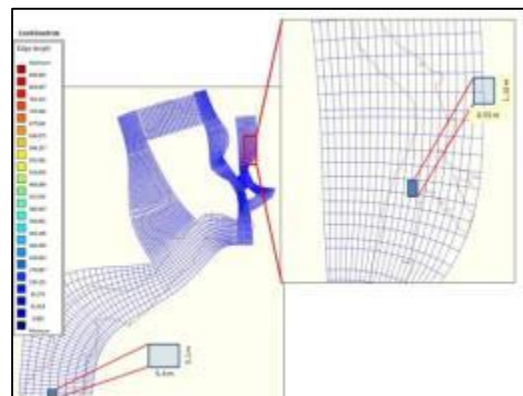


Figura 3. Escala de la malla del área de estudio.

La calibración y validación del modelo hidrodinámico se lo evaluó con una técnica estadística que nos permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos observados de marea (Datos observados del mareógrafo de la Base Sur) y los resultados de la simulación. Las medidas de error que se utilizaron son las de BIAS, Pearson, Coeficiente de Eficiencia y Raíz del error cuadrático medio.

Los parámetros de calibración del modelo hidrodinámico, están definidos por el coeficiente de rugosidad Manning n y el coeficiente de Viscosidad. Y una vez realizada las diferentes interacciones entre estos dos parámetros, se define el mejor parámetro de rugosidad Manning n es de 0.025 y de viscosidad tenemos el valor de velocidad 1m/s, ΔX de toda la celdas de la malla y el coeficiente de turbulencia $K=0.15$. Las medidas de error finales entre los datos observados y simulados de marea de la calibra son los siguientes: BIAS = 0.09;

RMSE = 0.28; Pearson = 0.98 y CE= 0.94 (ver Figura 4).

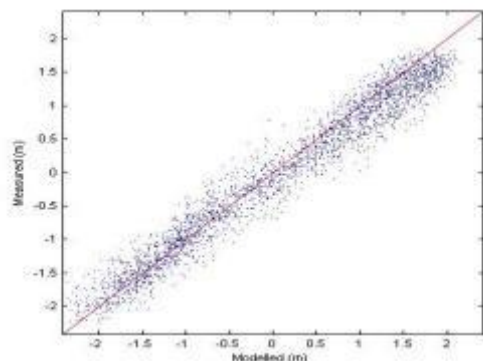


Figura 4. Correlación entre los datos observados y simulados de marea.

La validación del modelo se lo realizo en base a los datos observados de los mareógrafos E1, Puerto Nuevo y Base Sur y los datos simulados del modelo hidrodinámico. Obteniendo muy buenas mediadas de errores entre los datos observados y simulados, con eso se puedo corroborar los parámetros de calibración establecidos.

Los cálculos de las corrientes del modelo hidrodinámico se establecieron en base a los percentiles de carrera de marea. Con lo que se obtuvieron las corrientes de marea muerta, media y viva (ver Figura 5).

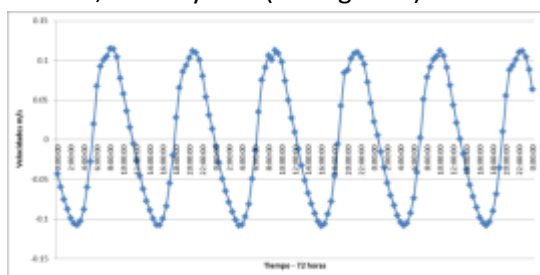


Figura 5. Velocidad de corriente – marea media.

5. Selección de puntos críticos de vertidos y tramos receptores del contaminante.

Se seleccionaron 04 puntos críticos de vertido, 03 puntos de vertido para el tipo de hidrocarburo DIESEL y 01 punto de

vertido para el tipo de hidrocarburo GASOLINA. La selección de los tramos se lo realizo en base a los nombres característicos de los lugares aledaños al punto de vertido, en el caso especial de la zona de manglar por su gran extensión se lo dividió por los canales de ingreso de agua. Finalmente obtuvimos 11 tramos receptores de combustible (ver Figura 6).



Figura 6. Ubicación de puntos críticos de vertido y tramos receptores del contaminante.

6. Modelo numérico de los escenarios de derrame de hidrocarburos.

El modelo numérico de los escenarios se lo desarrollo con la ayuda del software TESEO.

Una vez definido los parámetros de entrada y los escenarios océano – meteorológicos, se puede calcular el número total de los escenarios a simularse. En la Figura 7 se identifica el número de escenarios totales a simularse.



Figura 7. Cálculo de número total de simulaciones de vertidos de derrame de hidrocarburos.

Los resultados de las simulaciones de escenarios de derrame, evidencian que el principal factor océano- meteorológico que influye en la evolución de la trayectoria del hidrocarburo es la velocidad y dirección del viento, debido a que las corrientes en el área del vertido del hidrocarburo son muy bajas (ver Figura 8).

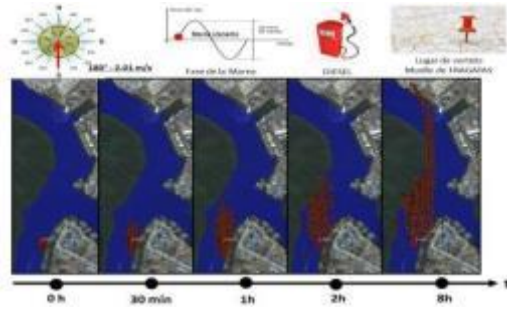


Figura 8. Presentación grafica de una simulación de derrame hidrocarburífero.

Posteriormente, para un punto crítico de vertido y un horizonte temporal, la probabilidad de llegada de contaminación a cada tramo receptor para un escenario océano-meteorológico específico se calcula como:

$$P_{i,j,k}^T = P^{W_i} \cdot P^{CM_j} \cdot P^{FM_k} \cdot P_{i,j,k}$$

donde P^{W_i} es la probabilidad de viento, P^{CM_j} probabilidad de carrera de marea, P^{FM_k} probabilidad de la fase de marea y $P_{i,j,k}$ es la probabilidad de que para un escenario el tramo receptor haya sido afectada por el derrame (se considera igual a 1 si la simulación ha alcanzado dicho tramo, si no se considera igual a 0).

Finalmente, la probabilidad de contaminación en cada tramo receptor (expresada en porcentaje) se calcula como la suma de las probabilidades de ocurrencia de cada escenario que determina la llegada de hidrocarburo a dichos tramos:

$$P^T = \sum_{i=1}^{N_W} \sum_{j=1}^{N_{CM}} \sum_{k=1}^{N_{FM}} P_{i,j,k}^T$$

Los resultados finales son presentados en los mapas de probabilidad de contaminación, que integran el resultado de todas las simulaciones, se presenta un ejemplo en las Figura 9,10 Y 11. Cada figura representa un punto crítico de vertido, divididas por intervalos de tiempo de llegada del contaminante a los tramos receptoras, y se establecieron tiempos de llegada de 30 minutos, 1, 2 Y 8 horas.



Figura 9 Punto de vertido FRAGATA



Figura 10. Punto de vertido CORBETA



Figura 11 Punto de vertido COCUAR

7. Conclusiones.

La metodología empleada en el estudio de escenarios de derrame de hidrocarburo en medio marítimo de la Base Naval Sur, permitieron obtener los parámetros océano-meteorológicos y las características principales del medio marítimo de la Base Naval, y el calcular de la probabilidad de llegada del hidrocarburo a los tramos receptores del contaminante.

OIL SPILL SCENARIOS IN THE SOUTH NAVAL BASE OF GUAYAQUIL

Author: Jairo Viteri Viteri, Trabajo Final de Máster Universitario en Gestión Integral de
Sistemas Hídricos. Convocatoria de Octubre de 2016.

Directed by: Andrés García Gómez – Ana Julia Abascal Santillana.

ABSTRACT .

Índice

1.	Introducción.	12
2.	Objetivos.	15
2.1	Objetivo General.	15
2.2	Objetivos Específicos.	15
3.	Área de Estudio.	15
4.	Metodología.	18
5.	Selección de escenarios océano - meteorológicos.	19
5.1	Recopilación/generación de bases de datos meteorológicos y oceanográficas estadísticamente representadas del área de estudio.	19
5.2	Selección de rangos de marea.	20
5.3	Selección de direcciones y velocidades del viento.	23
6.	Modelo hidrodinámico.	25
6.1	Descripción Delft3d.	25
6.1.1	Ecuaciones de gobierno.	26
6.2	Implementación del modelo hidrodinámico.	29
6.2.1	Creación de la malla y determinación de la batimetría y línea de costa.	29
6.2.2	Determinación de las condiciones de contorno.	30
6.3	Calibración del modelo.	31
6.3.1	Coeficiente de rugosidad Manning n.	31
6.3.2	Coeficiente de Viscosidad.	32
6.4	Técnicas estadísticas.	32
6.5	Resultados de Calibración.	34
6.6	Validación del modelo.	36
6.7	Simulaciones del modelo hidrodinámico.	40
7.	Modelo de escenarios de derrame.	41
7.1	Selección de puntos críticos de vertido y tramos receptores de contaminante.	41
7.2	Modelado numérico del derrame.	43
7.2.1	Descripción de TESEO y sus ecuaciones.	43
7.2.2	Parámetros de configuración de TESEO.	45
7.2.3	Número de simulaciones.	45
7.3	Análisis estadístico.	51
7.4	Resultados.	52
8.	Conclusiones.	59

9. Futuras líneas de trabajo.....	60
10. Referencias.....	60
ANEXO “A” Datos Armonicos del Mareógrafo E1	65

1. Introducción.

El Golfo de Guayaquil es uno de los estuarios más grandes de la costa del Pacífico de América del Sur, ubicado a los 3° del Ecuador, y con una extensión aproximada de 12.000 km² (Cucalón, 1989). En este gran estuario vierten más de veinte ríos, generando un área total de la cuenca de 51.230 Km². La cuenca del río Guayas es la más grande ya que drena un área de 32.800 km², y es la mayor fuente de agua dulce que ingresa al Golfo. (Stevenson, 1981; Twilley, et al.). El Golfo se divide naturalmente en un estuario exterior que se origina cercano al costado occidental de la Isla Puna (80° 15' O) y que termina a lo largo de la longitud 81° O y un estuario interior del Golfo que se extiende desde la marca de la marea del Río Guayas, 74 km al suroeste, hasta la costa norte de la Isla Puna (Twilley, et al.; Stevenson, 1981). Dentro del Estuario Interior se pueden distinguir tres subestuarios, aunque no existen límites claros entre ellos: El Estuario del Río Guayas, que está influido principalmente por el río del mismo nombre; El Estero Salado, ubicado en el lado oeste, el cual carece de fuentes de agua dulce locales, y recibe las aguas residuales principalmente de la ciudad de Guayaquil; y, al este se encuentra El Estuario del Churute (Stevenson, 1981) (ver Figura 1).

Los estuario interiores, posee una interfaz entre los ambientes marinos y fluviales, y los sistemas acuáticos y terrestres, dando como resultado una variabilidad significativa de las condiciones ambientales físicas, químicas y geomorfológicas, (McLusky & Elliott, 2004). Estas particularidades hacen que los estuarios sean los ecosistemas más productivos y valiosos del planeta (Constanza, et al., 1998).

El Estero Saldado, ha sido el foco de atracción para el desarrollo de diversas actividades desde épocas ancestrales. El incremento poblacional y el cambio del uso de los suelos han originado una serie de conflictos, preocupaciones y controversias entre los principales actores, que son: el sector camaronero, los puertos concesionados, privados y navales, las comunidades que viven de la pesca, Centrales Termoeléctricas y la ciudad de Guayaquil (aproximadamente 2,291 millones de habitantes).

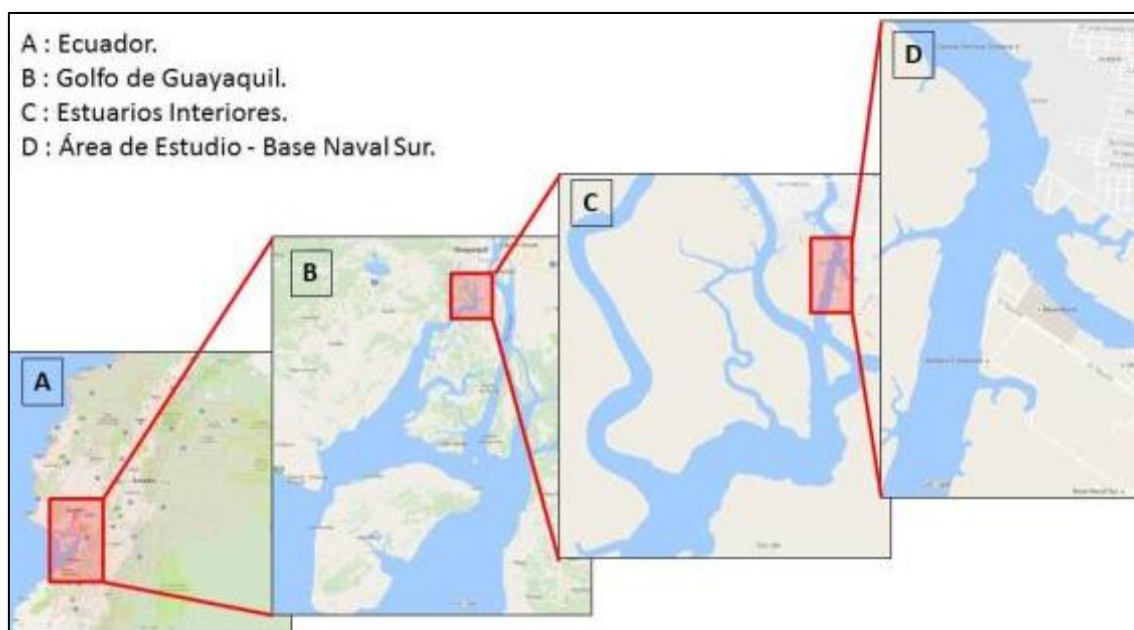


Figura 1 Localización del Área de Estudio

El área de estudio en la que se desarrollará el presente trabajo es la Base Naval Sur (BASUIL), que se encuentra ubicada en el sector sur de la ciudad de Guayaquil, rodeada por la población de la ciudad antes mencionada. Esta Base abarca a más de 32 embarcaciones de todo tipo, y sus muelles de atracadero se encuentran en la orillas de uno de los brazos del estero salado, y en sus alrededores existen actividades portuarias y comerciales.

Las diversas actividades que se generan en el Estero Salado, han impulsado al Estado Ecuatoriano a implementar el proyecto "Recuperación de las áreas protegidas de la ciudad de Guayaquil - Estero Salado e Isla Santay" (SENPLADES, 2015). En los alrededores del Estero salado se encuentra la "Reserva de Producción de Fauna, Manglares el Salado", zona que se encuentra protegida por la legislación nacional (Constitución del 2008) establece la protección de zonas sensibles además de su importancia en la socio-economía y ecología de nuestro País, los tratados internacionales que se han realizado entre el Estado Ecuatoriano y la Organización de Naciones Unidas entre otros, como por ejemplo el "Convención para la protección de la flora, fauna y bellezas escénicas naturales de los países de América", "Convenio relativo a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas.

Los canales del Estero Salado son emplean como vías de comunicación marítima, en los que transitan cientos de buques durante los 365 días del año. Una vez que arriban los buques en los diferentes puertos, realizan diferentes operaciones logísticas, entre ellas el reabastecimiento de combustible, en la que se manipula la transferencia de miles de galones de combustible desde los muelles hasta los buques atracados. En el caso de la Base Naval Sur anualmente se transfieren aproximadamente dos millones y medio de galones de combustible en las diferentes embarcaciones que arriban a sus muelles.

La Base Naval Sur por su naturaleza realiza constantes maniobras de reabastecimiento de combustible a los Buques de Guerra y Guardacostas, debido a sus frecuentes operaciones Navales y anti-delincuencias. Las maniobras de reabastecimiento de combustible que realiza el personal militar en la Base Naval, son efectuadas durante los 365 días del año y en cualquier hora del día, por tal motivo existe siempre la probabilidad de un derrame de hidrocarburo.

La valoración del riesgo ofrece varias ventajas en la gestión de una respuesta a un vertido accidental. Por un lado, permite a los gestores identificar, para una zona específica, la probabilidad de que ocurran vertidos, y por otro lado, proporciona una base para la determinación de estrategias de gestión (prevención o preparación) que reduzcan el riesgo para una determinada zona.



riesgo (ver Figura 2).

En la literatura existente está ampliamente reconocido que a la hora de evaluar el riesgo (R), éste depende principalmente de los componentes: peligrosidad (P), exposición (E) y vulnerabilidad (V) (e.g. Crichton, 1999; Schneiderbauer et al., 2004), configurando lo que se conoce como el triángulo del

La peligrosidad será la probabilidad de que dado un derrame de hidrocarburos en un punto determinado éste arribe a zonas sensibles, la vulnerabilidad es la capacidad, en este caso el estuario, para hacer frente, resistir y recuperarse del impacto producido por un vertido de hidrocarburos y la exposición representa la facilidad que presenta una zona de ser protegida frente a los efectos de un vertido de hidrocarburos.

Este trabajo está centrado en estudiar uno de los factores que definen el riesgo: la peligrosidad. Dado un derrame accidental de hidrocarburos, el estudio realizado permite responder a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la probabilidad de que la contaminación llegue a un punto dado del estuario?
- ¿Cuánto tiempo tardará la contaminación en llegar a un punto del estuario?

Para abordar esta cuestión, la OMI (Organización Marítima Internacional) exige a sus estados miembros la planificación y preparación para establecer medidas de respuestas ante incidentes de derrame de hidrocarburos, mediante el desarrollo de sistemas nacionales de lucha contra la contaminación (OMI, 1995). Por otra parte, la contaminación por hidrocarburos, preparación y Convención Internacional de Cooperación (Convenio de Cooperación) exige a los Estados a establecer un sistema nacional para responder a los incidentes de contaminación de petróleo y sustancias nocivas peligrosas (SNP) (OMI, 1991, 2000). En consecuencia, sitio específico (por ejemplo, puertos, petróleo y plantas químicas), los planes de emergencias locales y regionales necesitan ser definidos. Estos deben incluir una evaluación de los riesgos potenciales de contaminación sobre la base de las condiciones meteorológicas, oceanográficas y ambientales, así como las características de derrames (OMI, 2010). Por citar un ejemplo, las directrices europeas (Comisión Europea, 2013, 2014; OMI, 1991; IPIECA, 2008), sugieren que el análisis de riesgos de derrames de petróleo debería centrarse en un contexto espacial y peligro específico, además de los datos científicos adecuados, lo que permite obtener resultados más precisos y fiables que representan los mejores enfoques de evaluación de riesgo ambiental (Santos et al., 2013) (Bulletin, 2015).

La implementación de los planes de emergencias locales y regionales ante un derrame de hidrocarburo son necesarios, y en especial cuando el Estado Ecuatoriano es miembros de la OMI. Por tal motivo nace la necesidad de desarrollar un **“Estudio de escenarios de derrame de hidrocarburo en la Base Naval Sur”**, a fin de determinar la probabilidad de que áreas aledañas a la Base vayan a verse afectadas por un derrame de hidrocarburo que pudiera producirse en puntos críticos de vertido previamente identificados.

Los diferentes escenarios de derrame de hidrocarburo serán realizados con la ayuda de modelos numéricos, que nos permitirá caracterizar, la hidrodinámica de la zona de estudio, y estudiar el transporte y dispersión del hidrocarburo.

2. Objetivos.

2.1 Objetivo General.

El objetivo general de este trabajo es calcular la probabilidad de contaminación (o peligrosidad) en la zona estuarinas, debido a derrames de hidrocarburos que puedan originarse en la Base Naval Sur de Guayaquil.

2.2 Objetivos Específicos.

Para la consecución de este objetivo general se establece los siguientes objetivos específicos, que se detallan a continuación:

- Implementación del modelo hidrodinámico del área de estudio: EL modelo hidrodinámico abarca parte de los estuarios interiores del Golfo de Guayaquil, y su principal área que es la Base Naval Sur de Guayaquil.
- Selección de escenarios: Análisis de los parámetros océano –meteorológicas, puntos críticos de vertidos, zonas receptoras del contaminante y tipos de hidrocarburos, a fin de establecer los escenarios más probables de un derrame de hidrocarburo.
- Simulación de escenarios de derrame de hidrocarburos: Simulación y análisis de los diferentes escenarios establecidos, a fin de calcular la probabilidad de contaminación en las costas aledañas a los puntos críticos de vertido.

3. Área de Estudio.

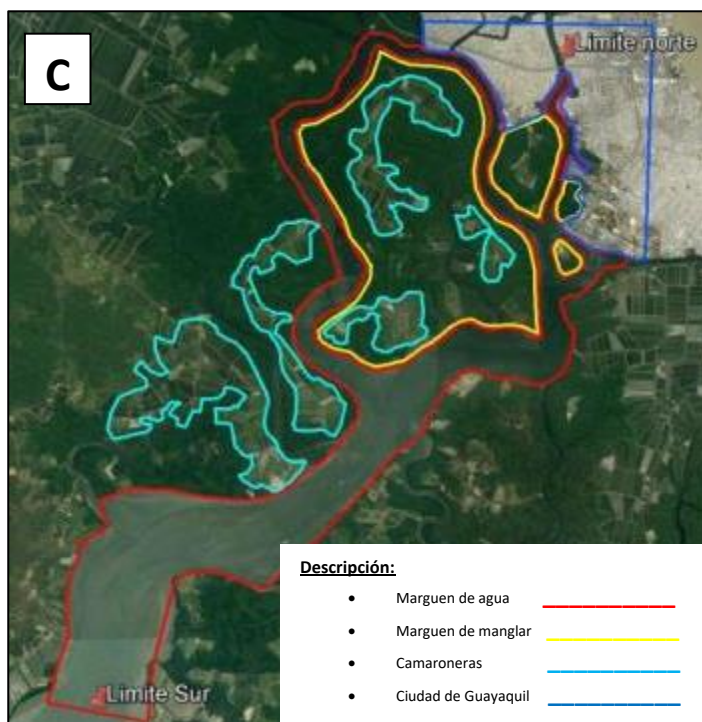


Figura 3 Descripción de la zona de estudio.

El área de estudio está limitada al sur por la boya número 62 (Lat. 2°23'54.17" S; Log. 80°1'24.14" O) que se encuentra en el canal principal de acceso hacia el Puerto Marítimo de Guayaquil, al norte con la ciudad de Guayaquil (Lat. 2°14'17.45" S; Log. 79°54'44.57" O), además abarca un margen de agua de 100 kilómetros, en sus orillas podemos encontrar grandes extensiones de camaroneras y manglares, que son parte de la economía y el ecosistema de la población del sector sur de la Ciudad Guayaquil. (Figura 3).

El área de estudio se encuentra ubicada específicamente en la Base Naval Sur, en cuyas aproximaciones existen lugares de gran importancia

socioeconómica, y es en donde se realizará las simulaciones de los vertidos de hidrocarburos. En la Figura 4 podemos visualizar los puertos marítimos privados y concesionados, extensas áreas de manglar y una termoeléctrica que abastece de energía a un sector de la ciudad de Guayaquil.



Figura 4 Descripción de las zonas representativas que se encuentran cercanas al área de simulaciones del derrame hidrocarbúfero.

La Base Naval Sur de Guayaquil, como su nombre indica se encuentra ubicada al sur de la ciudad de Guayaquil (Lat. 2°15'47''; Long. 79°54'39'').

Una de las funciones principales de la Base Naval es de proveer la logística a los Buques de Guerra y Guardacostas, y parte de esa logística es el reabastecimiento de combustible. La Base Naval se encuentra dividida en dos sectores, el primero es la Comandancia de Escuadra Naval (CODESC), en el que se encuentran los muelles de los buques de guerra, y el segundo es el Comando de Guardacostas (COGUAR), en el que se utilizan los muelles de las Lanchas Guardacostas.

En la Figura 5 se describe la ubicación de los muelles que posee la Base Naval. Los usuarios de estos muelles son los diferentes tipos de buques navales que pertenecen a la Armada del Ecuador. Además se describe la ubicación de los tanques de almacenamiento de combustible, que permite visualizar la trayectoria que realiza el circuito de combustible hasta llegar a su destino final, que son los muelles en donde se encuentran atracados los buques.

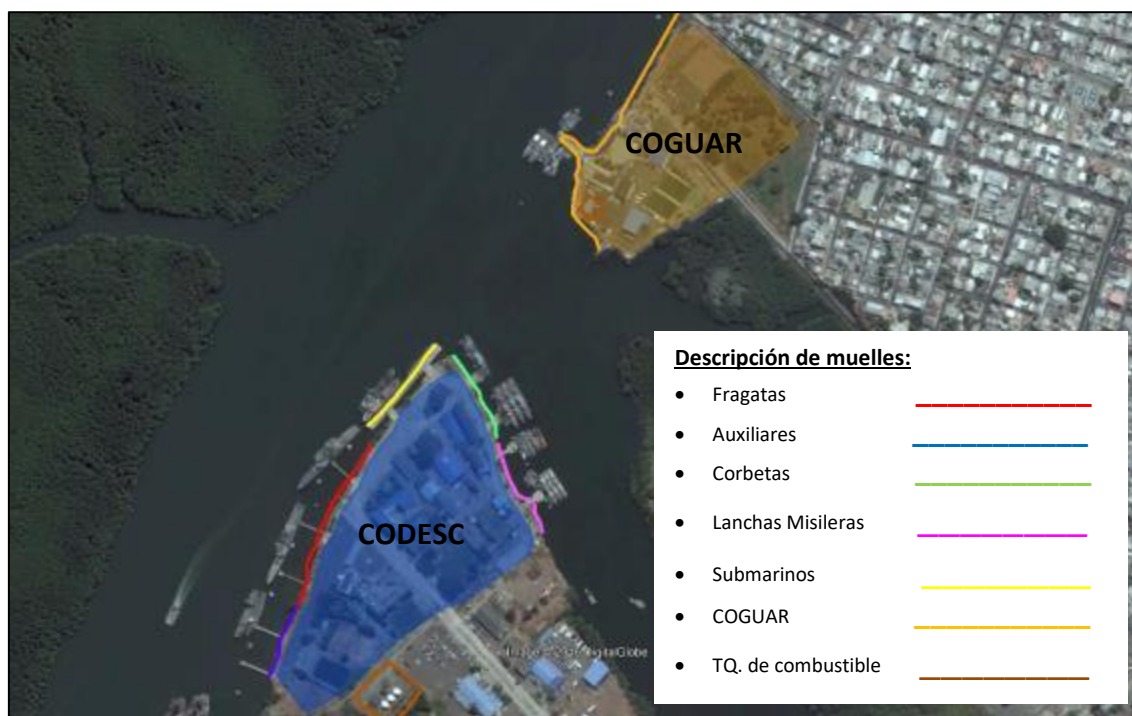


Figura 5 Descripción de la ubicación de los diferentes muelles que se encuentran en la Base Naval Sur de Guayaquil.

La Armada del Ecuador posee alrededor de 32 embarcaciones mayores de diferentes características. En la Tabla 1, se describe algunas de las embarcaciones que reciben reabastecimiento de combustible en los muelles de CODESC y COGUAR, y su capacidad de almacenamiento de diesel y gasolina.

Tabla 1 Detalle del tipo de embarcaciones que realizan reabastecimiento de combustible en la Base Naval Sur;
Fuente: Fichas logísticas de las Unidades Navales de la Armada del Ecuador (Documento reservado).

Fichas logísticas de las Unidades Navales de la Armada del Ecuador (Documento Reservado).			
Cantidad	Tipo de Unidad	Cantidad de Diesel en galones	
		Unitario	Total
	Muelles de CODESC		
2	Fragatas Misileras clase LEANDER	164000	328000
6	Corbetas Misileras clase Esmeraldas	40000	240000
3	Lanchas Misileras clase Quito	15000	45000
2	Submarinos clase tipo 209	20000	40000
5	Buque Auxiliares	41000	205000
2	Buques Oceanograficos	62000	124000
1	Buque Escuela Guayas	37000	37000
	Muelles de COGUAR		
3	Lanchas Guardacostas clase Oceanicas	24000	72000
2	Lanchas Guardacostas clase Espada	9000	18000
2	Lanchas Guardacostas clase Manta	8000	16000
4	Lanchas Guardacostas Rapidas	5000	20000
Total			1145000
Cantidad	Tipo de Unidad	Cantidad de Gasolina en galones	
		Unitario	Total
	Muelles de COGUAR		
5	Lanchas Guardacostas claseAlbatros	400	2000

4. Metodología.

La metodología empleada está enfocada en el análisis de los aspectos océano-meteorológicos y las características propias que actúan en el medio marítimo de la Base Naval, a fin de calcular la probabilidad de contaminación (o peligrosidad) en la zona estuarinas. Para lo cual se describe a continuación la secuencia de pasos a seguir, para la materialización de los objetivos planteados para este estudio.

- Selección de escenarios: Los principales actores océano – meteorológicos en el medio marítimo de la Base Naval, son el viento y la marea. Por lo tanto la selección de los escenarios serán en base al análisis de estos dos parámetros, en la que se define las variables de viento y marea que más inciden en el área de estudio.
- Implementación de un modelo hidrodinámico: Para la definición de los rangos más probables de carrera de marea, debemos implementar un modelo hidrodinámico, este modelo hidrodinámico además obtiene los valores de corriente del medio marítimo del área de estudio. La hidrodinámica será implementada con la ayuda del modelo Delft3d, y sus resultados serán calibrados y validados con el registro de datos observados de los diferentes mareógrafos que se encuentran dentro del área de estudio.
- Selección de puntos de vertidos y tramos receptores del contaminante: La selección de los puntos de vertido se define de acuerdo a los sectores donde más se realice transferencias de combustible, actividad que se realiza en los muelles de la Base Naval Sur. Los tramos receptores de combustible serán definidos por el nombre característico de los lugares aledaños a los puntos de vertido, y en el caso de la sección de manglar, se dividieron de acuerdo a los canales de entrada que integran toda la zona de manglares.
- Tipo de hidrocarburo y volumen derramado: Los Buques Navales que actualmente posee la Armada del Ecuador se abastecen de dos tipos de combustible DIESEL y GASOLINA. La mayoría de Buques Navales usan DIESEL, debido a su gran desplazamiento y calado, y en menor porcentaje se utiliza la GASOLINA. El volumen de hidrocarburo derramado, será en base a los tiempos de registros de cada uno de las Unidades Navales que reciben el combustible en los muelles de la Base Naval Sur.
- Modelo numérico de los escenarios de derrame de hidrocarburos: Una vez defino los parámetros océano – meteorológicos, puntos de vertido, tipos de hidrocarburos y volumen derramado, se establece los escenarios de derrame de hidrocarburo, estos serán integrados en un modelo que simule los escenarios de derrame de hidrocarburo. El modelo que nos permitirá realizar estas simulaciones de derrame de hidrocarburo es TESEO.

- Análisis estadístico: La utilización de las herramientas estadísticas, permitirá obtener los resultados de la probabilidad de tiempo de llegada del hidrocarburo en los tramos receptores del contaminante.

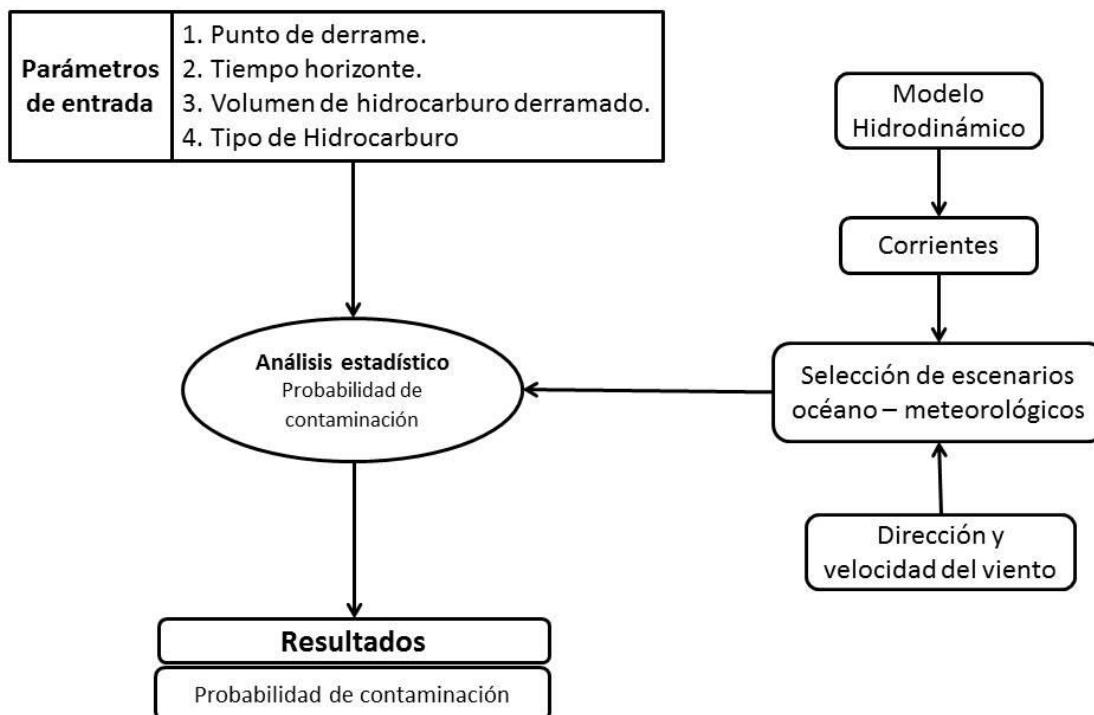


Figura 6 Esquema conceptual de la metodología.

5. Selección de escenarios océano - meteorológicos.

El punto de partida de cualquier simulación de evolución de un derrame en el medio marino, es la determinación de las variables de dinámica atmosférica (viento) y marina (oleaje y corrientes) que serán los forzamientos de entrada que necesita un modelo numérico que resuelva el transporte y degradación de hidrocarburos. En general, el transporte de un vertido en mar abierto está muy condicionado por el efecto del viento. Cerca de la costa, adquiere relevancia el efecto de las corrientes y en zonas de rompientes de playas, también el efecto del oleaje. Como se mostrará a continuación, en el medio marítimo de Base Naval Sur, al tratarse de un estuario y dadas sus dimensiones, las dinámicas dominantes son la marea astronómica y el viento.

5.1 Recopilación/generación de bases de datos meteorológicos y oceanográficas estadísticamente representadas del área de estudio.

Antes de la descripción de la base de datos océano – meteorológicas, es necesario identificar la ubicación geográfica de los mareógrafos y anemómetros. Estos fueron empleados en diferentes etapas de la elaboración del presente trabajo. En la Figura 7 se describe sus ubicaciones.

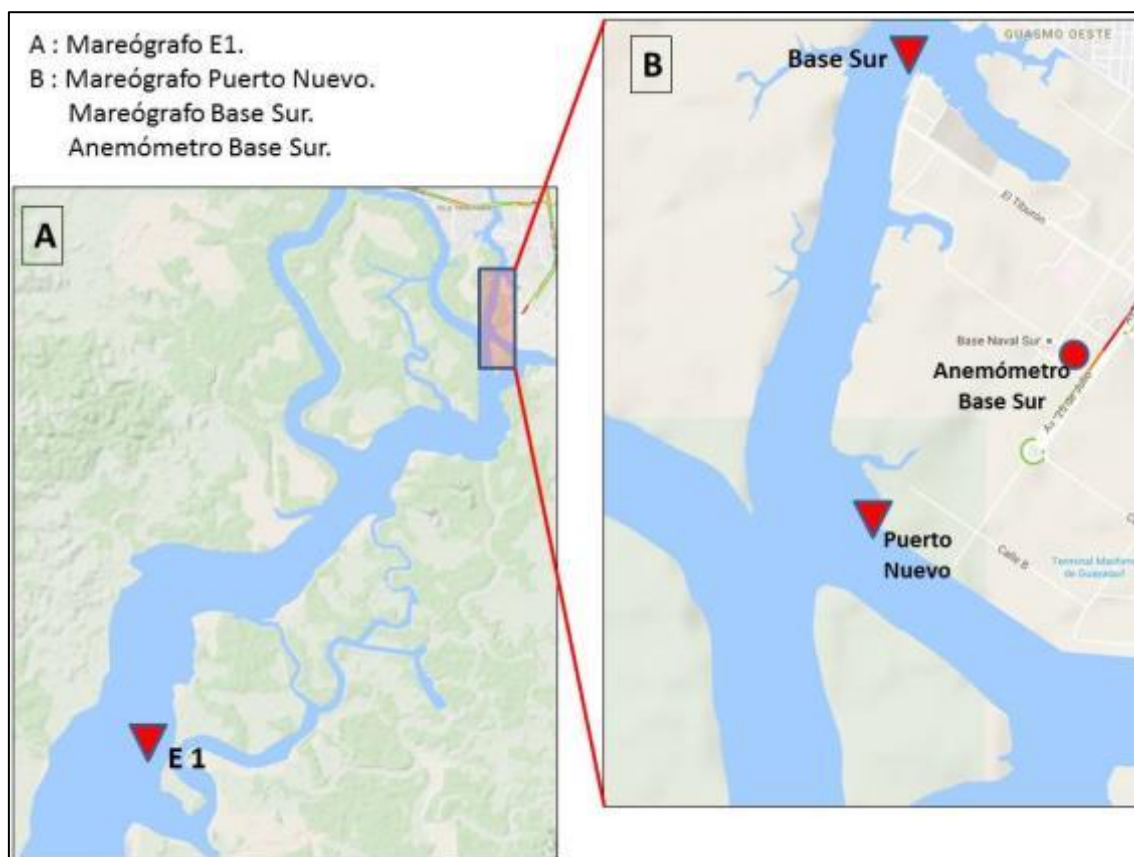


Figura 7 Ubicación de los mareógrafos y anemómetros del área de estudio.

En la Tabla 2 se describe la recopilación de la base de datos océano – meteorológicos existentes en área de estudio.

Tabla 2 Bases de datos océano – meteorológicos.

	Base de Datos	Proveedor	Periodo Cubierto	ΔT
Viento	Anemómetro Base Sur	INOCAR	01/01/1997 -01/12/2015	Mensuales
Marea Metereológica	Mereógrafo E1	INOCAR	01/09/2009 - 30/11/2009	Horarios
	Mareógrafo Base Sur	INOCAR	01/07/2008 - 31/10/2008	Horarios
		INOCAR	01/02/2009 - 31/05/2009	Horarios
	Mareógrafo Puerto Nuevo	INOCAR	01/09/2011 - 30/11/2011	Horarios

5.2 Selección de rangos de marea.

La onda de marea que viene del océano se desplaza por el Golfo de Guayaquil (Estuarios interiores y exteriores). La compleja geometría del sistema estuarino y la fricción hidráulica causa una deformación gradual de la onda. La onda al Puerto Marítimo llega con un desfase aproximado de 3 horas. La marea al ingreso del Golfo de Guayaquil es de tipo semidiurna, la amplitud de marea varía de 1.5 metros en cuadratura a 2.3 metros en sicigia, pero a medida que se va entrando la onda de marea a los estuarios interiores su amplitud se incrementa gradualmente de 2.5 a 3.6 metros, de acuerdo a los datos registrados en el mareógrafo ubicado en el Puerto Marítimo de Guayaquil (INOCAR, 1986).

En la Figura 8 se representa el comportamiento de la onda de marea que ingresa en el Golfo de Guayaquil hasta su desfase en el tiempo cuando llega al Puerto Marítimo. Esta grafica se realizó con los datos de registro de 48 horas de los mareógrafos de Data Posorja, Posorja y Puerto Nuevo (Ver Figura 9).

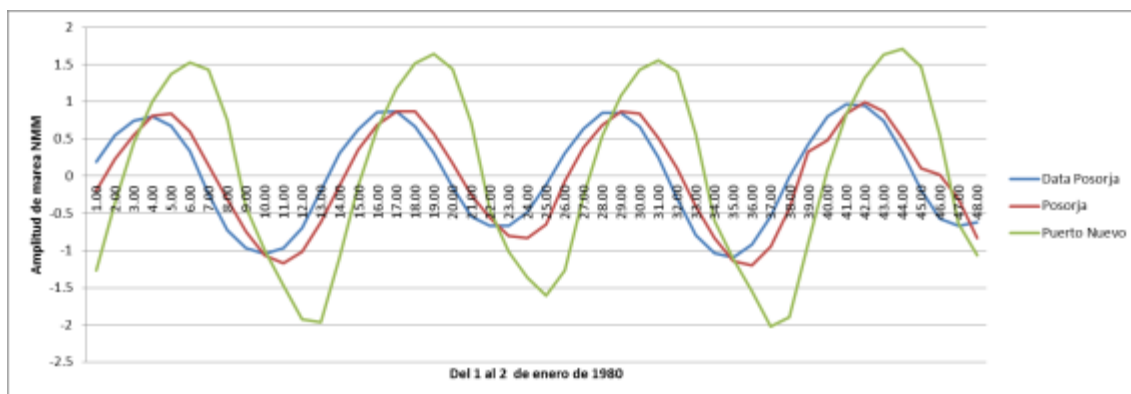


Figura 8 Comportamiento de la onda de marea de las estaciones de mareógrafos ubicadas en el Golfo de Guayaquil y Estero Salado.

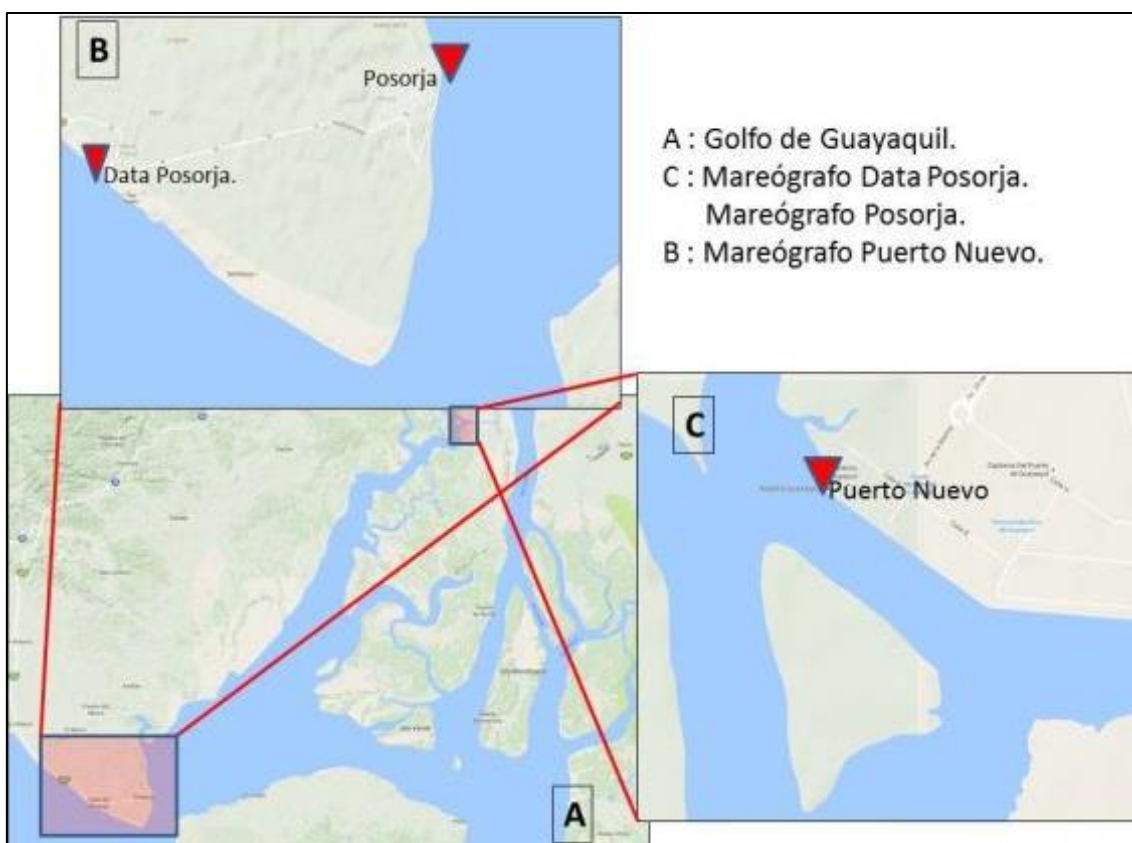


Figura 9 Ubicación de mareógrafos del Golfo de Guayaquil.

Para la selección de los rangos de marea, el primer paso fue realizar la reconstrucción de los 96 datos armónicos del año 2009, generados en base a los datos de registro del mareógrafo E1, y que fueron entregados por Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), lo cual facilitó realizar la predicción de marea de 40 años, desde 1980 hasta 2020 (ver Figura 10).

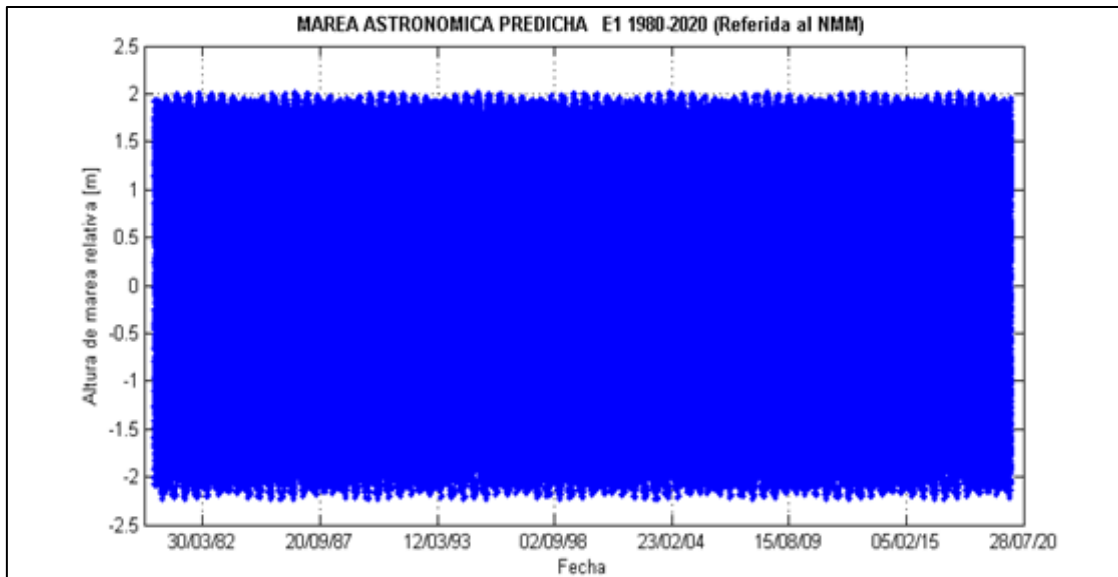


Figura 10 Predicción de Marea en un periodo de 20 años.

Obtenidas las predicciones de marea, se generó la Función de Distribución Acumulada (CDF) de las carreras de mareas predichas con sus percentiles (ver Figura 11). Los percentiles de carrera de marea seleccionados son los del 5% (Mareas Bajas), 50% (Mareas Medias) y 95% (Mareas Altas), y sus probabilidades del 10, 80 y 10 % respectivamente.

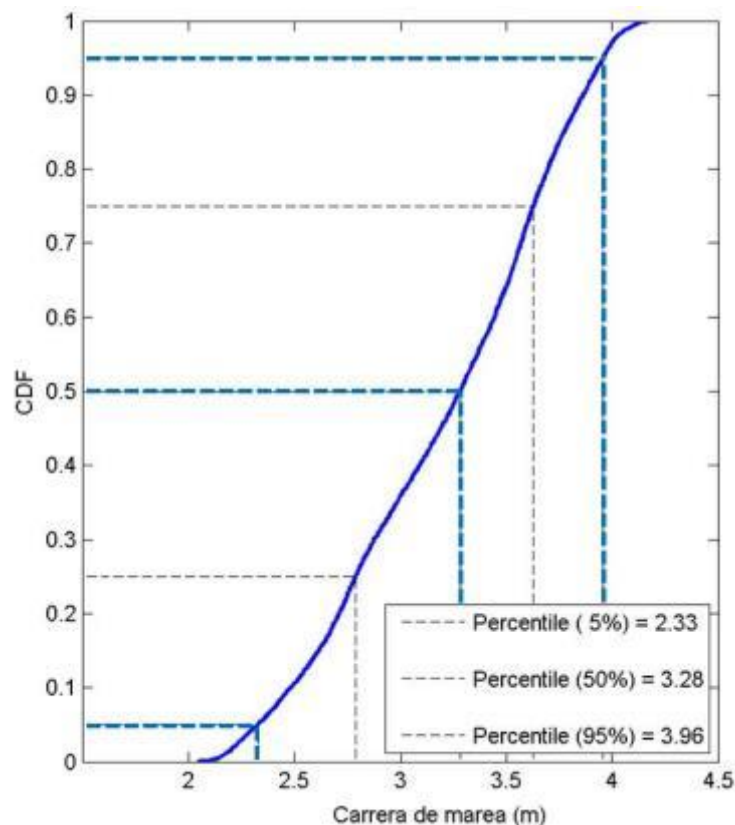


Figura 11 CDF de la carrera de mareas.

Fases de marea: La marea al ingreso del Golfo de Guayaquil es de tipo semidiurna, por lo tanto consideramos cuatro fases de marea (ver Figura 12), y sus probabilidad de 25% a cada una de las fases consideradas.

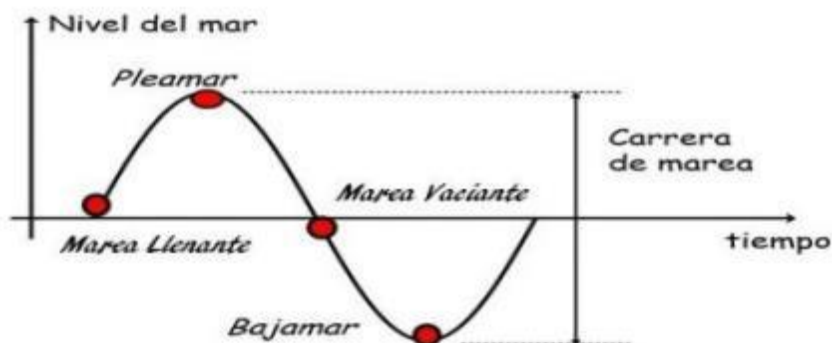


Figura 12 Fases de Marea

5.3 Selección de direcciones y velocidades del viento.

Para la evaluación del viento en la zona de estudio, se toma como referencia los datos de direcciones y velocidades de viento mensuales entre los años de 1997 – 2015, de la estación meteorológica del Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), ubicada dentro de la Base Naval Sur de Guayaquil (BASUIL). Como resultado obtuvimos que el viento varía del sur – este al sur – oeste, alcanzando velocidades desde 1 hasta 4 m/s, además se realizó un análisis estadístico de la base de datos del anemómetro de la estación meteorológica, de la cual se genera la rosa de vientos del área de estudio con sus rangos de velocidad (m/s) y sus probabilidades de las direcciones del viento (ver Figura 13).

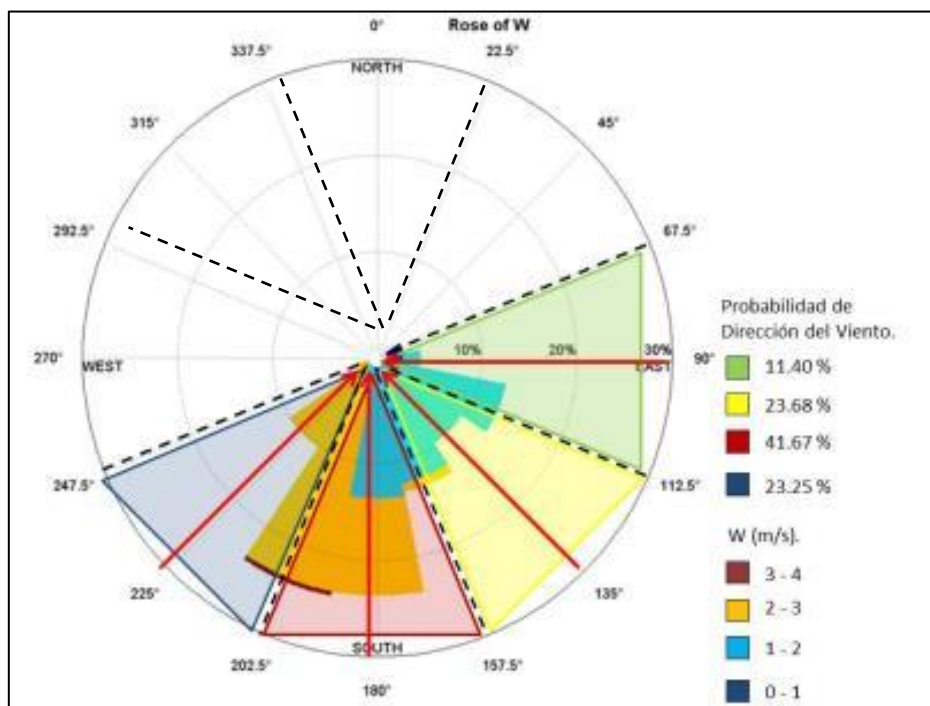


Figura 13 Rosa de Viento del área de estudio.

Para realizar el análisis de los parámetros más relevantes de velocidad y dirección del viento, se dividió la rosa de vientos en ocho sectores, abarcando todos los datos existentes (ver Figura 13), seleccionándose las cuatro secciones predominantes, a las que se asignar vientos con direcciones de 090°, 135°, 180° y 225°. A partir de las velocidades de cada uno de los sectores, se generaron las CDF, de las que obtuvimos los percentiles de velocidad de cada uno de los sectores predominantes (Ver Figura 14).

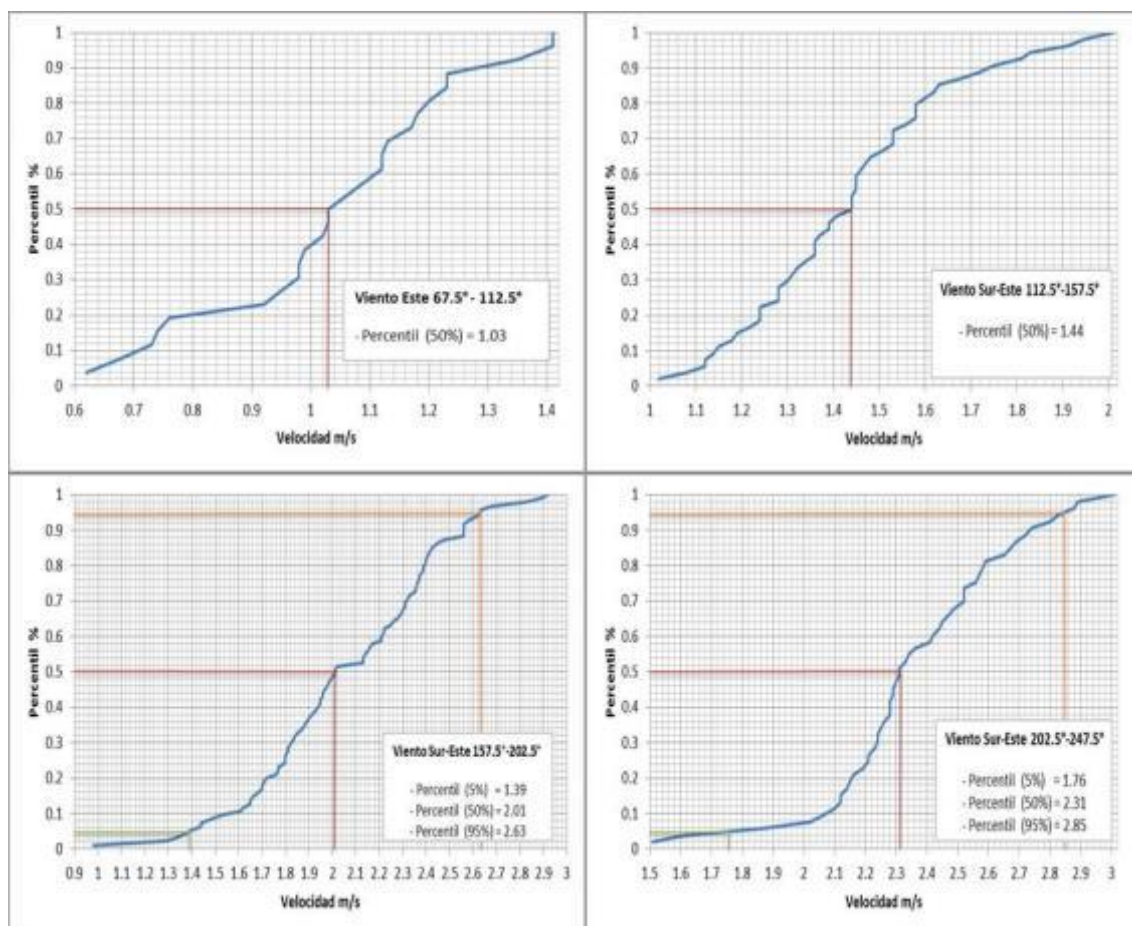


Figura 14 CDF de velocidades de viento

Los percentiles de velocidades seleccionados van asociados a cada uno de las cuatro direcciones de viento predominantes, y la probabilidad de cada sección predominante, será la integración de las probabilidades de velocidad y dirección del viento obtenidas.

En la Tabla 3 se describe los escenarios y probabilidades océano – meteorológicas para un punto crítico de vertido de hidrocarburo. En la que se puede visualizar la integración de los escenarios de viento y amplitud de marea, y el cálculo total de la probabilidad asignada a cada sección predominante del viento y carreras de mareas. La amplitud de marea es la mitad del valor de la carrera de marea.

Tabla 3 Escenarios y probabilidades océano – meteorológicos para un punto de vertido.

ESCENARIOS	VIENTO		PROBABILIDAD DE VIENTO	AMPLITUD DE MAREA	PROBABILIDAD DE MAREA
	DIRECCIÓN VIENTO	VELOCIDAD			
1	90°	1.03	0.110	1.17	0.1
2	135°	1.44	0.237	1.17	0.1
3	180°	1.39	0.042	1.17	0.1
4	180°	2.01	0.333	1.17	0.1
5	180°	2.63	0.042	1.17	0.1
6	225°	1.76	0.023	1.17	0.1
7	225°	2.31	0.186	1.17	0.1
8	225°	2.85	0.023	1.17	0.1
9	90°	1.03	0.110	1.64	0.8
10	135°	1.44	0.237	1.64	0.8
11	180°	1.39	0.042	1.64	0.8
12	180°	2.01	0.333	1.64	0.8
13	180°	2.63	0.042	1.64	0.8
14	225°	1.76	0.023	1.64	0.8
15	225°	2.31	0.186	1.64	0.8
16	225°	2.85	0.023	1.64	0.8
17	90°	1.03	0.110	1.98	0.1
18	135°	1.44	0.237	1.98	0.1
19	180°	1.39	0.042	1.98	0.1
20	180°	2.01	0.333	1.98	0.1
21	180°	2.63	0.042	1.98	0.1
22	225°	1.76	0.023	1.98	0.1
23	225°	2.31	0.186	1.98	0.1
24	225°	2.85	0.023	1.98	0.1

6. Modelo hidrodinámico.

El modelo hidrodinámico del área de estudio fue desarrollado con la ayuda del Software Delft3D, que está diseñado para aplicaciones costeras, ribereñas y estuarinas, donde se quieran simular las condiciones de flujo, oleaje, transporte de sedimentos, calidad de agua, ecología y morfología. Está compuesto de varios módulos agrupados en una interfaz gráfica mediante la cual, es posible su interacción conjunta. El módulo Flow/Mor corresponde al modelo hidrodinámico y de morfodinámica; el mismo que será utilizado para obtener la hidrodinámica del área de estudio.

6.1 Descripción Delft3d.

Delft3D es un sistema de modelado integrado de flujo y transporte orientado al medioambiente acuático que resuelve las ecuaciones no lineales 2D (promediado en profundidad) y 3D para aguas someras (shallow water equations). Las formulaciones matemáticas incluidas en el modelo permiten tener en cuenta los siguientes fenómenos físicos.

- Efectos de la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis).
- Efectos baroclínicos.
- Masas de turbulencia inducida y flujos de momentos (modelos de cierre turbulento).
- Transporte de salinidad, temperatura y otras sustancias conservativas.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Variaciones espacial y temporal de la tensión tangencial del viento en la superficie de la masa de agua.
- Variaciones espaciales de la tensión tangencial en el fondo.
- Variaciones espacial y temporal de la presión atmosférica en la superficie.
- Variación temporal de fuentes y sumideros (i.e. descargas en ríos).
- Inundación y secado de llanuras mareales.
- Flujos de calor.
- Efecto del oleaje.
- Flujo sobre estructuras hidráulicas.

6.1.1 Ecuaciones de gobierno.

Delft3D resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para fluido incompresible bajo los supuestos de aguas someras (shallow water) y Boussinesq. En la ecuación de momento vertical se desprecian las aceleraciones verticales, las cuales conducen a la ecuación de presión hidrostática. En el modelado 3D, las velocidades verticales son obtenidas a través de la ecuación de continuidad.

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[(d + \zeta) u \sqrt{G_{\eta\eta}} \right]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[(d + \zeta) v \sqrt{G_{\xi\xi}} \right]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H (q_{in} - q_{out}) + P + E \quad (1)$$

donde u , v y w son las componentes de la velocidad en las direcciones ξ , η y σ , respectivamente, q_{in} , q_{out} son fuente y sumidero de agua por unidad de volumen [1/s], $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ y $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ son coeficientes de conversión entre coordenadas curvilíneas y ortogonales y P y E son términos fuente de precipitación y evaporación, respectivamente, que pueden actuar en superficie.

Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento

Las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento en las direcciones ξ y η vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3)$$

donde P_ξ y P_η representan los gradientes de presión, $\tau_{\xi\xi}$, $\tau_{\xi\eta}$ y $\tau_{\eta\xi}$ son las tensiones de Reynolds, M_ξ y M_η representan la contribución debida a fuentes y sumideros de cantidad de movimiento externos (fuerzas externas sobre estructuras hidráulicas, descargas y retiradas de agua, tensiones en el fondo, tensiones en la superficie libre, etc...), f es el parámetro de Coriolis que depende de la latitud geográfica y de la velocidad de rotación angular de la Tierra y ν_v representa la viscosidad turbulenta vertical.

La velocidad vertical en el sistema de coordenadas σ se calcula a través de la ecuación de continuidad. La velocidad vertical ω es definida en iso-superficies σ y es la velocidad vertical relativa al movimiento en los planos σ . Esto puede ser interpretado como una velocidad asociada a movimientos de up- o downwelling. Las velocidades verticales “físicas” w en el sistema de coordenadas Cartesiano se obtienen a partir de la siguiente expresión:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (4)$$

Bajo la asunción de aguas someras, la ecuación de cantidad de movimiento vertical se reduce a la ecuación de presión hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (5)$$

La tensión en el fondo para flujos 2D se obtiene según la siguiente expresión:

$$\vec{\tau}_b = \frac{\rho_0 g \vec{U} |\vec{U}|}{C_{2D}^2} \quad (6)$$

donde $|\vec{U}|$ es la magnitud de la velocidad horizontal promediada en profundidad y C_{2D} es el coeficiente de Chézy 2D. Este coeficiente puede ser introducido directamente o a través de las formulaciones de Manning o White-Colebrook. En el caso de flujos 3D la tensión en el fondo se obtiene con la siguiente expresión:

$$\vec{\tau}_{b3D} = \frac{g \rho_0 \vec{u}_b |\vec{u}_b|}{C_{3D}^2} \quad (7)$$

siendo $|\vec{u}_b|$ la magnitud de velocidad horizontal en la primera capa justo encima del fondo y C3D el coeficiente de Chézy 3D. Dicho coeficiente puede introducirse directamente u obtenerse con las mismas formulaciones que en el caso 2D. Normalmente un cálculo 3D está precedido por un cálculo promediado en profundidad por lo que el coeficiente C2D de Chézy puede ser usado para la calibración del modelo 3D. La diferencia entre el coeficiente de Chézy 2D y 3D depende del espesor relativo de la capa computacional de fondo.

La tensión en la superficie libre generada por el viento se modela según la expresión cuadrática:

$$|\vec{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (8)$$

donde ρ_a es la densidad del aire, U_{10} es la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del agua y C_d es el coeficiente de arrastre (dependiente de U_{10}). Esta magnitud es a su vez proyectada en cada una de las direcciones horizontales.

Las tensiones de Reynolds se modelan usando el concepto de viscosidad de remolino (eddy viscosity) (Rodi, 1984) y se determinan de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) \quad (11)$$

donde ν_H es la viscosidad turbulenta horizontal.

El coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal y vertical se definen y relacionan por las siguientes expresiones:

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_V + \nu_H^{back} \quad (12)$$

$$\nu_V = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_V^{back}) \quad (13)$$

donde ν_{SGS} es la parte del coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal que modela los procesos de escalas espaciales menores que el tamaño de la celda, ν_H^{back} y ν_V^{back} son las partes de los coeficientes turbulentos de la viscosidad que modelan la turbulencia asociada al propio medio que se va a estudiar y son definidos por el usuario, ν_{mol} es la viscosidad cinemática molecular y ν_{3D} es la parte del coeficiente de viscosidad turbulento vertical asociado a los procesos tridimensionales.

6.2 Implementación del modelo hidrodinámico

6.2.1 Creación de la malla y determinación de la batimetría y línea de costa.

La malla generada, fue desarrollada con una resolución espacial adecuada, teniendo en cuenta las características que se especificaron en el área de estudio, el dominio computacional aborda el sistema formado por el estero salado y parte del canal de ingreso al puerto Marítimo de Guayaquil. En la Figura 15 se describe las diferentes escalas que posee la malla del área de estudio, además de visualizar la tabla de rango de escalas, que tiene como valor máximo 8.44 metros y mínimo 0.09 metros. En el medio marítimo de la Base Naval Sur, se aprecia que la escala esta entre 0.55 a 1.10 metros.

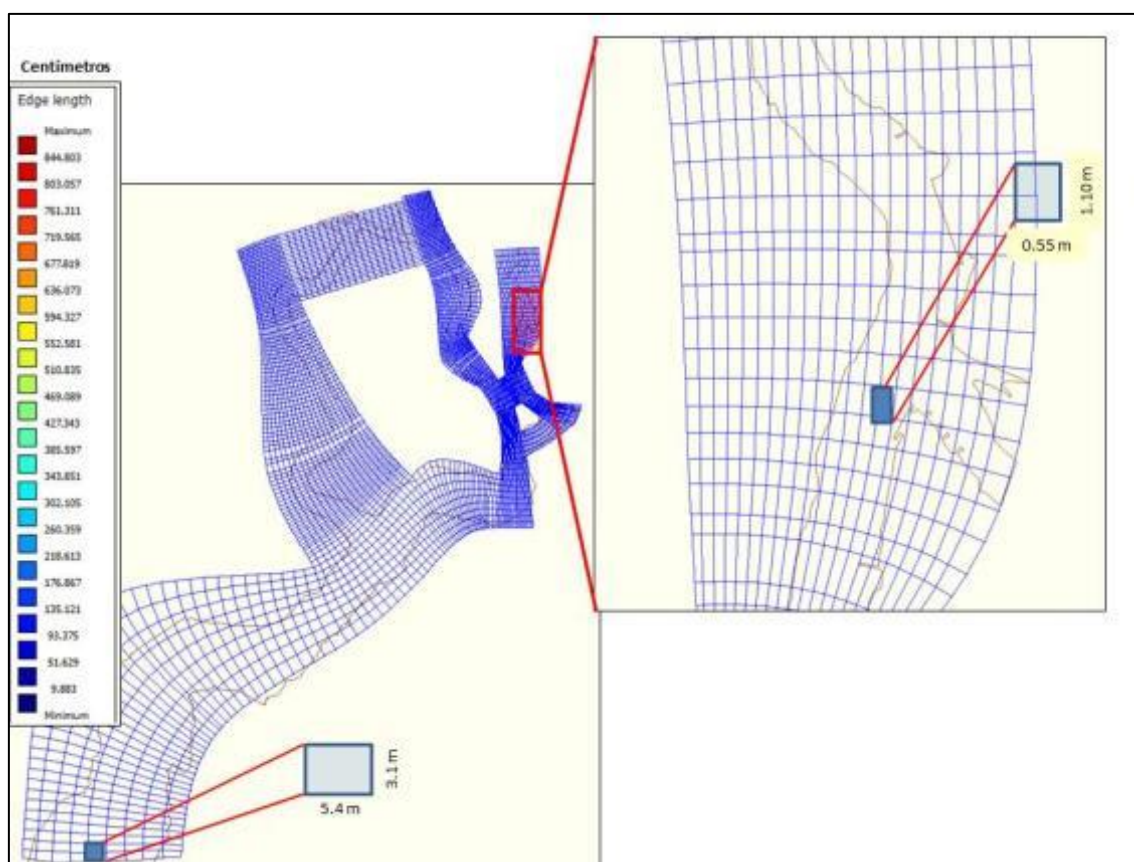


Figura 15 Descripción de la escala de la Malla.

La batimetría empleada en la malla, fue proporcionada por el INOCAR, la misma que fue levantada en los meses de noviembre y diciembre del año 2011, y fue utilizada para la elaboración de la carta IOA 10710, con una escala 1:5000. En la Figura 16 se describe el rango de profundidades que existe en el área de estudio.

La línea de costa de igual manera fue entregada por el INOCAR, y corresponde a todo el Golfo de Guayaquil, en la que incluyen los estuarios exteriores, interiores y el estero salado, elaborada a escala 1:25000.

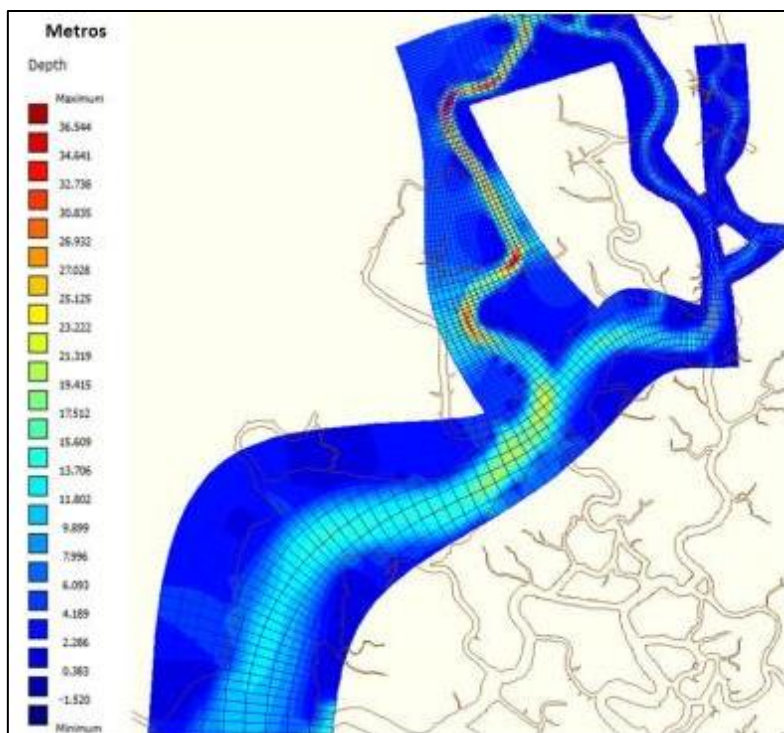


Figura 16 Descripción de la batimetría del área de estudio.

6.2.2 Determinación de las condiciones de contorno.

La condición de contorno se encuentra en la posición Lat. $2^{\circ}24'39.02''$ S ; Long. $80^{\circ}1'9.67''$ O (ver Figura 17), en la que está ubicado el mareógrafo E1 (Figura 7). Se estableció esa ubicación de contorno, debido a que el INOCAR, proporcionó los 96 datos Armónicos (Anexo "A") del mareógrafo E1 (elaborado en base a la serie de datos observados del mareógrafo E1 ente los periodos de septiembre y noviembre del 2009), facilitando la caracterización del ingreso de flujo al modelo hidrodinámico del área de estudio.

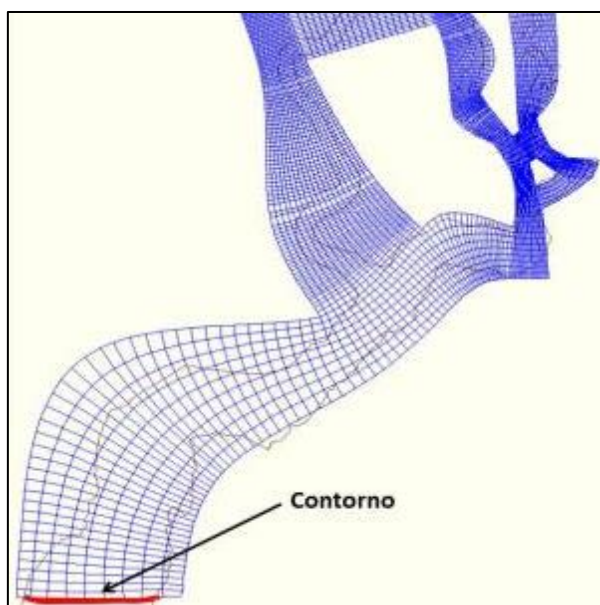


Figura 17 Ubicación del contorno del modelo hidrodinámico

6.3 Calibración del modelo.

La calibración es un proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observadas.

La calibración se realizará considerando la variación del nivel del agua, para lo cual se tratará de conseguir que los datos de nivel de marea simulados por el modelo, se ajusten a la serie de datos de nivel de marea observados, que corresponden a la serie de datos horarios del mareógrafo de la Base Naval Sur (Figura 7). Las series de datos de nivel de marea observadas se encuentran referidas al nivel medio del mar, y conciernen al periodo entre febrero y mayo del 2009, y de igual manera los datos de nivel de marea simulados corresponden a las fechas antes mencionadas.

Los parámetros de calibración del modelo hidrodinámico, están definidos por el coeficiente de rugosidad Manning n y el coeficiente de Viscosidad. A fin de establecer un rango de valores de coeficientes de Manning y Viscosidad, se detalla a continuación el análisis considerado para cada uno de ellos:

6.3.1 Coeficiente de rugosidad Manning n .

Los valores del coeficiente de Manning n , varían en función del tipo de canal. Chow V. T (1959) ofrecen un amplio conjunto de tablas de valores de Manning n , en la Tabla 4 se proporcionan algunos de los valores de Manning n para corrientes naturales, estos valores nos permitirán adaptar un rango de valores Manning n , para los canales que integran el área de estudio (McCutcheon, 1999).



Figura 18 Canales del área de estudio.

Como podemos evidenciar en la Tabla 4 existen ocho rangos de valores de Manning n , en función del tipo de canal. Los canales del área de estudio podrían definirse como lentos, con fondo uniforme, sin piedras, con vegetación, presencia de meandros y tipo de fondo limo (ver Figura 18), por tal motivo se establecieron los siguientes valores de n , 0.025 – 0.030 – 0.035 y 0.040. Estos valores serán ingresados en el modelo, a fin de obtener el mejor resultado de calibración.

Tabla 4 Valores del Coeficiente de rugosidad Manning n de corrientes naturales.

Características del Canal		Mínimo	Medio	Máximo
Canales de corrientes naturales de gran anchura y profundidades < 100 ft				
1	Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, no hay ondulaciones o pozos profundos.	0.025	0.030	0.033
2	Igual que el 1, pero con más piedras y algo de vegetación.	0.030	0.035	0.040
3	Limpias y sinuosas (meandros), algunas piscinas y bancos de arena, remolinos con poca importancia.	0.033	0.040	0.045
4	Igual que el 3, pero con más piedras y algo de vegetación.	0.035	0.045	0.050
5	Lo mismo que el 4, pero inferiores etapas, laderas más ineficaces y sección.	0.040	0.048	0.055
6	Lo mismo que 4, pero más piedras	0.045	0.050	0.060
7	Lentas, profundas, piscinas con vegetación.	0.050	0.070	0.080
8	Lentas, piscinas profundas o cauces de alivio con fuertes soportes de madera y maleza, canales ramificados, vegetación densa.	0.070	0.100	0.150
Nota: Traducción del Inglés a Español de la tabla original.				
Fuente: Chow (1959) y French (1985) James L. Martin Steve C. McCutcheon				

6.3.2 Coeficiente de Viscosidad.

Los parámetros del coeficiente de viscosidad fueron definidos a partir de la fórmula de Elder:

$$\varepsilon = K \Delta_x u \quad (14)$$

donde K es la energía turbulenta y varía de 0.05 – 0.15; Δ_x es el tamaño de las celdas que conforman la malla y está en metros; y u es la velocidad de la corriente del modelo hidrodinámico y esta en m/s.

Para considerar el tamaño de todas las celdas Δ_x de la malla del área de estudio, se realizó una codificación, en la que se toma como valor característico de velocidad 1 m/s, y K se seleccionó tres valores 0.05, 0.1 y 0.15, obteniendo tres ficheros diferentes, que serán ingresados por separado y combinados con los coeficientes de Manning n , durante el proceso de calibración.

6.4 Técnicas estadísticas.

Existen diferentes medidas de error que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos observados y los resultados de la simulación, a continuación se detallan las medidas de error que se utilizarán para el presente estudio:

Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (CE): La eficiencia de Nash-Sutcliffe puede variar desde $-\infty$ a 1. Cuanto más cerca de 1 se encuentra la eficiencia del modelo, más preciso será este (JE Nash, 1970).

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (15)$$

donde E es el coeficiente de eficiencia; Q_o es la medida de las descargas observadas; Q_m sigue el modelo de descarga, y Q_o^t se observa la descarga en el tiempo.

BIAS: Permite evaluar el sesgo entre los valores observados y modelado. Mientras más se acerque a cero, mejor sesgo tendrían los valores observados y modelados.

$$'BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi})} * 100 \quad (16)$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): La Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (Root Mean Squared Error) es una medida de desempeño cuantitativa utilizada comúnmente para evaluar métodos de pronóstico de demanda. En este contexto RMSE consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}} \quad (17)$$

Coeficiente de correlación de PEARSON: El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas. Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta; Si $r = 0$, no existe relación lineal; Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva; y Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa. En esencia, cuanto más cerca de 1 se encuentre r, mejor grado de relación tendrán las dos variables.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (17)$$

6.5 Resultados de Calibración.

En la Tabla 5 se visualizan los resultados de la calibración del modelo hidrodinámico del área de estudio. Como podemos evidenciar el coeficiente de eficiencia en la mayoría de los casos tiene un valor aceptable de 0.94. De igual manera se puede decir que las medidas de error de Pearson, RMSE, BIAS y Relative RMSE abarcan valores eficientes en la mayoría de los casos. El mejor ajuste entre los datos de marea simulados y observados, corresponden a un coeficiente Manning n 0.025 y Viscosidad con el parámetro K = 0.15.

Tabla 5 Resultados de la calibración en base a técnicas estadísticas establecidos en el punto 6.4.

	Manning 0.025- Viscosidad-K-0.05	Manning 0.025- Viscosidad-K-0.10	Manning 0.025- Viscosidad-K-0.15	Manning 0.030- Viscosidad-K-0.05	Manning 0.030- Viscosidad-K-0.10	Manning 0.030- Viscosidad-K-0.15
BIAS	0.054	0.091	0.09	0.092	0.092	0.092
RMSE	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Relative RMSE	6.18	6.08	6.05	6.11	6.08	6.07
rho	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
Pearson	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
CE	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
	Manning 0.035- Viscosidad-K-0.05	Manning 0.035- Viscosidad-K-0.10	Manning 0.035- Viscosidad-K-0.15	Manning 0.035- Viscosidad-K-0.05	Manning 0.035- Viscosidad-K-0.10	Manning 0.035- Viscosidad-K-0.15
BIAS	0.093	0.093	0.093	0.095	0.095	0.094
RMSE	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29
Relative RMSE	6.12	6.13	6.15	6.2	6.24	6.29
rho	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
Pearson	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
CE	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93

Acontinuación se describe los principales parametros conciderados en el resultado final de la calibración:

- Coeficiente de eficiencia (CE) = 0.94: como estable este CE, mientras más se acerque el resultado a uno, más preciso será el modelado, entonces podemos indicar que esta deducción representa un buen ajuste entre los datos modelados y los reales.
- BIAS = 0.09: mientras más se acerque a cero, mejor sesgo tendrían los valores observados y modelados, y vemos que este resultado refleja un buen sesgo entre los datos modelados y reales.
- Pearson = 0.98: Como el rango de resultado esta entre $0 < r < 1$, existe una correlación positiva entre los datos modelados y observados.

En la Figura 19 representamos tres gráficas del resultado de la calibración del parametro Manning n 0.025 y Viscosidad K = 0.15. El grafico superior representa el ajuste entre la onda de marea simulado (rojo) y observado (azul), el gráfico izquierdo inferior representa la correlación que existe entre las dos variables y finalmente el gráfico derecho inferior representa la distribución de los errores modelado y observado, pudiendo indicar que mientras más se aproxime a una distribución normal y representen una muy buena simetría mejores son los resultados del ajuste entre los datos observados y modelados.

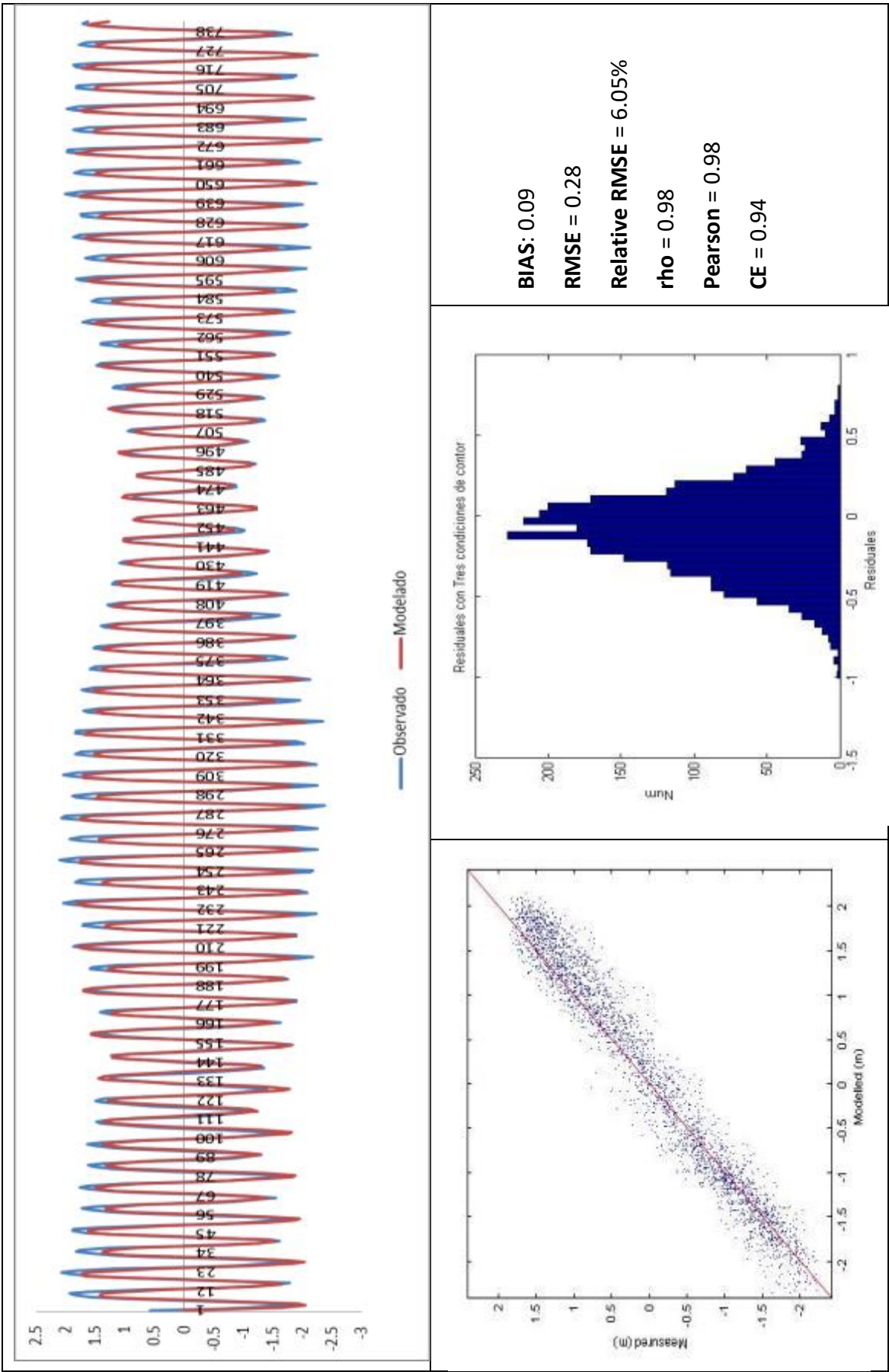


Figura 19 Ajuste de los datos observados del mareógrafo de la Base Naval Sur y datos de simulación del modelo con coeficiente Manning 0.025 y Viscosidad – K 0.15.

6.6 Validación del modelo.

El modelo es validado con un conjunto de datos independientes. Esto es importante para asegurar que la salida de los datos del modelo no son efectos del modelo de formalización, y los procesos en el modelo de hecho representan la realidad y no son construcciones simplemente empíricos basados en los parámetros de calibración. Este proceso se denomina validación (Voinov, 2008) . Las medidas de error para la validación de los datos simulados y observados serán los mismos que se emplearon en la calibración.

Para la validación se utilizarán datos de tres mareógrafos localizados dentro del área de estudio, el primero es el mareógrafo E1, el segundo el mareógrafo de la Base Sur y el tercero el de Puerto Nuevo, la localización de los mareógrafos se la visualizan en la Figura 7.

Ajuste en el contorno del modelo, en la que se verifica que los datos observados correspondientes a la serie de datos entre septiembre y noviembre del 2009 del mareógrafo E1, se ajusten a los datos de marea simulados entre septiembre y noviembre del 2009. Punto de observación del modelo ubicado en el contorno.

Como podemos ver en la Figura 20, los resultados de las medidas de error, son muy buenos, con esto podemos validar que los fluidos de agua simulados que ingresan al modelo hidrodinámico son correctos. Podemos ver también las gráficas, que reflejan los buenos resultados de las medidas de error, en especial la gráfica que más resalta, es la de correlación y la de ajustes de los datos de marea observada y simulada.

Ajuste en el mareógrafo de la Base Naval Sur, en este caso se considera los datos observados del mareógrafo de la Base Naval Sur, pero con un periodo diferente de tiempo al del calibrado, se seleccionaron los datos entre los meses de julio a octubre del 2008, y se verificara su ajuste a los datos simulados del modelo, entre los meses de julio a octubre del 2008. Los parámetros de Manning n y Viscosidad serán iguales a los del resultado final de la calibración.

Los resultados de índices de calidad de ajuste del mareógrafo de la Base Naval Sur, reflejaron mejores medidas de error que los calibrados (ver Figura 21), esto evidencia que los parámetros de calibración seleccionados son adecuados. Podemos ver también las gráficas, que reflejan los buenos resultados de las medidas de error, en especial la gráfica que más resalta, es la de la función de distribución normal, seguida de la correlación y la de ajustes de los datos de marea observada y simulada.

Ajuste en el mareógrafo de Puerto Nuevo, se validara el ajuste de los datos de marea del mareógrafo de Puerto Nuevo entre los meses de octubre y noviembre del 2009, y los datos de marea simulados del modelo hidrodinámico entre los meses de octubre y noviembre del 2009, y considerando los mismos parámetros de los resultados de la calibración.

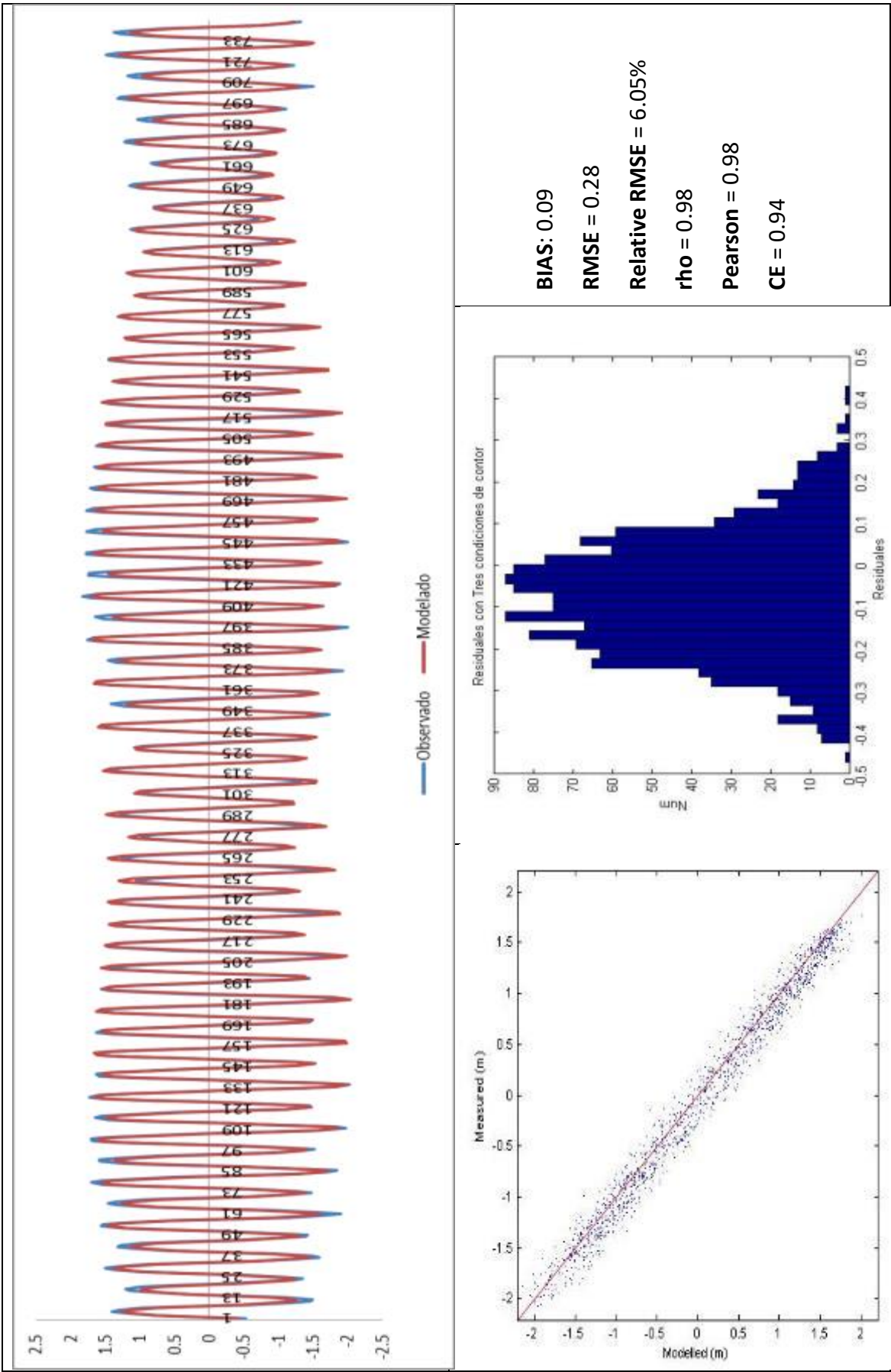


Figura 20 Ajuste de los datos observados del mareógrafo E1 y datos de simulación del modelo, puto de observación de simulación ubicado en el contorno.

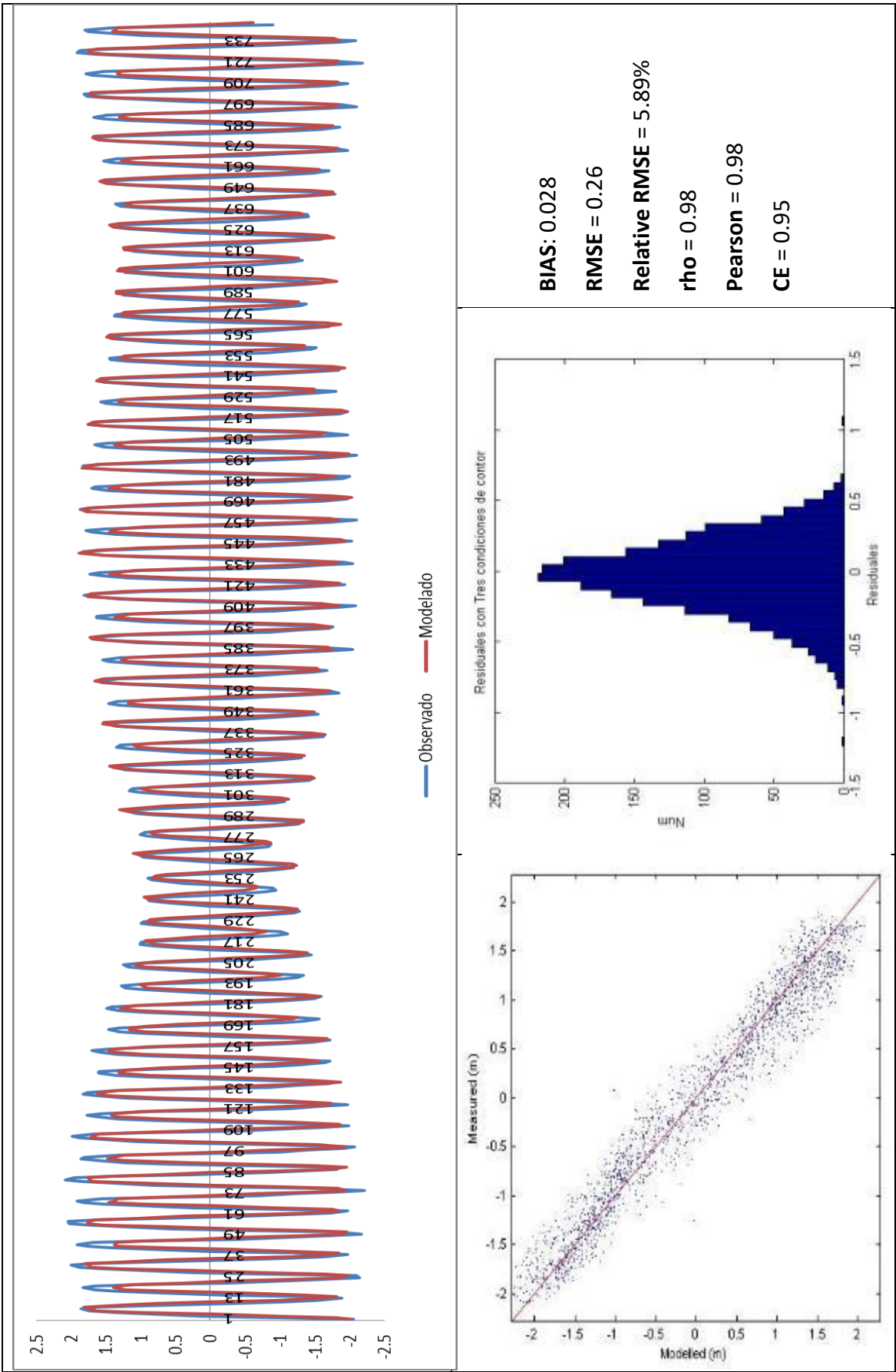


Figura 21 Ajuste de los datos observados del mareógrafo de la Base Naval Sur y datos de simulación del modelo, puto de observación de simulación ubicado en la Base Naval Sur.

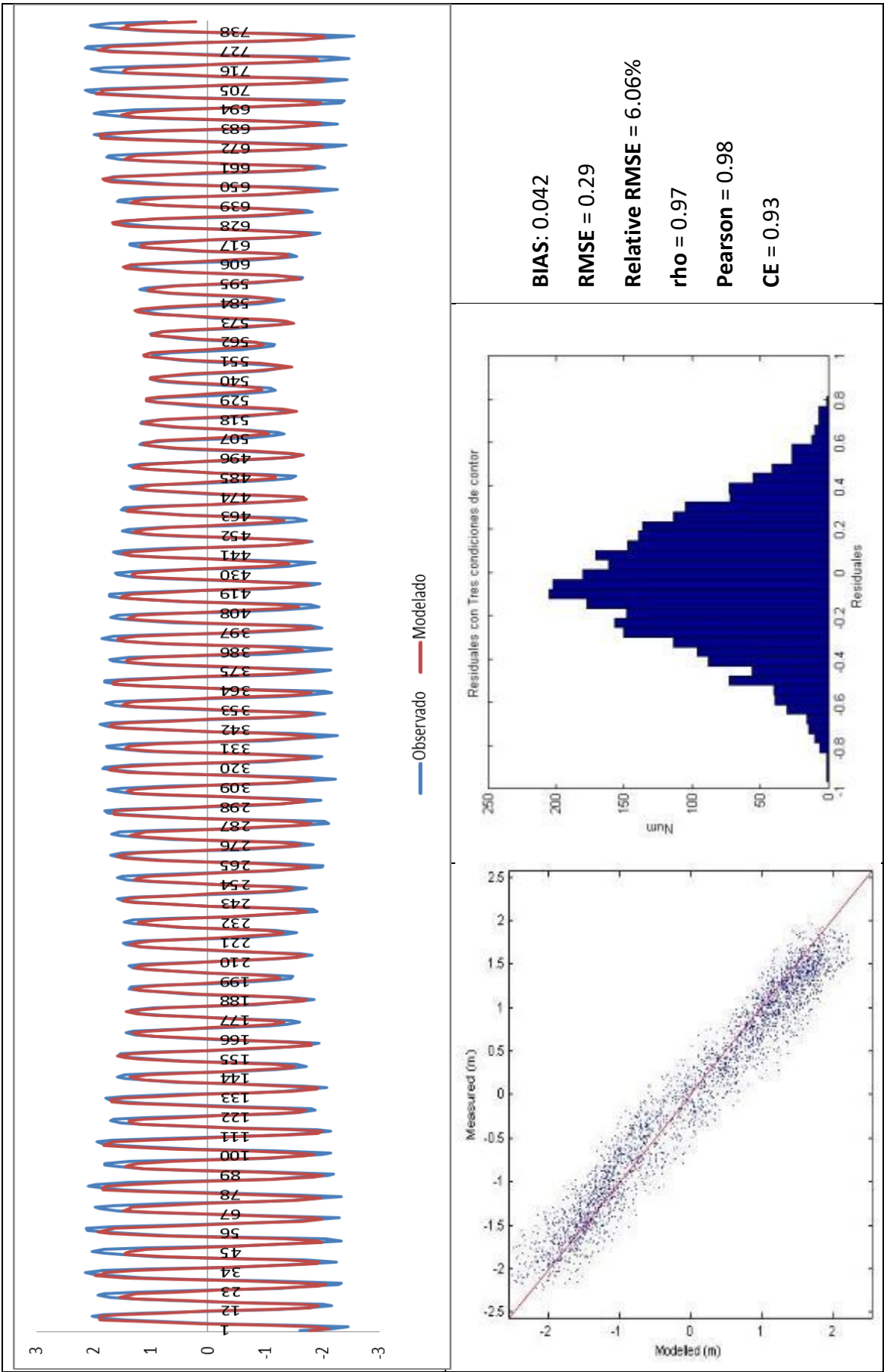


Figura 22 Ajuste de los datos observados del mareógrafo Puerto Nuevo y datos de simulación del modelo, puto de observación de simulación ubicado en el mareógrafo de Puerto Nuevo.

En la Figura 22, vemos que los resultados de las medidas de error de los datos observados y simulados del mareógrafo de Puerto Nuevo son adecuados, permitiendo validar los parámetros finales de calibración (Manning 0.025 y Viscosidad – K 0.15). Podemos ver también las gráficas, que reflejan los buenos resultados de las medidas de error, en especial la gráfica que más resalta, es la de la función de la correlación, seguida de la distribución normal y la de ajustes de los datos de marea observada y simulada.

6.7 Simulaciones del modelo hidrodinámico.

Una vez calibrado y valida el modelo hidrodinámico, se realizará las simulaciones de tres amplitudes de marea. Para lo cual se establece las mareas muertas, medias y vivas con una amplitud de marea de 1.17, 1.64 y 1.98 respectivamente (ver Figura 11). Estas amplitudes corresponden al dato armónico M2 (principal componente lunar) que será modificado para cada caso de marea. EL modelo hidrodinámico se lo ejecutara en un periodo de tiempo de 72 horas, y sus resultados son las velocidades de corrientes de toda el área modelada.

A fin de comprar los resultados de velocidades de corrientes del área de estudio, se extraen datos de velocidad de un punto de observación del modelo, que se encuentra ubicado en el medio marítimo de la Base Naval (puntos de vertido). En las Figura 23, Figura 24 y Figura 25, se reflejan las velocidades de corrientes para los tres tipos de amplitudes de mareas, y vemos que en mareas muertas su velocidad máxima es de 0.8 m/s, en mareas medias su velocidad máxima es de 0.12 m/s y en mareas vivas su velocidad máxima de 0.14 m/s.

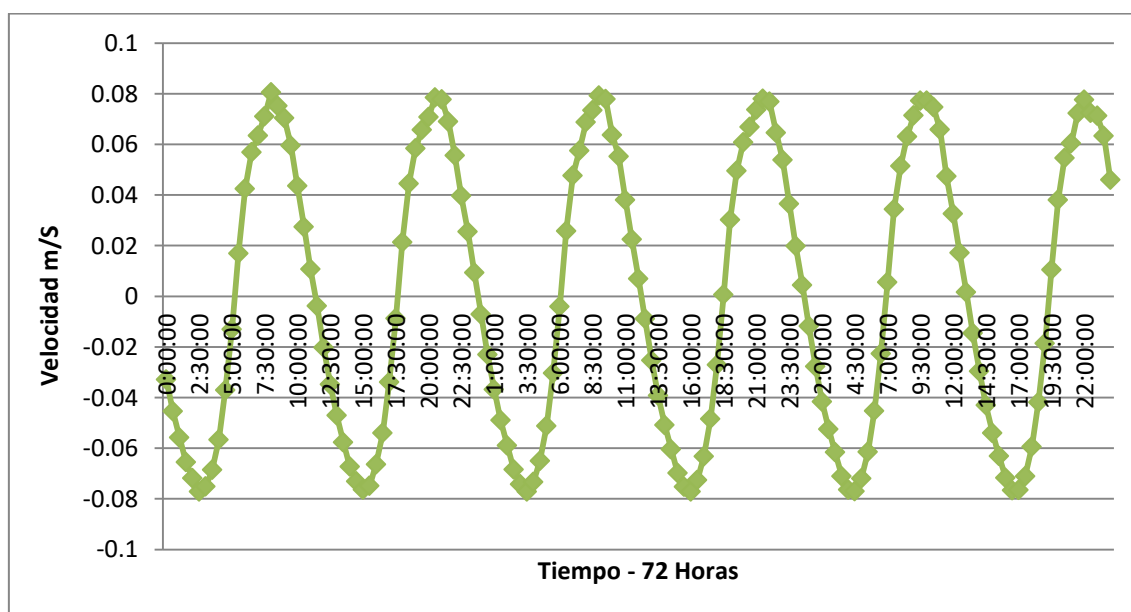


Figura 23 Velocidades de corriente en el medio marítimo de la Base Naval Sur –Mareas Muertas

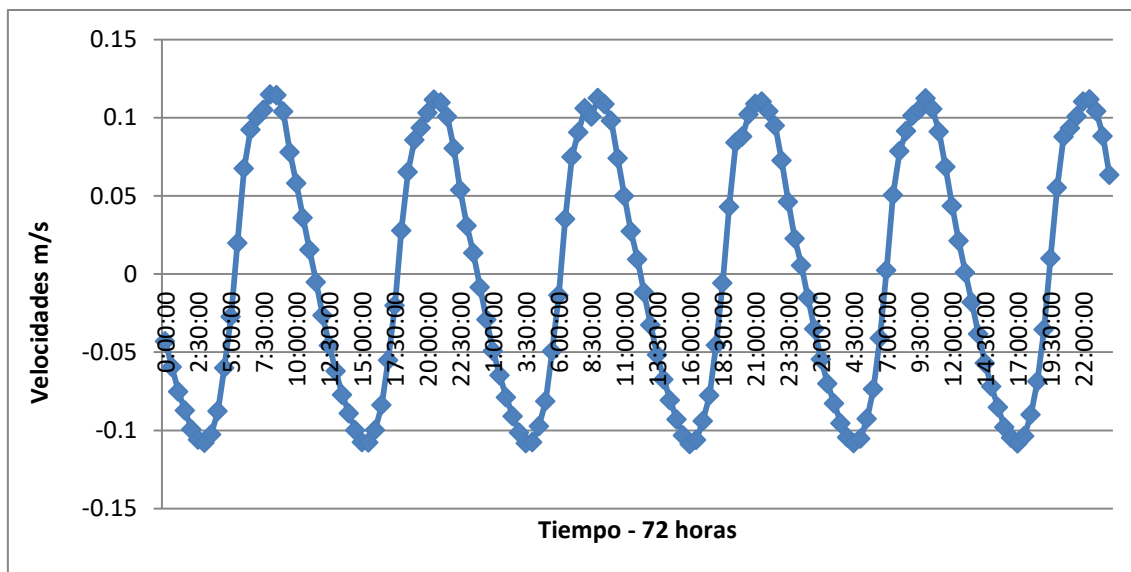


Figura 24 Velocidades de corriente en el medio marítimo de la Base Naval Sur – Mareas Medias

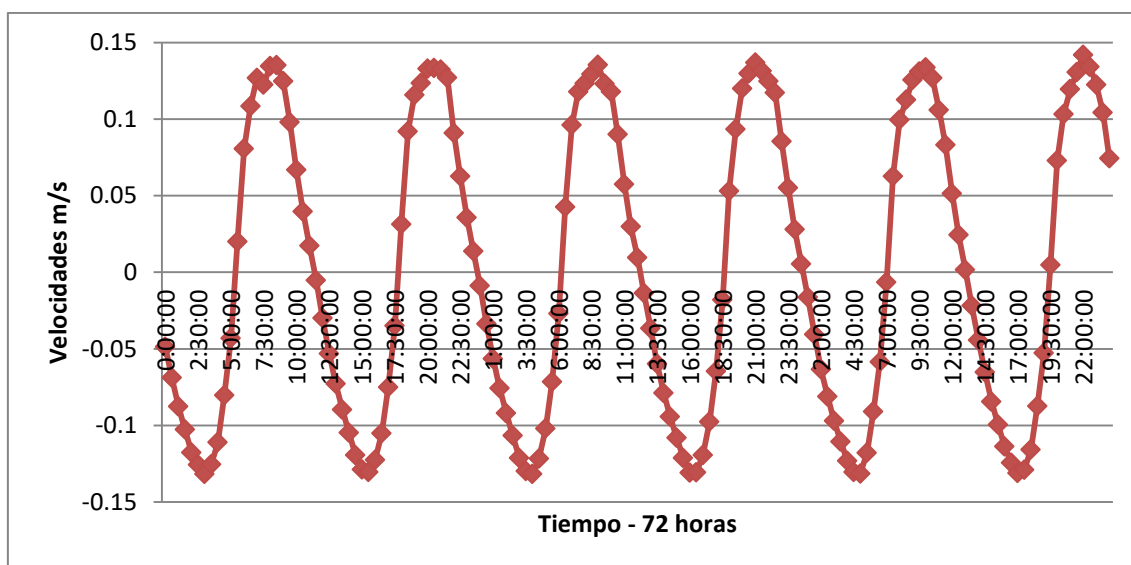


Figura 25 Velocidades de corriente en el medio marítimo de la Base Naval Sur – Mareas Vivas

Los resultados de velocidades de corriente en el medio marítimo de la Base Naval son muy bajos, esto es porque los flujos de agua saliente y entrante que existe en los canales interiores del área de estudio son relativamente mínimos, debido a que solo interactúa los flujos de agua salada provenientes del Golfo de Guayaquil.

7. Modelo de escenarios de derrame.

7.1 Selección de puntos críticos de vertido y tramos receptores de contaminante.

La selección de los puntos críticos de vertido se define de acuerdo a los sectores donde más se realice transferencias de combustible, actividad que se realiza en los muelles de la Base Naval Sur. En los muelles de CODESC atracan los Buques de Guerra y el tipo de combustible que usan

es DIESEL. Los muelles de CODESC se encuentran divididos en dos secciones de transferencia de combustible, la primera en donde se atracan los Buques Navales tipo Fragatas, Auxiliares y Submarinos, y la segunda es donde se atracan las Corbetas Misileras y Lanchas Misileras (ver Figura 5), por lo cual se establecieron en CODESC dos puntos críticos de vertidos de combustible tipo DIESEL. La otra área de muelles de la Base Naval Sur es COGUAR, en sus muelles atracan la Lanchas Guardacostas que usan dos tipos de combustible DIESEL y GASOLINA, por lo cual se establecieron en COGUAR dos puntos críticos de vertidos, uno de combustible tipo DIESEL y el otro de GASOLINA. En total tenemos 06 puntos críticos de vertido en los muelles de la Base Naval Sur (ver Figura 26 y Tabla 6).

Tabla 6 Detalle de los Puntos Críticos de Vertido.

Punto Crítico de Vertido	Tipo de Hidrocarburo	Volumen del Hidrocarburo m ³
Fragatas	DIESEL	0.4
Corbetas	DIESEL	0.4
COGUAR	DIESEL	0.4
COGUAR	GASOLINA	0.1

Los tramos receptores de combustible son definidos por el nombre característico de los lugares aledaños a los puntos de vertido, y en el caso de la sección de manglar, se dividieron de acuerdo a los canales de entrada que integran toda la zona de manglares. En

total son 11 tramos receptores de combustible que se encuentra distribuidos a lo largo y ancho de los puntos críticos de vertido (ver Figura 26).

El cálculo del volumen de hidrocarburo derramado, es en base a los bitácoras de registros de tiempos de recepción de combustible que posee cada Buque y Lancha Naval (Documento Reservado). Una vez realizado el análisis de los registros, se define que para el tipo de combustible DIESEL se vierte una cantidad de volumen de 0.4 m³ (400 galones) y en el caso de la GASOLINA 0.1 m³ (100 galones) (ver Tabla 6).



Figura 26 Ubicación de Puntos Críticos de Vertido y Tramos Receptoras de Combustible.

7.2 Modelado numérico del derrame.

7.2.1 Descripción de TESEO y sus ecuaciones.

El modelo TESEO es un modelo de transporte y degradación de hidrocarburos, desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (www.ihcantabria.com), para su utilización operacional en la lucha contra la contaminación por hidrocarburos en el medio marino. El modelo TESEO ha sido desarrollado en el marco de dos proyectos: el proyecto ESEOO, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y el proyecto “Programa de predicción, protección y evaluación del vertido del buque Prestige en las costas de Cantabria”, financiado por el Gobierno de Cantabria.

Está constituido por un modelo de transporte y un modelo de envejecimiento del hidrocarburo. El modelo de transporte es un modelo Lagrangiano bidimensional, que calcula el movimiento tanto de hidrocarburos como de objetos flotantes y personas a la deriva. Este modelo está basado en el modelo PICH, desarrollado por la Universidad de Cantabria durante el accidente del Prestige (Castanedo et al., 2006). El transporte se simula mediante la suma de partículas que se mueven de forma independiente, por efecto del viento, oleaje, corrientes y la difusión turbulenta. El modelo Lagrangiano resuelve la siguiente ecuación:

$$\frac{dx_i}{dt} = U_a(x_i, t) + U_d(x_i, t) \quad (18)$$

donde X_i es la coordenada (X,Y) de la partícula i ; U_a es la velocidad advectiva de la partícula en esa coordenada, y U_d es la velocidad difusiva.

La velocidad advectiva, U_a , se calcula como la combinación lineal de la acción del viento, del oleaje y de las corrientes, siguiendo la siguiente expresión:

$$U_a(t) = U_C + C_H U_H + C_D U_V \quad (19)$$

donde U_C es la velocidad superficial de la corriente; U_H es la deriva de Stokes producida por el oleaje; U_V es la velocidad del viento a 10 m de la superficie; C_H es el coeficiente de arrastre del oleaje, y C_D es el coeficiente de arrastre del viento.

La deriva de Stokes se calcula en base a la formulación propuesta por Dean y Dalrymple (1991):

$$U_H = \frac{gH}{8C} \quad (20)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, H es la altura de ola significativa y C es la celeridad del tren de ondas. En este trabajo y dado la escasa relevancia del oleaje en la zona de estudio, el modelo se ha forzado con viento y corrientes.

La velocidad turbulenta se obtiene mediante un proceso de Monte Carlo en el que la velocidad de difusión varía en el intervalo $[-\vec{U}_d, \vec{U}_d]$ y se considera proporcional a los coeficientes de difusión (Hunter et al., 1993). En cada paso de tiempo, el desplazamiento difusivo aleatorio de una partícula se define como:

$$|\vec{U}_d| = \sqrt{\frac{6D}{\Delta t}} \quad (21)$$

donde D es el coeficiente de difusión. Este coeficiente presenta valores distintos en función de si modelados en medio marino o en medio fluvial.

El modelo de degradación considera los procesos de emulsión (Mackay et al. (1980) y evaporación (Stiver y Mackay 1984) que son los procesos más relevantes en cuanto al balance de masa y a los efectos en la escala temporal de respuesta ante un derrame. Estos procesos afectan a las propiedades físico-químicas y a la cantidad de hidrocarburo que permanece en el agua, por lo que el modelo proporciona la evolución temporal de estas propiedades y el balance de masa tanto del hidrocarburo como del producto emulsionado. Asimismo, el modelo tiene en cuenta en el balance de masa la llegada de contaminante a la costa. En caso de que una partícula de hidrocarburo llegue a costa, esta se identifica como varada y se retira del proceso computacional.

Cabe destacar que el modelo TESEO ha sido calibrado y validado a escala regional y local mediante la realización de ejercicios con boyas de deriva, tanto a nivel nacional como internacional. Con respecto a la escala regional, el modelo ha sido calibrado y validado con boyas de deriva lanzadas durante el accidente del Prestige y en diferentes ejercicios de salvamento y lucha contra la contaminación marina realizados por Salvamento Marítimo (Abascal et al., 2007; Sotillo et al., 2008; Abascal et al., 2009a, b). Concretamente, el modelo TESEO se ha aplicado satisfactoriamente en ejercicios operacionales realizados tanto en el Mediterráneo (Ejercicios “Mediterráneo 2005”, “Mediterráneo 2008”), como en el Atlántico (Ejercicios “Gijón 2006”, “Finisterre 2006”, “Gascogne 2007”, “Vigo 2007” y “Santander 2010”). También ha sido calibrado y validado con boyas de deriva lanzadas en el mar del Norte, concretamente en la zona de Shetland-Orkney (Norte de Escocia) (Cárdenas et al., 2015). Asimismo, el modelo ha sido calibrado y validado a escala local, mediante la realización de ejercicios con boyas de deriva en la bahía de Belfast (Irlanda del Norte), ría de Huelva y en la bahía de Algeciras (Castanedo et al., 2012; Abascal et al., 2015).

Por otro lado, el modelo de degradación ha sido validado mediante datos de experimentos de laboratorio con diferentes tipos de hidrocarburo desarrollados por CEDRE (Centre de documentation de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux)

en el marco del proyecto SPRES (Oil Spill Prevention and Response at Local Scales) (2012-2014), proyecto INTERREG del programa Área Atlántica (Castanedo et al. 2014).

7.2.2 Parámetros de configuración de TESEO.

Para la implementación del modelo TESEO en el área de estudio se ha considerado los siguientes parámetros de forzamiento propios del modelo. Los que se detallan a continuación:

- “Coeficiente de arrastre del viento CD ”: el sistema proporciona un valor por defecto, $\alpha=0.03$ y $\beta=0$, que representa un arrastre del 3% de la velocidad del viento (ASCE, 1996); (Reed et al. 1994).
- “Coef. Difusión D ”: coeficiente de difusión turbulenta. El sistema proporciona una ayuda con el rango de variación recomendado (entre 1 y 100 m^2/s) (ASCE, 1996); (Viikmäe et al., 2013); (Abascal et al., 2012). Valor de $D = 2 m^2/s$.
- “Número de partículas”: número de partículas con las que se realiza la ejecución. Por defecto se consideran 1000 (Barker y Galt, 2000).
- “Intervalo de tiempo Dt (s)” paso de tiempo del modelo numérico, considerando por defecto 60 s. Se recomienda utilizar este valor al utilizar el módulo de degradación del hidrocarburo.

Además hay otros parámetros propios del área de estudio, como la salinidad y temperatura, que se detallan a continuación:

- Temperatura, existen dos épocas estacionales en los estuarios interiores, la primera que es la sequía, considerada entre los meses de agosto a noviembre, y la de lluvia establecida entre febrero y mayo. En la época seca la temperatura es de $25^{\circ}C$ y va en aumento hasta unos $3^{\circ}C$ en la época de lluvia, hasta alcanzar una temperatura superficial del agua de $28^{\circ}C$ (Stevenson, 1981). Por lo expuesto se consideró como valor de temperatura = $26^{\circ}C$.
- Salinidad, los cambios de salinidad en los estuarios interiores son producto del gran aporte que existe de agua dulce. En la época de sequía la salinidad alcanza unos 30 ‰, disminuyendo paulatinamente en la época de lluvia hasta 20 ‰ (Stevenson, 1981). Por lo expuesto se consideró como valor de salinidad = 23 ‰.

7.2.3 Número de simulaciones.

Una vez definido los parámetros de entrada y los escenarios océano – meteorológicos, se puede calcular el número total de los escenarios a simularse. En la Figura 27 se identifica el número de escenarios totales a simularse.



Figura 27 Número total de simulaciones.

A modo de ejemplo y para mostrar los resultados del modelado numérico del derrame, en las Figura 28, Figura 29, Figura 30 y Figura 31 se puede visualizar las simulación de los escenarios de derrame más representativos, en la que se consideró los parámetros de entrada, como los puntos críticos de vertido, tipo de combustible, tramos receptores de combustible, y los escenarios océano- meteorológicos, como la dirección y velocidad del viento y la carrera y fase de la marea. El tiempo de simulación de los escenarios es de 24 horas.

Se puede visualizar en los resultados de las simulaciones de escenarios de derrame, que el principal factor océano- meteorológico que influye en la evolución de la trayectoria del hidrocarburo es la velocidad y dirección del viento, debido a que las corrientes en el área del vertido del hidrocarburo son muy bajas. Las fases de marea influyen en la aceleración y retraso de las trayectorias del hidrocarburo. En algunos escenarios de derrame se ha evidenciado que la mancha del hidrocarburo ha permanecido en el punto críticos de vertido, y a veces se dirigen directamente a los muelles más cercanos. Como por ejemplo, en el punto crítico de vertido de Corbetas, con una escenario en fase de marea – bajamar, la trayectoria del hidrocarburo se dirige directamente a los muelles de las Corbetas.

Los tiempos de trayectoria del hidrocarburo tienen una duración máxima de 8 horas. Además se visualiza que el hidrocarburo llega a los tramos receptores en menos de 30 minutos, y en otros casos entre 1 y 2 horas.

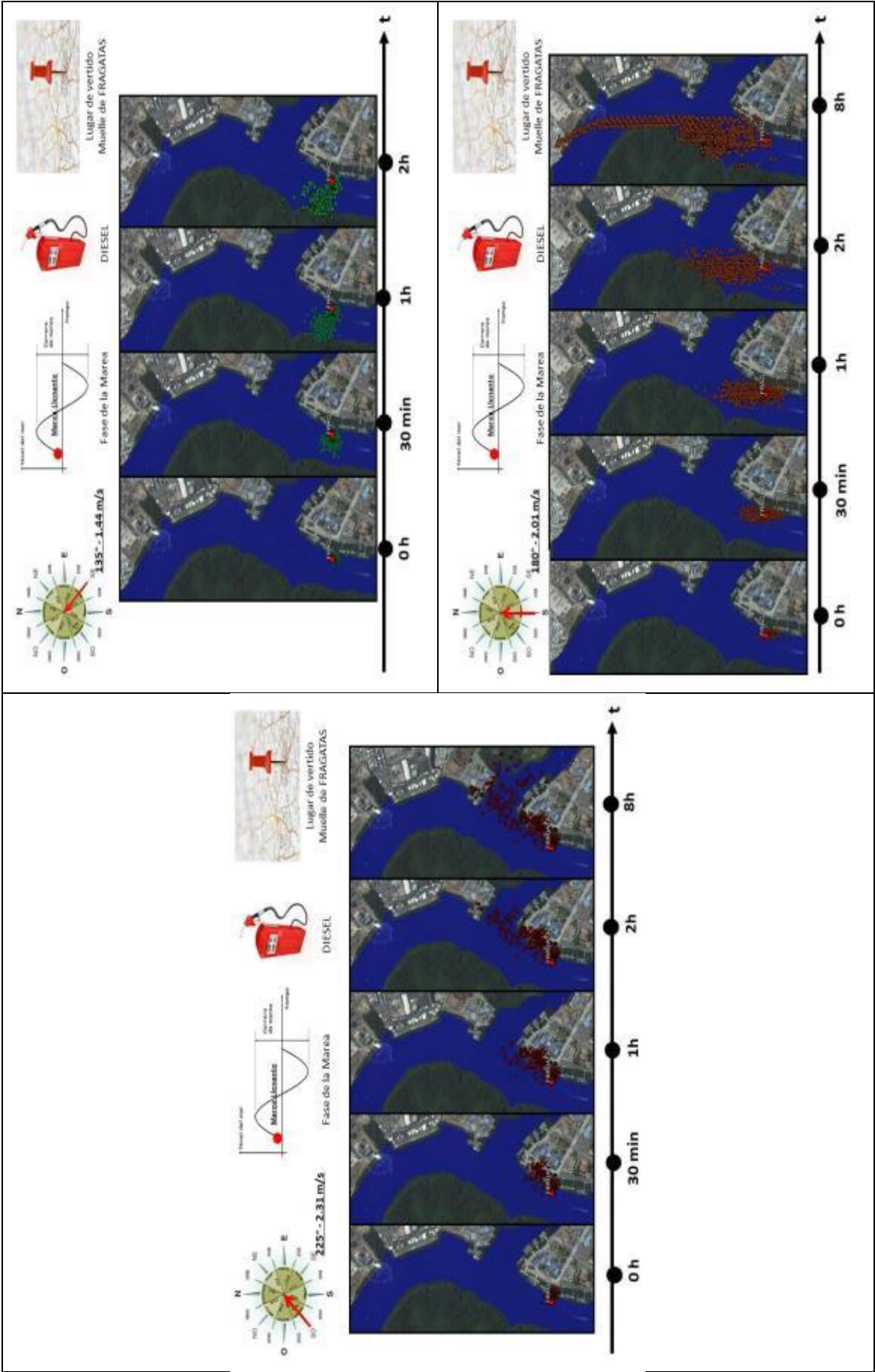


Figura 28 03 Escenarios diferentes simulados desde un mismo punto de vertido ubicado en el muelle de Fragata.

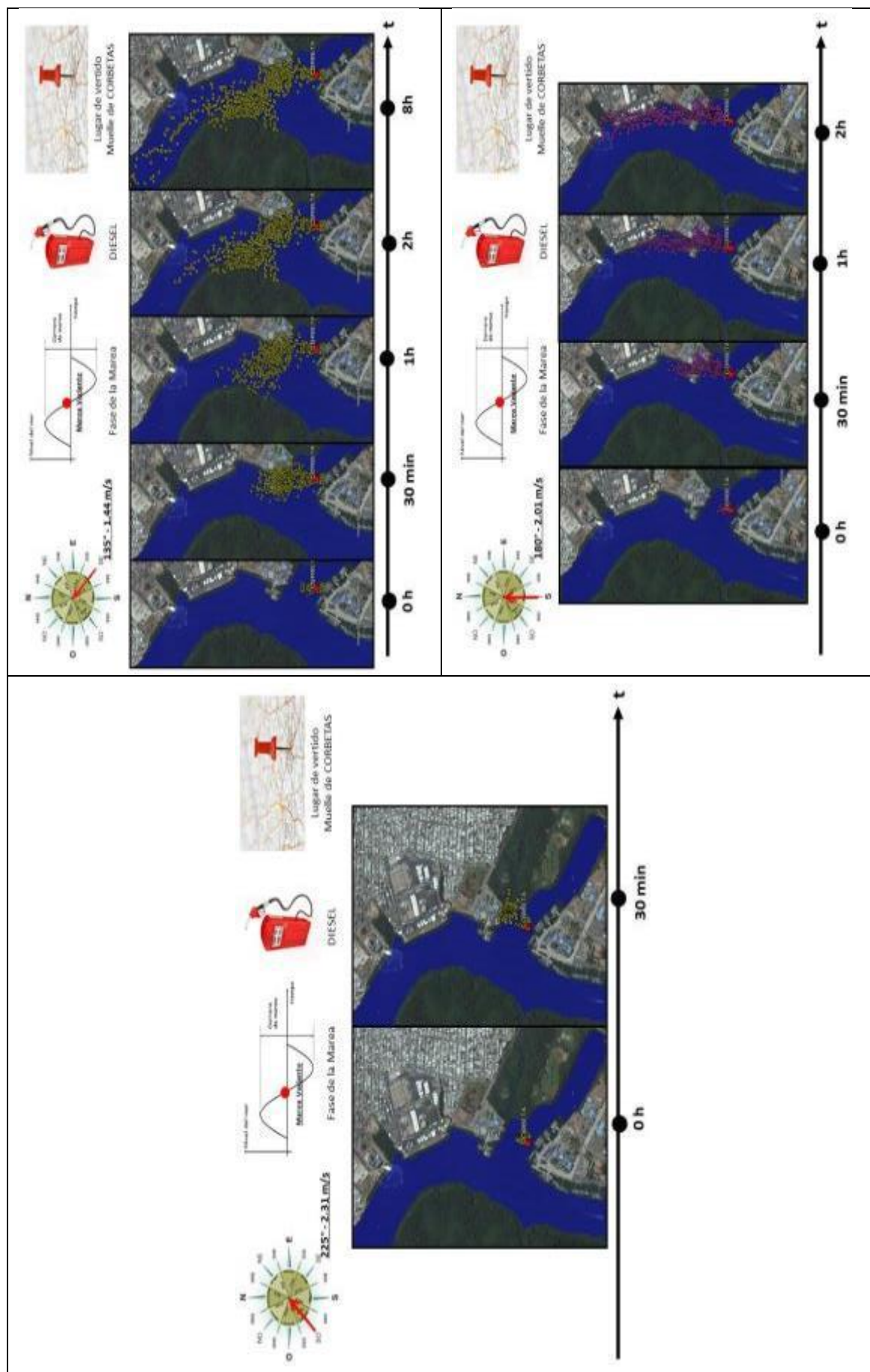


Figura 29 03 Escenarios diferentes simulados desde un mismo punto de vertido ubicado en el muelle de Corbetas.

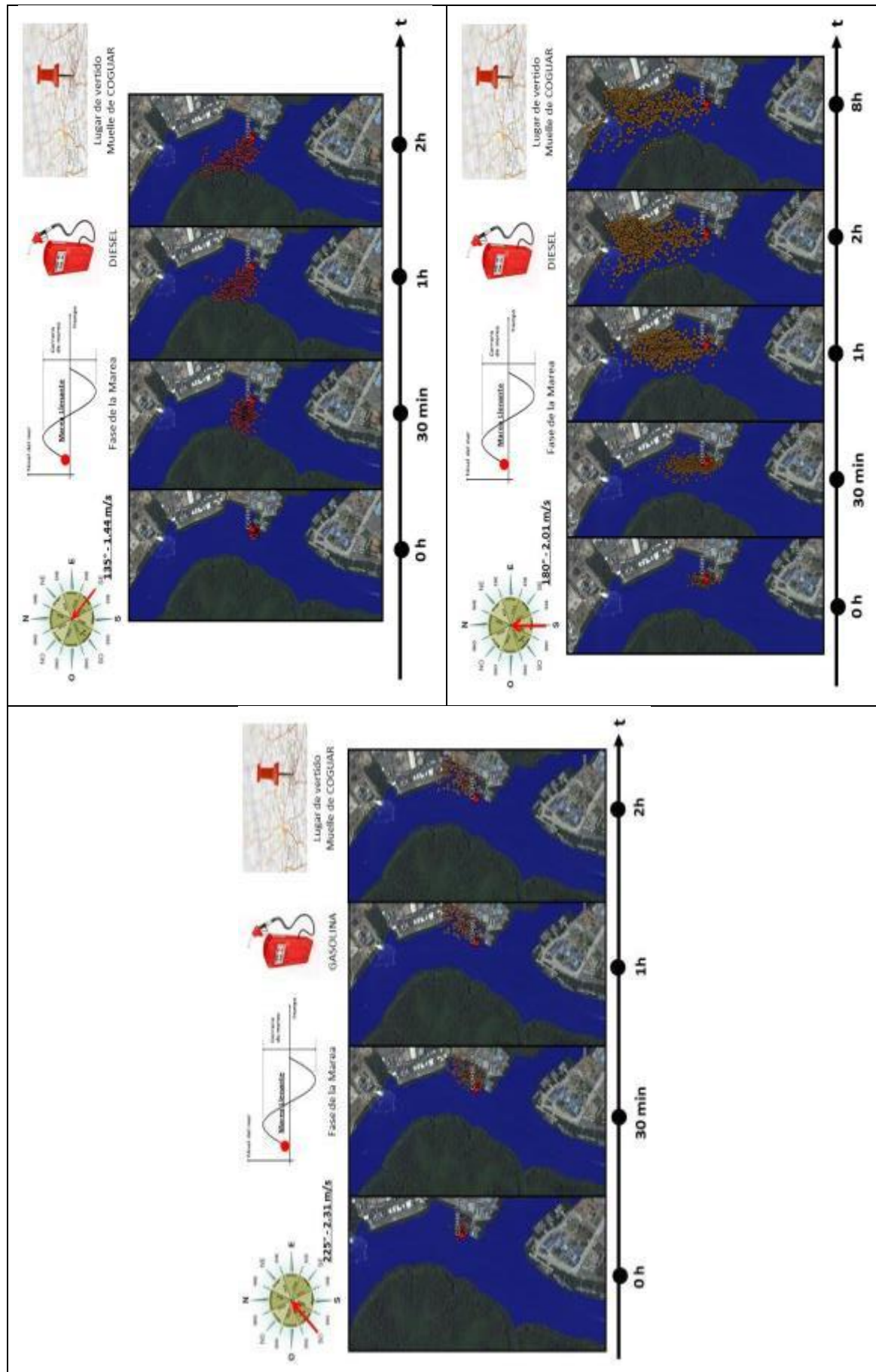


Figura 30.03 Escenarios diferentes simulados desde un mismo punto de vertido ubicado en el muelle de COGUAR.

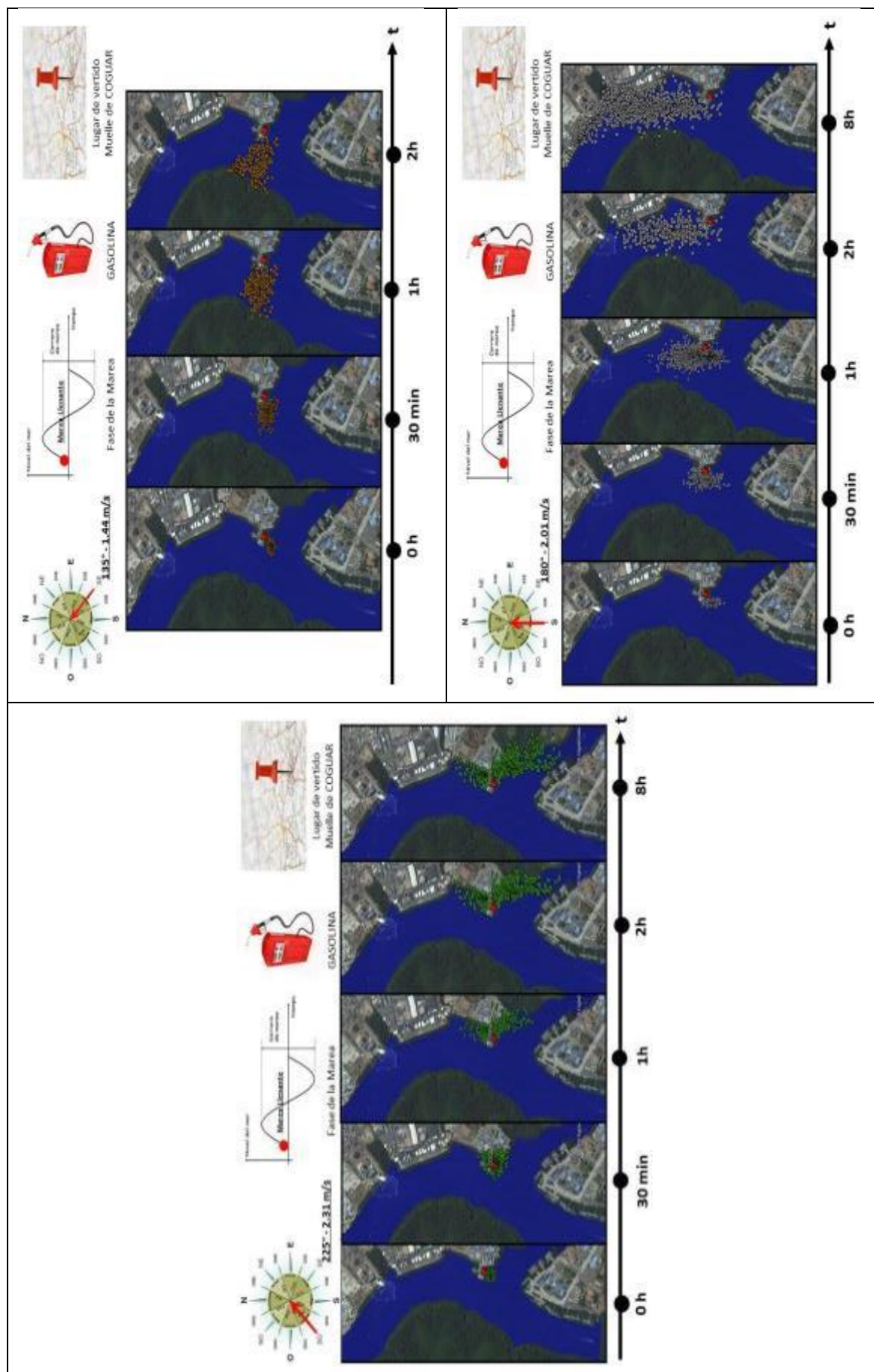


Figura 31 03 Escenarios diferentes simulados desde un mismo punto de vertido ubicado en el muelle de COGUAR - GASOLINA.

7.3 Análisis estadístico.

La base de datos de trayectorias de derrames descrita en el apartado 7.2.3 proporciona, para cada punto de vertido y escenario océano – meteorológicos, el producto depositado si llegó a los tramos receptores y el tiempo de arribada. Dado un punto de vertido, el análisis estadístico de todos los escenarios simulados proporciona para cada punto receptor en la costa, la probabilidad de contaminación.

En primer lugar, la probabilidad de cada escenario de derrame, $P(W_i, CM_j, FM_k)$ se calcula teniendo en cuenta la probabilidad de cada grupo de viento (P^{W_i}), del rango de marea (P^{CM_j}) y de la fase de la marea (P^{FM_k}).

$$W_i \{ i = 1, 2, \dots, N_W \}, \{ P^{W_1}, P^{W_2}, \dots, P^{W_{N_W}} \} \rightarrow \sum_{i=1}^{N_W} P^{W_i} = 1 \quad (21)$$

$$CM_j \{ j = 1, 2, \dots, N_{CM} \}, \{ P^{CM_1}, P^{CM_2}, \dots, P^{CM_{N_{CM}}} \} \rightarrow \sum_{j=1}^{N_{CM}} P^{CM_j} = 1 \quad (22)$$

$$FM_k \{ k = 1, 2, \dots, N_{FM} \}, \{ P^{FM_1}, P^{FM_2}, \dots, P^{FM_{N_{FM}}} \} \rightarrow \sum_{k=1}^{N_{FM}} P^{FM_k} = 1 \quad (23)$$

$$P(W_i, CM_j, FM_k) = P^{W_i} \cdot P^{CM_j} \cdot P^{FM_k} \rightarrow \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^{CM} \sum_{k=1}^{FM} P(W_i, CM_j, FM_k) = 1 \quad (24)$$

En segundo lugar, para cada escenario se calcula la probabilidad de que una partícula alcance la costa:

$$P_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & \text{si la partícula alcanza la costa} \\ 0, & \text{si la partícula no alcanza la costa} \end{cases} \quad (25)$$

Posteriormente, para un punto de vertido y un horizonte temporal, la probabilidad de llegada de contaminación a cada tramo receptor para un escenario océano-meteorológico específico se calcula como:

$$P_{i,j,k}^T = P^{W_i} \cdot P^{CM_j} \cdot P^{FM_k} \cdot P_{i,j,k} \quad (26)$$

Finalmente, la probabilidad de contaminación en cada tramo receptor (expresada en porcentaje) se calcula como la suma de las probabilidades de ocurrencia de cada escenario que determina la llegada de hidrocarburo a dichos tramos:

$$P^T = \sum_{i=1}^{N_W} \sum_{j=1}^{N_{CM}} \sum_{k=1}^{N_{FM}} P_{i,j,k}^T \quad (27)$$

7.4 Resultados.

Los mapas de probabilidad de contaminación, que integran el resultado de todas las simulaciones, se presentan en las Figura 32, Figura 33, Figura 34 y Figura 35. Cada figura representa un punto crítico de vertido, divididas por intervalos de tiempo de llegada del contaminante a los tramos receptoras, y se establecieron tiempos de llegada de 30 minutos, 1, 2 Y 8 horas.

Tabla 7 Rangos de probabilidades.

% PROBABILIDAD
100 - 80 %
80 - 60 %
60 - 40%
40 - 20%
0 - 20%
0%

Descripción de los mapas: Los mapas representan los tramos receptores más probables a contaminarse, en diferentes periodos de tiempo. El valor de probabilidad P^T de cada tramo receptor, está reflejado en una tabla (ver Tabla 8), de igual manera, la probabilidad esta representada con colores, para lo cual se estableció un rango de probabilidades y se le asignó un color, mientras menor sea el rango de probabilidad menor es la intensidad del color, y a medida que suben los rangos de probabilidad aumentan el nivel de intensidad del color (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Los tamos receptores del contaminante y los puntos críticos de vertido se establecieron en el apartado 7.1, y sus probabilidades se reflejan en sus costas, con un color que define un rango de probabilidad. De igual manera el tipo de combustible y volumen de hidrocarburo a ser derramar se especifican en el apartado 7.1.

Tabla 8 Tramos receptores con su valor de probabilidad.

UBICACIÓN	% PROBABILIDAD 8 HORAS
FRAGATA	0%
CORBETA	5%
COGUAR	74%
PUERTO - PRIVADO	61%
TERMO.ELECTRICA	42%
MANGLAR SEC 01	0%
MANGLAR SEC 02	11%
MANGLAR SEC 03	74%
MANGLAR SEC 04	63%
MANGLAR SEC 05	0%
MANGLAR SEC 06	0%

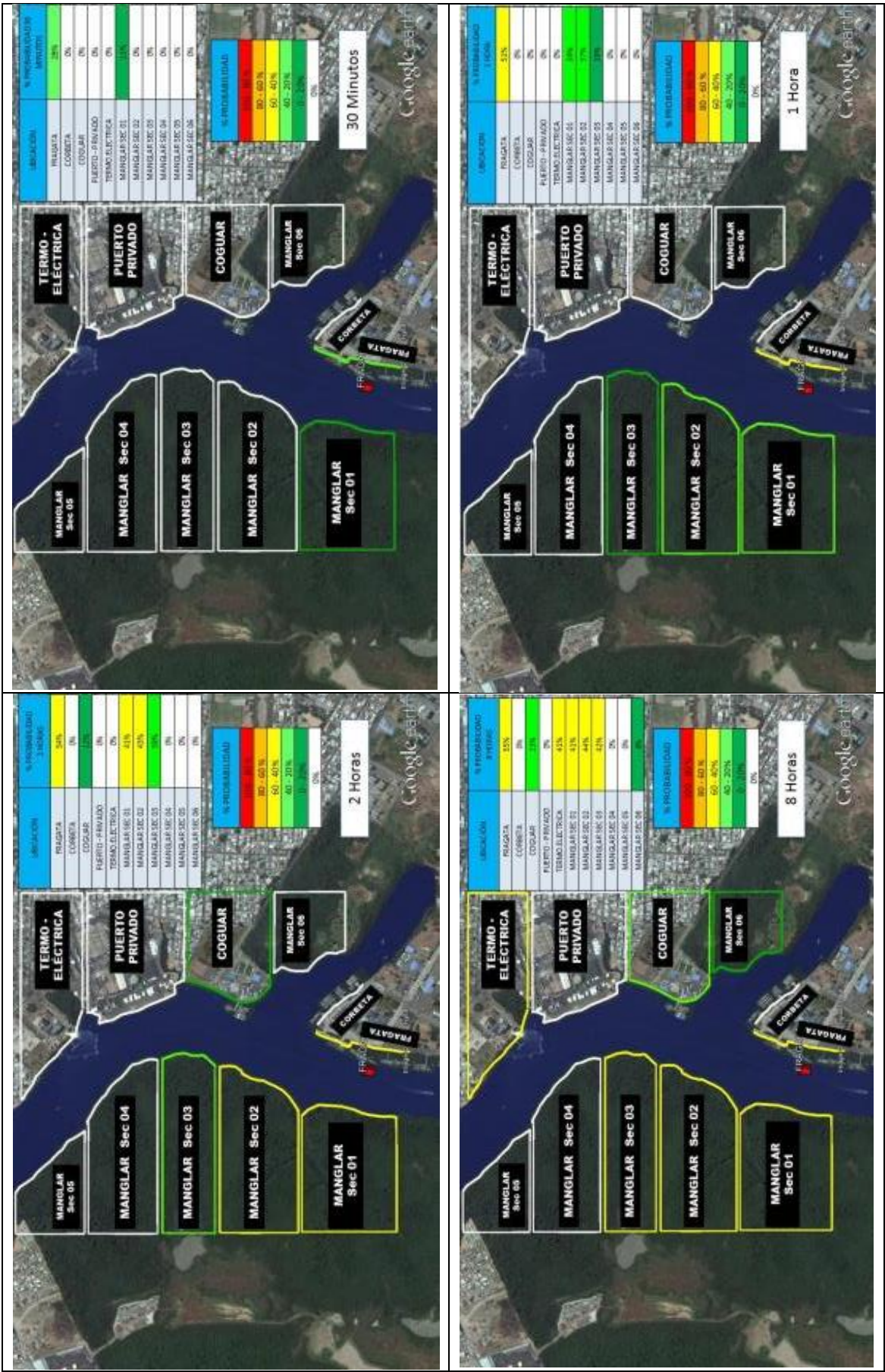


Figura 32 Mapas de Probabilidades de tiempo de llegada del hidrocarburo en los tramos establecidas, punto de vertido muelle de Fraguata.

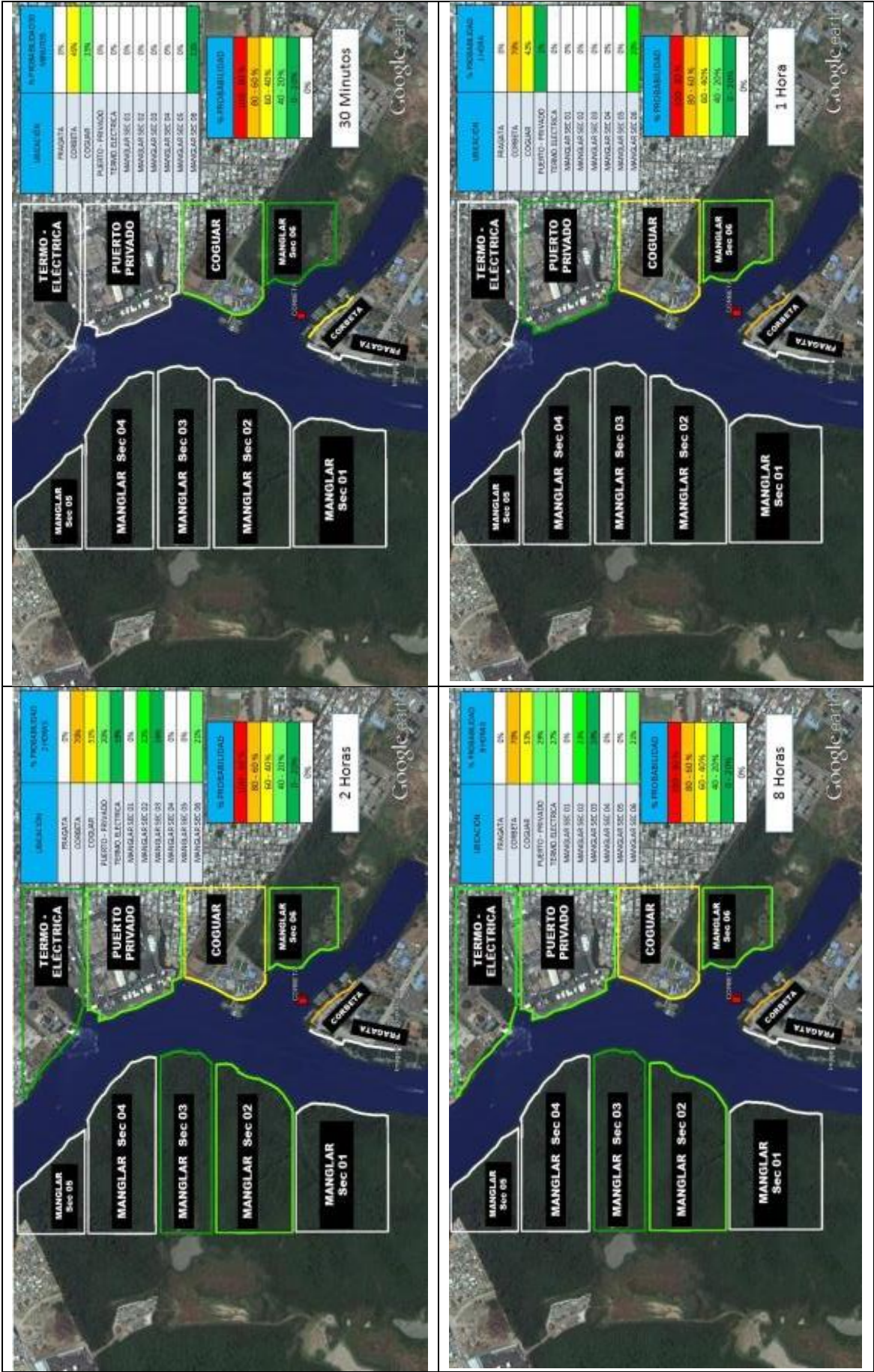


Figura 33 Mapas de Probabilidades de tiempo de llegada del hidrocarburo en los tramos establecidas, punto de vertido muelle de Corbeta.

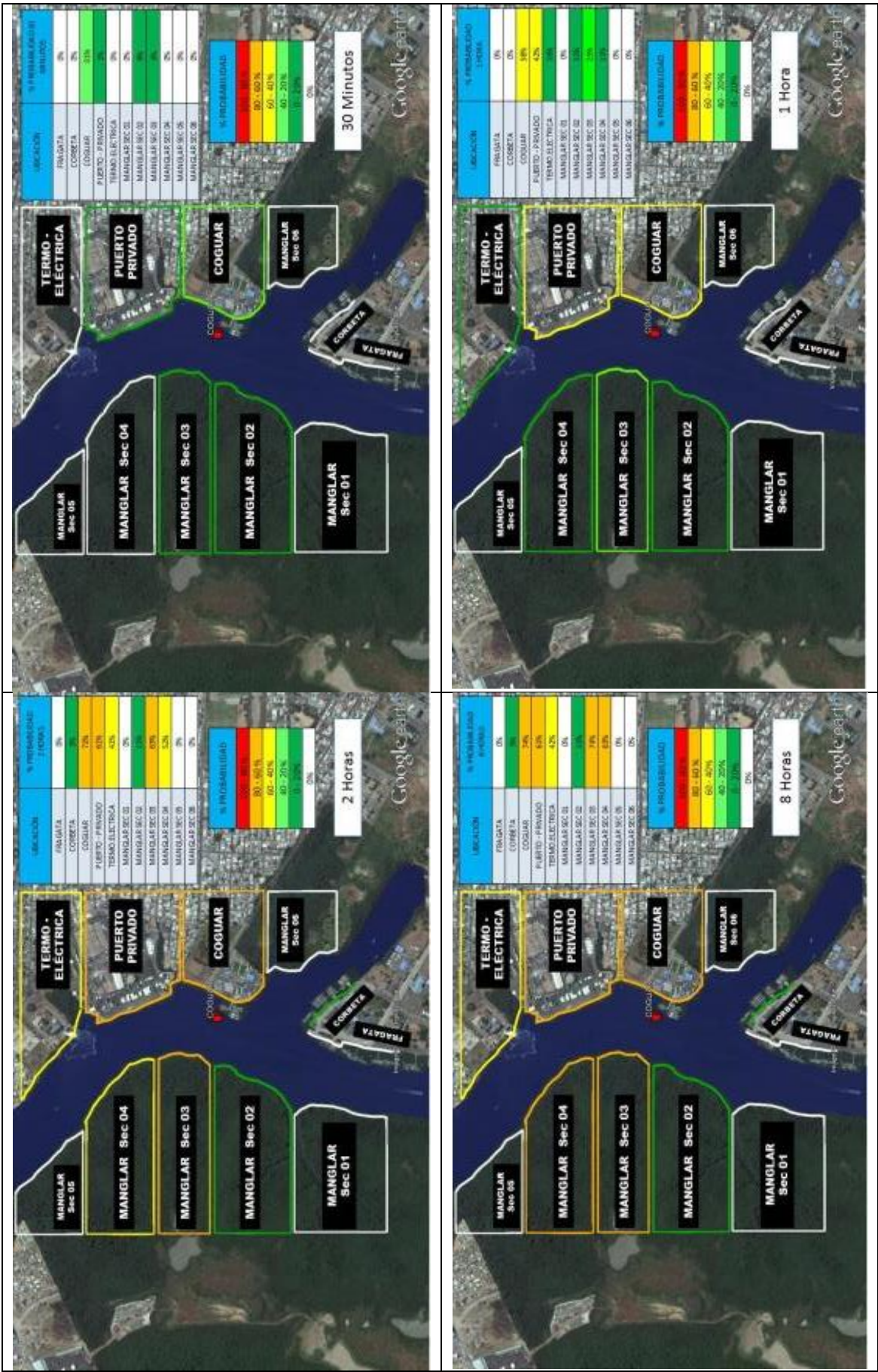


Figura 34 Mapas de Probabilidades de tiempo de llegada del hidrocarburo en los tramos establecidas, punto de vertido muelle de COGUAR.

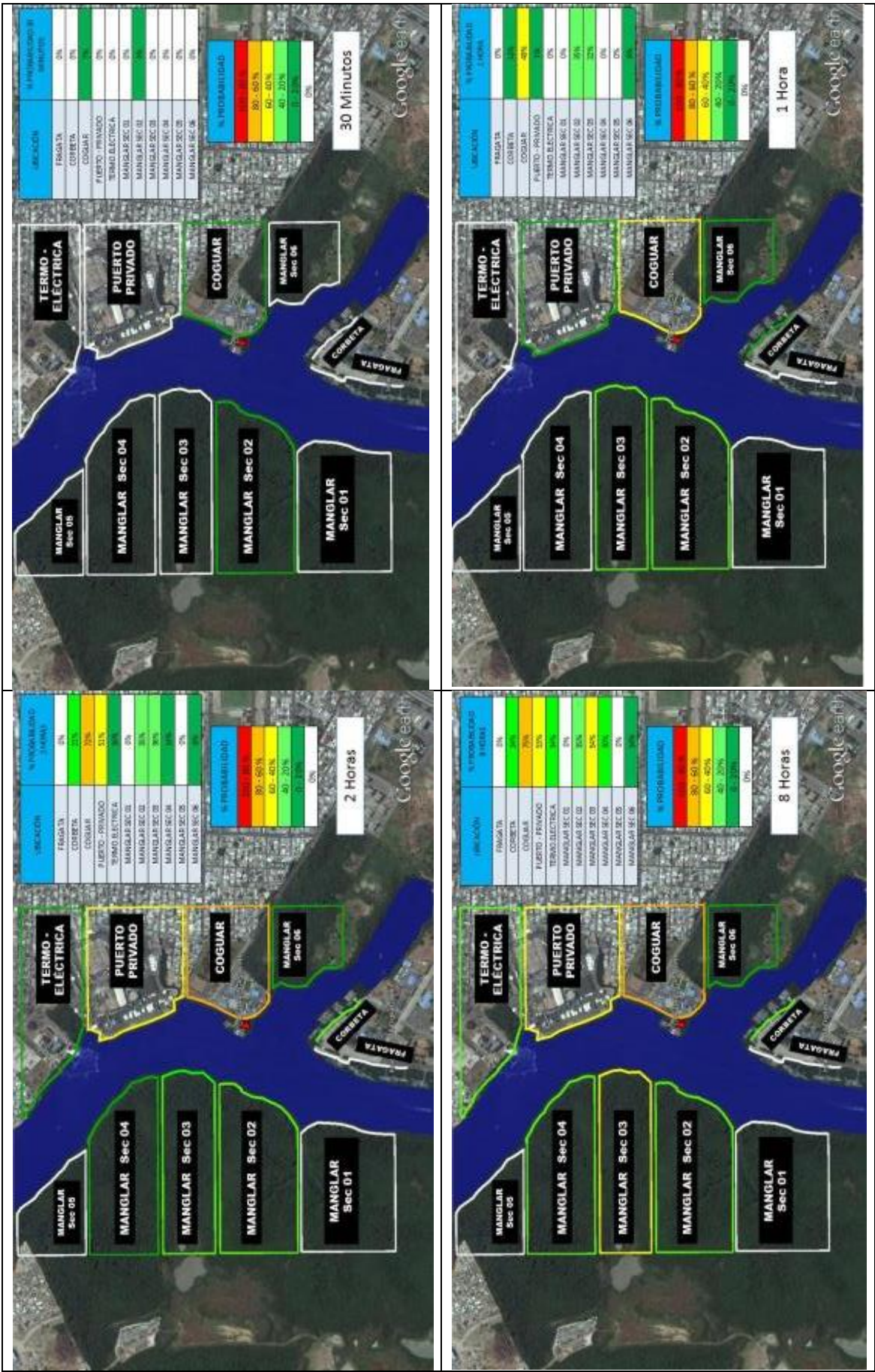


Figura 35 Mapas de Probabilidades de tiempo de llegada del hidrocarburo en los tramos establecidas, punto de vertido muelle de COGUAR -GASOLINA

A continuación se describe el análisis de los resultados de probabilidad de llegada del hidrocarburo a los tramos receptores, por cada punto crítico de vertido:

- Muelle de Fragatas - DIESEL: en la Figura 32 podemos observar los tramos receptores de combustible afectados, vemos que a los 30' presentan una probabilidad del 28% en el muelle de las fragatas y un 11% en el sector 01 del manglar, pero a medida que transcurre el tiempo aumenta la probabilidad de que otros tramos se vean afectados por el derrame, como las secciones 01, 02, 03 y 06 de manglar, muelle de COGUAR y la termo-eléctrica, los rangos finales de probabilidad son entre un 40% a 60 %. Tras ocho horas de trayectoria del hidrocarburo, tenemos que los tramos menos probables de contaminación son las de COGUAR y tramo 06 de manglar, y los tramos con una probabilidad media de contaminación son 01, 02 y 03 de manglar y la termo-eléctrica. Los tramos que no son afectados por la contaminación es el Puerto Privado, muelle de Corbetas y los tramos 04 y 05 del manglar.
- Muelle de Corbetas – DIESEL: en la Figura 33 podemos observar los tramos receptores de combustible afectadas, vemos que a los 30' presentan un probabilidad de 45% en el muelle de las Corbetas, 11% en el tramo 06 del manglar Y 15% en el muelle de COGUAR, pero a medida que transcurre el tiempo aumenta la probabilidad de que otros tramos se vean afectados por el derrame, como los tramos 02 y 03 de manglar, muelle de COGUAR, puerto privado y la termo-eléctrica. Tras ocho horas de trayectoria del hidrocarburo, tenemos que los tramos menos probables de contaminación son 02,03 y 06 de manglar, puerto privado y termo-eléctrica, el tramo con una probabilidad media de contaminación es el muelle de COGUAR, y el tramo con una probabilidad alta de contaminación es el muelle de Corbetas. Los tramos que no son afectados por la contaminación son el muelle de Fragatas y los tramos 01, 04 y 05 del manglar. La particularidad de la probabilidad alta en el muelle de Corbetas, se debe a que en las fases de marea de bajamar y marea vaciante la trayectoria del combustible se dirige directamente al muelle del vertido.
- Muelle de COGUAR - DIESEL: en la Figura 34 podemos observar los tramos receptores de combustible afectadas, vemos que a los 30' presentan un probabilidad de 31% en el muelle de COGUAR, 9% en el tramos 02 del manglar Y 3% en el tramo 03 del manglar, pero a medida que transcurre el tiempo aumenta la probabilidad de que otros tramos se vean afectados por el derrame, como los tramos 03 y 04 de manglar, muelle de Corbetas, puerto privado y la termo-eléctrica. Tras ocho horas de trayectoria del hidrocarburo, tenemos que los tramos menos probables de contaminación son la sección 02 de manglar y el muelle de Corbetas, el tramo con una probabilidad media de contaminación es la termo-eléctrica, y los tramos con una probabilidad alta de contaminación son el muelle de COGUAR, Puerto Privado y los tramos 03 y 04 de manglar. Los tramos que no son afectados por la contaminación es el muelle de Fragatas y los tramos 01, 05 Y 06 del manglar. Vemos que este punto crítico de vertido refleja los índices de probabilidad más altos, en comparación a los otros puntos críticos de vertido, evidenciado que afecta a cuatro secciones con una probabilidad alta de llegada del contaminante (DIESEL).
- Muelle de COGUAR – GASOLINA: en la Figura 35 podemos observar los tramos receptores de combustible afectadas, vemos que a los 30' presentan un probabilidad

de 7% en el muelle de COGUAR Y 3% en el tramo 02 del manglar, pero a medida que transcurre el tiempo aumenta la probabilidad de que otros tramos se vean afectados por el derrame, como los tramos 03, 04 Y 06 de manglar, muelle de Corbetas, puerto privado y la termo-eléctrica. Tras ocho horas de trayectoria del hidrocarburo, tenemos que los tramos menos probables de contaminación son los tramos 02, 04 y 06 de manglar, termo-eléctrica y el muelle de Corbetas, el tramo con una probabilidad media de contaminación es el Puerto Privado, y el tramo con una probabilidad alta de contaminación es el muelle de COGUAR. Los tramos que no son afectados por la contaminación son el muelle de Fragatas y los tramos 01 y 05 del manglar.

A fin de realizar una evaluación general de la probabilidad de contaminación en los tramos receptoras, se elaboran las Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, en las que se consideran todos los puntos críticos de vertido del hidrocarburo tipo DIESEL. De igual manera se encuentran representadas por los periodos de tiempo de 30 minutos, 1 hora, 2 horas y 8 horas respectivamente.

Tabla 9 Probabilidad total de recepción del contaminante en las secciones establecidas, tiempo de la trayectoria del hidrocarburo 30 minutos, tipo de vertido DIESEL.

Puntos Críticos de Vertido	Tramos receptores de DIESEL 30 Minutos (%)										
	Muelle de Faragatas	Muelle de Corbetas	Muelle de Coguar	Puerto Privado	Termo-Eléctrica	Manglar Sec-01	Manglar Sec-02	Manglar Sec-03	Manglar Sec-04	Manglar Sec-05	Manglar Sec-06
Fragatas	28	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
Corbetas	0	45	15	0	0	0	0	0	0	0	11
COGUAR	0	0	31	1	0	0	9	3	0	0	0

Tabla 10 Probabilidad total de recepción del contaminante en las secciones establecidas, tiempo de la trayectoria del hidrocarburo 1 hora, tipo de vertido DIESEL.

Puntos Críticos de Vertido	Tramos receptores de DIESEL 1 Hora (%)										
	Muelle de Faragatas	Muelle de Corbetas	Muelle de Coguar	Puerto Privado	Termo-Eléctrica	Manglar Sec-01	Manglar Sec-02	Manglar Sec-03	Manglar Sec-04	Manglar Sec-05	Manglar Sec-06
Fragatas	51	0	0	0	0	39	37	10	0	0	0
Corbetas	0	70	42	1	0	0	0	0	0	0	20
COGUAR			58	42	14		11	25	11	0	0

Tabla 11 Probabilidad total de recepción del contaminante en las secciones establecidas, tiempo de la trayectoria del hidrocarburo 2 horas, tipo de vertido DIESEL.

Puntos Críticos de Vertido	Tramos receptores de DIESEL 2 Horas (%)										
	Muelle de Faragatas	Muelle de Corbetas	Muelle de Coguar	Puerto Privado	Termo-Eléctrica	Manglar Sec-01	Manglar Sec-02	Manglar Sec-03	Manglar Sec-04	Manglar Sec-05	Manglar Sec-06
Fragatas	54	0	12	0	0	41	43	39	0	0	0
Corbetas	0	70	51	20	18		22	16	0	0	21
COGUAR	0	3	72	61	41	0	11	63	52	0	0

Tabla 12 Probabilidad total de recepción del contaminante en las secciones establecidas, tiempo de la trayectoria del hidrocarburo 8 horas, tipo de vertido DIESEL.

Puntos Críticos de Vertido	Tramos receptores de DIESEL 8 Horas (%)										
	Muelle de Faragatas	Muelle de Corbetas	Muelle de Coguar	Puerto Privado	Termo-Eléctrica	Manglar Sec-01	Manglar Sec-02	Manglar Sec-03	Manglar Sec-04	Manglar Sec-05	Manglar Sec-06
Fragatas	55	0	23	0	41	41	44	42	0	0	6
Corbetas	0	70	53	29	27	0	23	19	0	0	21
COGUAR	0	5	74	61	42	0	11	74	63	0	0

Finalmente podemos establecer que los tramos con más probabilidad de recepción del contaminante son el Muelle de COGUAR y el tramo 03 del manglar, debido a que en estos tramos reciben el contaminante de los tres puntos críticos de vertido. Además el muelle de COGUAR aumenta aún más sus probabilidades de contaminación porque tiene dos puntos de vertido en sus muelles, uno correspondiente a DIESEL y el otro a GASOLINA. El resto de tramos se puede indicar que tienen una probabilidad media de llegada del hidrocarburo, y la única sección que no recibe el contaminante es el tramo 05 de manglar.

8. Conclusiones.

- Los buenos resultados obtenidos en la calibración y validación del modelo hidrodinámico, permitió obtener el escenario océano – meteorológico de corrientes, con un valor promedio de velocidad de corriente de 0.12 m/s en el área de estudio, además de corroborar que la influencia de la corriente en la evolución del derrame de hidrocarburo es muy baja.
- La ejecución de todos el modelado numérico del derrame de hidrocarburos en el modelo TESEO, permitió evidenciar que el escenario océano - meteorológico más predominante en las trayectoria del contaminante, es la dirección y velocidad del viento, superando a la corriente.
- La entrega de la base de datos de mareas y vientos del área de estudio, por parte del Instituto Oceanográfico de la Armada, permitió la elaboración, calibración y validación del modelo hidrodinámico, además de la obtención de los parámetros de viento, corrientes y temperatura, a fin de poder desarrollar los diferentes escenarios de vertidos de derrame de hidrocarburos en los muelles de la Base Naval Sur.
- La metodología implementada para la selección de escenarios, permitió obtener de forma eficiente y eficaz la ejecución de 384 simulaciones de vertidos de derrame de hidrocarburos, de esa manera se pudo definir cuáles de los tramos receptores es la más probable de contaminarse, como lo evidencio el sector de COGUAR y el tramo 03 de manglar.
- La obtención de los mapas de probabilidad de llegada del contaminante a los tramos receptores establecidas, permitieron determinar la probabilidad de las áreas afectas por un derrame de hidrocarburos que pudieran producirse en los puntos críticos de vertidos establecidos, de igual manera estos mapas de probabilidad, facilitan a futuro el análisis del riesgo en toda las áreas afectadas.
- La elaboración de una gran área del modelo hidrodinámico, permite realizar estudios a futuro de otras áreas aledañas a la Base Naval Sur, que manejan de igual manera la transferencia y recepción combustible a los diferentes tipos de buques que arriban a sus puertos privados y concesionados.
- La falta de registro de datos diarios o horarios de velocidad y dirección del viento en el área de estudio, imposibilitaron la generación de escenarios de vertido de hidrocarburos con vientos calmos (menores a 0.5 m/s).
- La falta de tiempo y de conocimientos en programación, dificultó la obtención del volumen del hidrocarburo que alcanza los tramos afectados (m^3), y mejorar la sectorización de las áreas receptoras del hidrocarburo, además de no poder calcular los índices de vulnerabilidad, a fin de determinar el riesgo en cada uno de los tramos receptoras del contaminante.

9. Futuras líneas de trabajo.

- Realizar este tipo de estudios en otros lugares aledaños a la Base Naval Sur, como por ejemplo, el Puerto Comercial de la Ciudad de Guayaquil o los puertos privados que se encuentran en el mismo sector.
- La obtención del volumen del hidrocarburo que alcanza las zonas estuarinas (m^3), a fin de poder determinar la cantidad del hidrocarburo que llegaría a los tramos afectadas.
- Realizar los estudios de vulnerabilidad de los tramos receptoras de combustible, a fin de determinar el riesgo de cada uno de ellos.
- Establecer estudios de respuesta a un derrame de hidrocarburo producido en el medio marítimo de la Base Naval Sur.

10. Referencias.

Abascal, A.J., Castanedo, S., Nuñez, P., Cardenas, M., Perez-Diaz, B., Medina, R., 2015. A high resolution oil spill risk assessment system at Santander Bay (Spain), Interspill 2015, Amsterdam (Holanda), 24-26 marzo 2015.

- Abascal, A.J., Castanedo, S., Gutierrez, A.D., Comerma, E., Medina, R., Losada, I.J., 2007. TESEO, an Operational System for Simulating Oil Spills Trajectories and Fate Processes. Proceedings of Seventeenth International Offshore Ocean and Polar Engineering Conference. The International Society of Offshore Ocean and Polar Engineering, Lisbon, ISOPE, 3, 1751-1758.
- Abascal, A.J., Castanedo, S., Mendez, F.J., Medina, R., Losada, I.J., 2009a. Calibration of a Lagrangian transport model using drifting buoys deployed during the Prestige oil spill. Journal of Coastal Research, 25 (1), 80-90.
- Abascal, A.J., Castanedo, S., Medina, R., Losada, I.J. y Alvarez-Fanjul, E., 2009b. Application of HF radar currents to oil spill modelling. Marine Pollution Bulletin, 58, 238–248.
- Abascal, A.J., Castanedo, S., Fernández, V., Medina, R., 2012. Backtracking Drifting Objects using Surface Currents from High-frequency (HF) Radar Technology, Ocean Dynamics, 62, 1073-1089.
- Abascal, A.J., Castanedo, S., Cárdenas, M., García, J., Chiri, H., Aragón, G., Medina, R., Zamora, A., Mota, J., 2015. A high resolution operational system for oil spill forecasting and backtracking at Huelva's estuary (Spain). 38TH AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. British Columbia, Canada.
- ASCE Task Committee, 1996. State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. Journal of Hydraulic Engineering, 122(11), 594-609.
- Barker, C.H., y Galt, J.A., 2000. Analysis of Methods Used in Spill Response Planning: Trajectory Analysis Planner TAP II. Spill Science and Technology Bulletin, 6(2), 145-152.
- Based on HF Radar Currents in the North Sea: Validation with Drifter Buoys. Proceedings of the Thirty-Eighth AMOP Technical Seminar, Environment Canada, Ottawa, 123-142.
- Barker, C.H., y Galt, J.A., 2000. Analysis of Methods Used in Spill Response Planning: Trajectory Analysis Planner TAP II. Spill Science and Technology Bulletin, 6(2), 145-152.
- Bulletin, M. P. (2015). Environmental risk analysis of oil handling facilities in port areas. Application to Tarragona harbor (NE Spain). *ELSEVIER*, 78-87.
- Cárdenas, M., Abascal, A.J., Castanedo, S., Chiri, H., Ferrer, M.I., Sanchez, J., Medina, R., Turrell, W.R., Hughes, S., Gallego, A., Berx, B., 2015. Spill Trajectory Modelling
- Castanedo, S., Medina, R., Losada, I.J., Vidal, C., Méndez, F.J., Osorio, A., Juanes, J.A., Puente, A., 2006. The Prestige oil spill in Cantabria (Bay of Biscay). Part I: Operational

forecasting system for quick response, risk assessment and protection of natural resources, *Journal of Coastal Research*. 22 (6), 1474-1489.

- Castanedo, S., Abascal, A.J., Camus, P., Tomas, A., Cárdenas, M., Medina, R., 2012. High resolution oil spill forecasting using hybrid downscaling techniques, ICCE 2012, International Conference on Coastal Engineering. Santander (España).
- Castanedo, S., Perez-Diaz, B., Abascal, A.J., Cardenas, M., Olabarrieta, M., Medina, R., Receveur, J., Evrard, E., Guyomarch, J., 2014. A high resolution operational oil spill model at Santander Bay (Spain): implementation and validation. *Proceedings of the 2014 International Oil Spill Conference*. pp. 86. API Global Creative: 2014-073.
- Crichton, D., 1999. The Risk Triangle. In *Natural Disaster Management*. Jon Ingleton (Ed.), Tudor Rose, Londres.
- Carvalho, T., & Fidelis, T. (2013). The relevance of governance models for estuary management plans. *Land Use Policy*.
- Constanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., y otros. (1998). The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. *Ecological Economics* 25, 67-72.
- Cucalón, E. (1989). Oceanographic Characteristics Off the Coast of Ecuador. (S. Olsen, & L. Arriaga, Edits.) *A Sustainable Shrimp Mariculture Industry for Ecuador*, 186-194.
- Deltares Systems. (2013). *Delft3D User Manual*. En Deltares Systems, *Delft3D User Manual* (pág. 179). Rotterdamseweg: Deltares.
- European Commission, 2013. Directive 2013/39/EU of the European parliament and of the council of 12 August 2013 amending directives 2000/60/EC and 2008/ 105/EC as regards priority substances in the field of water policy.
- European Commission, 2014. Directive 2014/89/EU of the European parliament and of the council of 23 July 2014 establishing a framework for maritime spatial planning.
- Guillen, G., Rainey, G., y Morin, M., 2004. A simple rapid approach using coupled multivariate statistical methods, GIS and trajectory models to delineate areas of common oil spill risk. *Journal of Marine Systems*, 45, 3-4, 221-235.
- IMO, 1991. OPRC Convention: International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, 1990, including Final Act of the Conference and attachment (resolutions 1 to 10). London, 39pp. ISBN: 92-801- 1267-8.
- IMO, 1995. Manual on oil pollution. Section II. Contingency Planning. International Maritime Organization, London, 65pp. ISBN: 92-801-1330-5.

- IMO, 2000. Protocol on Preparedness, Response and Co operation to Pollution Incidents by Hazardous and Noxious Substances (OPRC–HNS Protocol). International Maritime Organization, London.
- IMO, 2010. Manual on oil spill risk evaluation and assessment of response preparedness. International Maritime Organization, London, 47pp. ISBN: 978- 92-801-1512-3.
- IPIECA, 2008. Oil spill preparedness and response – report series summary. London: International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, IPIECA Report Series 1990–2008, p. 42.
- Santos, C.F., Michel, J., Neves, M., Janeiro, J., Andrade, F., Orbach, M., 2013. Marine spatial planning and oil spill risk analysis: finding common grounds. Mar. Pollut. Bull. 74, 73–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.029>.
- INOCAR, I. O. (1986). Estudios hidrográficos, oceanográficos y geológicos para resolver los problemas de sedimentación en el canal de acceso al Puerto Marítimo de Guayaquil y en el área de la Esclusa. Ecuador-Guayaquil: INOCAR.
- JE Nash, J. S. (1970). La predicción del caudal del río a través de modelos conceptuales parte I - Una discusión de principios. ELSEVIER, 282-290.
- Núñez, P., Cárdenas, M., García, J., Pérez, B., Aragón, G., Chiri, H., Abascal, A.J., Castanedo, S., Zamora, A., Mota, J., Medina, R., 2015. Plataformas web para la prevención y respuesta ante derrames de hidrocarburos en puertos y estuarios: ATHENEA y SPRES. XIII Jornadas Puertos y Costas, Avilés (España), 24-25 de junio de 2015.
- McCutcheon, J. L. (1999). Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling . ESTADOS UNIDOS : LEWIS PUBLISHERS.
- McLusky, D., & Elliott, M. (2004). The: Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management. 214.
- Mackay, D., Paterson, S., Trudel, K., 1980. A Mathematical Model of Oil Spill Behaviour. Environmental Protection Service, Fisheries and Environment Canada, EE-7, 39p.
- Murcia, U. d. (2008). Estimación de parámetros, validación de sensibilidad. Recuperado el 21 de Septiembre de 2016, de <http://ocw.um.es/ciencias/modelizacion-de-sistemas-ambientales/material-de-clase-1/msa-cap-06.pdf>:
<http://ocw.um.es/ciencias/modelizacion-de-sistemas-ambientales/material-de-clase-1/msa-cap-06.pdf>
- Murray, S., Conlon, D., Siripong, A., & Santoro, J. (1975). Circulation and Salinity Distribution in the Rio Guayas Estuary, Ecuador. (L. Cronin, Ed.) II Academic, 345-363.

- Reed, M., Turner, C., y Odulo, A., 1994. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. *Spill Science and Technology Bulletin*, 1(2), 143-157.
- Sotillo, M.G., Alvarez Fanjul, E., Castanedo, S., Abascal, A.J., Menendez, J., Emelianov, M., Olivella, R., García-Ladona, E., Ruiz-Villareal, M., Conde, J., Gómez, M., Conde, P., Gutierrez, A.D., Medina, R., 2008. Towards an operational system for oil-spill forecast over Spanish waters: Initial developments and implementation test. *Marine Pollution Bulletin*, 56(4), 686-703.
- Stiver, W., Mackay, D., 1984. Evaporation Rate of Spills of Hydrocarbons and Petroleum Mixtures. *Environment Science & Technology* (18), pp. 834-840.
- Viikmäe, B., Torsvik, T., Soomere, T., 2013. Impact of horizontal eddy diffusivity on Lagrangian statistics for coastal pollution from a major marine fairway. *Ocean Dyn.*, 63 (5), 589–597.
- SENPLADES, S. G. (2015). proyecto "Recuperación de las áreas protegidas de la ciudad de Guayaquil, Estero Salada y Isla Santay". Guayaquil-Ecuador.
- Stevenson, M. (1981). Variaciones Estacionales en el Golfo de Guayaquil, un Estuarion Tropical. *Boletín Técnico Científico Instituto Nacional de Pesca del Ecuador.*, 1-133.
- Twilley, R., Cárdenas, V., Rivera-Monroy, J., Espinoza, R., Suescum, M., Armijos, y otros. (s.f.). The Gulf of Guayaquil and the Guayas River Estuary, Ecuador. (U. Seeliger, & B. Kjerfve, Edits.) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*, 144, 245-263.
- Voinov, A. A. (2008). *Systems Science and Modeling for Ecological Economics* . Reino Unido: Kindle Edition.
- Zárate, K. C. (2013). *Manual para la Gestión Operativa de las Áreas Protegidas de Ecuador*. Ecuador: Imprenta Mariscal.

ANEXO "A" Datos Armonicos del Mareógrafo E1

ANÁLISE HARMÔNICA DA MARÉ
ESTAÇÃO MAREGRÁFICA: ENFILADA E1
LATITUDE: 2 24.0 00 "S"
LONGITUDE: 80 80 1.0 00 "W"
FUSO HORÁRIO: 5
HORA INICIAL: 14.0000 14 hora(s)
DATA: 19 / 9 / 2009
NÚMERO DE DIAS DA ANÁLISE: 58.88
NÍVEL 'MÉDIO' DO MAR: 227.46 cm
PORCENT. PARA REJEIÇÃO DE COMPONENTES: 95%

No.	SÍMBOLO	gr./h	H cm	+/-	G gr.	K gr.	GW gr.	+/-
1	*SIGMA1	12.9271398	1.00	2.48	246.94	231.56	311.58	*****
2	*Q1	13.3986609	1.17	2.49	155.75	142.72	222.74	*****
3	O1	13.9430356	3.06	2.46	311.00	300.70	20.72	47.04
4	*M1	14.4966940	3.05	2.45	24.19	16.66	96.68	*****
5	K1	15.0410686	22.18	2.44	345.88	341.07	61.08	6.57
6	*J1	15.5854433	1.50	2.45	28.76	26.67	106.68	*****
7	*OO1	16.1391017	0.26	2.47	119.88	120.56	200.58	*****
8	*KQ1	16.6834764	0.53	2.50	285.91	289.31	9.32	*****
9	*N(MU)S2	26.4079379	0.77	3.52	356.26	328.26	128.29	*****
10	*2NS2	26.8794590	3.58	3.50	242.56	216.93	16.96	*****
11	*MNS2	27.4238337	1.90	3.46	280.01	257.10	57.13	*****
12	MU2	27.9682084	13.64	3.45	276.96	256.77	56.80	14.91
13	N2	28.4397295	23.49	3.47	164.29	146.46	306.49	10.37
14	M2	28.9841042	141.15	3.44	176.26	161.14	321.18	1.42
15	L2	29.5284789	5.61	3.45	194.31	181.91	341.95	35.30
16	S2	30.0000000	38.83	3.45	235.17	225.13	25.17	4.45
17	MSN2	30.5443747	4.16	3.44	55.58	48.27	208.31	63.60
18	2SM2	31.0158958	3.34	3.46	55.00	50.05	210.08	53.62
19	*2SN2	31.5602705	0.43	3.43	175.32	173.09	333.12	*****
20	NO3	42.3827651	1.16	1.04	175.65	147.51	27.56	82.74
21	MO3	42.9271398	1.69	1.04	197.67	172.26	52.31	34.61
22	*M3	43.4761563	0.43	1.03	230.84	208.17	88.22	*****
23	MK3	44.0251728	1.26	1.03	337.61	317.69	197.74	59.01
24	*2MQ3	44.5695475	0.56	1.03	53.20	36.00	276.05	*****
25	*SK3	45.0410686	0.90	1.03	328.42	313.58	193.63	*****

26	N4	56.8794590	2.21	1.33	80.50	44.83	4.89	63.61
27	MN4	57.4238337	2.94	1.34	193.43	160.49	120.55	34.32
28	M4	57.9682084	6.94	1.34	199.20	168.97	129.04	11.52
29	*SN4	58.4397295	1.12	1.34	235.67	207.80	167.86	*****
30	MS4	58.9841042	4.89	1.34	255.03	229.88	189.95	14.05
31	*SL4	59.5284789	0.49	1.34	226.59	204.17	164.24	*****
32	*S4	60.0000000	0.91	1.35	30.49	10.42	330.49	*****
33	*MNO5	71.3668693	0.27	0.42	170.06	126.81	166.89	*****
34	*2MO5	71.9112440	0.24	0.42	324.57	284.05	324.13	*****
35	*MNK5	72.4649023	0.38	0.42	145.17	107.41	147.49	*****
36	2MK5	73.0092770	0.63	0.43	60.25	25.21	65.30	46.94
37	*MSM5	73.4807982	0.20	0.43	129.15	96.47	136.56	*****
38	*MSK5	74.0251728	0.26	0.43	212.30	182.34	222.43	*****
39	*2M2NS6	84.8476674	0.24	0.34	3.09	307.23	67.33	*****
40	*3MNS6	85.3920421	0.17	0.34	19.03	325.89	85.99	*****
41	4MS6	85.9364168	0.71	0.34	59.32	8.90	129.00	26.29
42	*2MN6	86.4079379	0.38	0.34	355.55	307.49	67.59	*****
43	M6	86.9523126	0.68	0.34	329.68	284.34	44.44	31.46
44	MSN6	87.4238337	0.53	0.34	34.58	351.60	111.70	43.51
45	2MS6	87.9682084	0.52	0.34	32.36	352.10	112.20	35.73
46	*MKL6	88.5947204	0.18	0.35	115.67	78.54	198.64	*****
47	2SM6	88.9841042	0.29	0.35	148.62	113.44	233.54	66.46
48	*3MNOS7	99.3350777	0.21	0.31	191.91	128.46	328.58	*****
49	*2NMO7	99.8065988	0.11	0.32	208.94	147.85	347.97	*****
50	*2MNO7	100.3509735	0.17	0.31	259.62	201.26	41.38	*****
51	3MO7	100.8953482	0.31	0.31	325.38	269.74	109.85	77.29
52	*2MNK7	101.4490065	0.21	0.31	102.14	49.27	249.38	*****
53	*3MK7	101.9933812	0.33	0.32	54.26	4.11	204.22	*****
54	*MSNK7	102.4649023	0.22	0.31	157.89	110.09	310.21	*****
55	*2MSK7	103.0092770	0.23	0.31	100.84	55.77	255.89	*****
56	*3MSKN7	103.5536517	0.02	0.32	301.35	259.00	99.12	*****
57	*2SMK7	104.0251728	0.10	0.32	201.96	161.97	2.09	*****
58	*2M2N8	114.8476674	0.26	0.34	216.89	150.99	71.13	*****
59	*3MN8	115.3920421	0.12	0.33	349.12	285.95	206.08	*****
60	*M8	115.9364168	0.16	0.34	161.21	100.76	20.89	*****
61	*2MSN8	116.4079379	0.11	0.34	79.57	21.48	301.61	*****
62	*3MS8	116.9523126	0.28	0.33	247.37	192.00	112.14	*****
63	*2M2S8	117.9682084	0.11	0.33	225.07	174.78	94.92	*****
64	*3SN8	118.4397295	0.04	0.34	260.47	212.53	132.66	*****

65 *3SM8	118.9841042	0.05	0.33	293.41	248.20	168.33	*****
66 *S8	120.0000000	0.11	0.33	71.56	31.43	311.56	*****
67 *2M2NO9	128.7907030	0.32	0.29	189.19	112.99	113.14	*****
68 *3MNNO9	129.3350777	0.10	0.29	240.87	167.40	167.55	*****
69 *4MO9	129.8794524	0.05	0.28	61.72	350.97	351.12	*****
70 *3MNK9	130.4331107	0.04	0.28	88.66	20.68	20.83	*****
71 *3MSO9	130.8953482	0.05	0.29	332.66	266.99	267.14	*****
72 *3MSK9	131.9933812	0.07	0.28	61.75	1.57	1.72	*****
73 *2M2SK9	133.0092770	0.11	0.28	259.19	204.08	204.23	*****
74 *4SK9	135.0410686	0.07	0.28	218.17	173.23	173.38	*****
75 *4MN10	144.3761463	0.37	0.30	280.54	202.26	282.43	*****
76 *M10	144.9205210	0.21	0.30	259.22	183.65	263.82	*****
77 3MNS10	145.3920421	0.48	0.30	273.05	199.84	280.01	44.62
78 4MS10	145.9364168	0.43	0.30	297.58	227.10	307.26	40.29
79 *2M2SN10	146.4079379	0.25	0.30	326.52	258.39	338.56	*****
80 3M2S10	146.9523126	0.28	0.30	2.43	297.03	17.20	57.92
81 *4MNO11	158.3191819	0.07	0.22	287.87	199.29	359.47	*****
82 *5MO11	158.8635566	0.02	0.22	74.62	348.75	148.93	*****
83 *4MNK11	159.4172149	0.05	0.22	136.07	52.97	213.15	*****
84 *4MSO11	159.8794524	0.03	0.22	53.01	332.22	132.41	*****
85 *3M2SO11	160.8953482	0.10	0.22	170.10	94.40	254.58	*****
86 *3M2SK11	61.9933812	0.06	0.22	102.44	32.23	192.41	*****
87 *5SK11	165.0410686	0.06	0.22	45.27	350.29	150.47	*****
88 *5MN12	173.3602505	0.04	0.18	291.11	197.71	77.91	*****
89 M12	173.9046252	0.22	0.18	278.10	187.42	67.62	66.96
90 4MSN12	174.3761463	0.33	0.18	264.73	176.41	56.61	38.51
91 5MS12	174.9205210	0.30	0.18	300.87	215.27	95.47	34.41
92 3MNKS12	175.4741794	0.27	0.18	42.10	319.27	199.47	41.09
93 4M2S12	175.9364168	0.20	0.18	358.61	278.10	158.30	50.18
94 *Mm	0.5443747	3.75	4.42	107.16	109.88	109.88	*****
95 MSf	1.0158958	4.02	4.43	54.49	59.57	59.57	78.29
96 *Mtm	1.6424077	0.94	4.56	161.40	169.62	169.62	*****

No. DE COMPONENTES REGISTRADAS NO DISQUETE: 38