

## Paper CA1201 - SIFLOW21. SIMULACIÓN PREDICTIVA DE CAPACIDAD DE CANALES DE NAVEGACIÓN E INFRAESTRUCTURAS PORTUARIAS BASADO EN ANÁLISIS DE DATOS AIS

Ayuso, Carmen; Redondo, Raúl; Atienza, Raúl; Iribarren, José Ramón  
Siport21 (Las Matas, Madrid, España)

Email: [jose.r.iribarren@siport21.es](mailto:jose.r.iribarren@siport21.es)

**ABSTRACT:** Los proyectos de desarrollo de infraestructura portuaria requieren datos fiables para la evaluación coste-beneficio de la inversión y la selección de la mejor alternativa. El objetivo del análisis es confirmar que responden a la capacidad prevista del puerto a futuro, junto con su nivel de seguridad/riesgo marítimo, optimizando los recursos dedicados.

Se describe una metodología de trabajo que combina un modelo matemático de predicción de tráfico con la evaluación de riesgos náuticos. Como resultado, permite establecer el nivel de seguridad y servicio del canal de navegación o la nueva infraestructura portuaria y sentar la base para la toma de decisiones.

SiFlow21 es un modelo de simulación predictiva de capacidad portuaria, desarrollo propio de Siport21. Permite cuantificar el movimiento de los buques en la lámina de agua portuaria. Contempla la topología de la zona portuaria, los diversos tráficos, las reglas de navegación, las condiciones de marea y el clima marítimo local. Ofrece una gran versatilidad para adaptarse a canales y puertos que pueden llegar a ser muy complejos.

### 1 INTRODUCCIÓN

Los proyectos de desarrollo de infraestructura portuaria, incluyendo las costosas obras de dragado de profundización de canales de navegación, requieren datos fiables para la evaluación coste-beneficio de la inversión y la selección de la mejor alternativa. En fase de planificación, el objetivo del análisis desde un punto de vista náutico es confirmar que responden a la capacidad prevista del puerto a futuro, junto con su nivel de seguridad/riesgo marítimo, optimizando los recursos dedicados.

Siflow21, Simulador de Flujo de Tráfico Marítimo, es un modelo basado en SED (simulación de eventos discretos) desarrollo propio de Siport21 para analizar la capacidad y nivel de seguridad de un sistema portuario o vía navegable. Combina el carácter descriptivo (explica el funcionamiento de un sistema complejo considerando la diversidad de variables que lo gobiernan), predictivo (permite evaluar situaciones de futuro a partir de la operación actual) y prescriptivo (genera recomendaciones de actuación a partir de las fases anteriores, proponiendo medidas verificadas en cuanto a su eficacia).

El modelo matemático de cada puerto se calibra con datos AIS reales, lo que permite asegurar su validez, incluso en sistemas muy complejos. Se estima así el nivel de congestión (niveles de

ocupación, tiempos de espera, uso de recursos) identificando además los cuellos de botella, factores críticos de operación o seguridad. A partir de este punto, pueden analizarse escenarios a futuro con diversos perfiles:

- Incremento de volumen de tráfico
- Cambios en la infraestructura
- Mejora de recursos
- Cambios en las normas de navegación

La herramienta ofrece una gran versatilidad para adaptarse a canales y puertos de morfología muy diversa, que pueden llegar a ser muy complejos al combinar la interacción de tráficos bajo normas de acceso complicadas (ventanas de marea, normas de cruce, reserva de canal, prioridad de tráficos).

Este procedimiento se ha aplicado ya en numerosos casos: Bahía Blanca (Argentina), proyecto de ampliación del canal en un largo estuario con marea y accesos programados, interferencia del tráfico LNG con reserva de canal; Buenaventura (Colombia), coste-beneficio de un costoso proyecto de profundización; Río de La Plata-Hidrovia (Argentina), con fuertes limitaciones de calado, nuevos tráficos, aumento de volumen; Río Guadalquivir, optimización de operaciones, incremento de capacidad de la vía sin dragar, reprogramación de maniobras, acceso/espera; Tarragona, nueva terminal sobre el canal de acceso al puerto, evaluación de interferencias y

riesgo. Filipinas, ordenación de una bahía altamente congestionada con interferencia de tráficos diversos y numerosos fondeaderos. Se mostrarán algunas aplicaciones y la utilidad de los resultados obtenidos.

## 2 METODOLOGÍA

La metodología empleada combina un modelo matemático de predicción de tráfico con la evaluación de riesgos náuticos, permitiendo así establecer el nivel de seguridad y servicio del canal de navegación o la nueva infraestructura portuaria (dársenas y muelles).

Como inicio, se trabaja con los datos AIS de la zona, sobre los que se construye una descripción cuantitativa detallada de los movimientos de los buques en el escenario actual: tipología de buques, distribución de tamaños y calados, rutas, velocidades, cruces, estancia en fondeaderos, programación de accesos, estacionalidad, interferencia entre tráficos, ocupación de muelles, etc. Dado el enorme volumen de datos (millones cada año), el análisis está basado en técnicas Big Data, Data Analytics y DataViz (algoritmos de Inteligencia Artificial para identificar relaciones espacio-temporales entre los diversos tráficos y las condiciones físicas con métodos avanzados de representación).

El análisis de datos AIS permite conocer un gran número de datos de entrada para la construcción precisa del modelo de simulación de tráfico marítimo mediante el uso de la herramienta Siflow21. Se trata de un modelo de simulación predictiva de capacidad portuaria, desarrollo propio de Siport21. Permite cuantificar de manera precisa el movimiento de los buques en la lámina de agua portuaria. Contempla la topología de la zona portuaria (red de canales de acceso, dársenas y muelles), los diversos tráficos con su volumen particular y distribución estacional, las reglas de navegación (DST, prioridades, velocidades máximas, UKC mínimos, asistencia de Prácticos o remolcadores, normas de cruce, ...), las condiciones de marea y el clima marítimo local. Ofrece una gran versatilidad para adaptarse a canales y puertos que pueden llegar a ser muy complejos.

Los módulos del programa describen los distintos componentes del sistema con sus atributos particulares y la interacción entre ellos. Una vez definido el sistema canal-puerto, se lanzan procesos de llegada/salida de buques que responden a las distribuciones estadísticas observadas y siguen las normas de navegación vigentes.

Tras construir el modelo, se calibra con datos reales (extraídos del análisis AIS) y se obtienen KPIs (Key Performance Indicators) de eficiencia / seguridad definidos ad hoc. A continuación, se describen y cuantifican escenarios de futuro (obras de infraestructura o dragados, nuevas terminales, cambio de reglas de navegación, aumento de volumen de tráfico). Los diferentes escenarios se simulan mediante un método aleatorio que cubre periodos típicos de un año, obteniendo los indicadores de calidad y seguridad correspondientes. De este modo, se dispone de una evaluación fiable de la situación futura como base para la toma de decisiones.

### 2.1 Análisis de datos AIS

El sistema **AIS** (Automatic Identification System) permite la identificación y seguimiento de buques, de forma automática, desde otros buques, aeronaves o estaciones costeras. Este sistema se basa en un dispositivo instalado a bordo de los buques que transmite, de forma continua y automática, información que permite al resto de buques existentes en la zona o a estaciones situadas en tierra identificarlos y conocer su situación y parámetros de movimiento.

El AIS ha sido desarrollado bajo el auspicio de la Organización Marítima Internacional (OMI) y su instalación y utilización en los buques sujetos al Convenio SOLAS (Safety of Life at Sea) es **obligatoria** desde el 31 de diciembre de 2004. Están obligados a incorporar estos dispositivos:

- Todos los buques en viaje internacional con un arqueo bruto (GT) superior o igual a 300
- Todos los buques en viaje no internacional con arqueo bruto (GT) superior o igual a 500
- Todos los de pasajeros, sea cual sea su tamaño

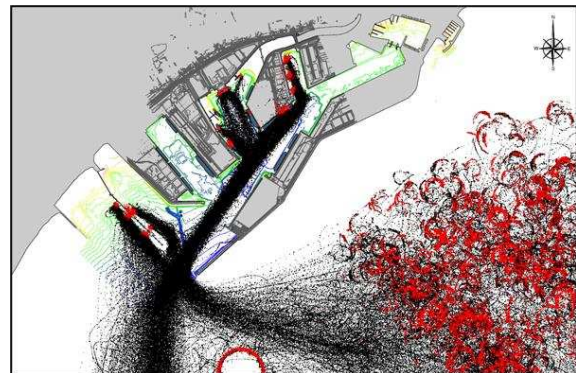


Figura 1. Análisis de datos AIS. Trayectorias de los buques y ocupación de fondeaderos

Los equipos AIS emiten los mensajes que contienen los datos relativos a la posición y estado de movimiento del buque con una

periodicidad variable dependiendo del estado de navegación, de la velocidad y de la maniobra que realiza.

Previo al análisis detallado de datos AIS, se somete a los mismos a una serie de filtros de calidad y validación para verificar la fiabilidad de la información disponible. Concretamente,

- **Filtro de datos:** La base de datos AIS durante el periodo de análisis puede contener datos duplicados, no ser completa o contener saltos temporales debido a errores o fallos en la estación receptora, de forma que los resultados pueden no contemplar todos los buques que han entrado y salido del puerto durante el citado periodo de análisis. Los registros erróneos son eliminados.

- **Análisis de datos perdidos.** Se evalúa la eficacia de la información disponible con el fin de identificar periodos de tiempo en que, por alguna razón, exista una ausencia de registro en los datos AIS y así tenerlo en cuenta en el posterior análisis detallado.

- **Validación de datos:** se contrasta la información disponible de los datos AIS con otras fuentes, como MarineTraffic o información facilitada por las propias terminales portuarias, confirmando la similitud en tipo y número de buques que acceden al sistema.

Una vez verificada la calidad y fiabilidad de los datos AIS disponibles, se analiza un gran número de variables requeridas para conocer con un gran nivel de precisión el comportamiento del tráfico marítimo dentro del sistema portuario, así como para definir los datos de entrada requeridos para la construcción y calibración del modelo de simulación de tráfico marítimo. A continuación, se citan las **variables más relevantes** en este tipo de estudios:

- **Análisis de buques en navegación:**
  - Condición de carga en función de acceso o salida y, por tanto, tipo de operación (importación o exportación)

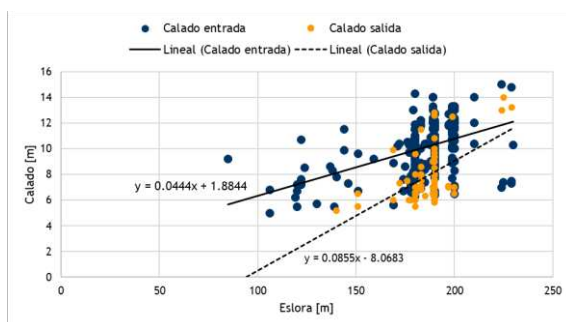


Figura 2: Análisis de operaciones. Ejemplo de condición de carga en entradas y salidas

- Tipología de buque según mercancía y dimensiones.
- Frecuencia de acceso anual y estacionalidad del tráfico (cruceos)
- Ruta del buque: canal de acceso al sistema, canal de salida y puntos intermedios (fondeaderos, terminales)

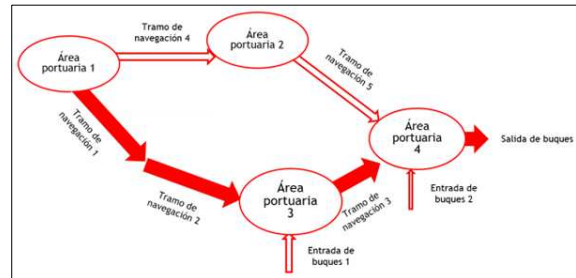


Figura 3. Análisis de ruta. Ejemplo de ruta de buques en un sistema complejo

- Análisis de maniobras de cruce: en caso de existir, lugar y frecuencia del evento, dimensiones combinadas de los buques que se cruzan, velocidad y distancia de cruce, etc.
- Estrategia de maniobra: zonas de parada, zonas de reviro, velocidades de navegación, uso de remolcadores

- **Análisis de buques en fondeadero:**
  - Frecuencia de operaciones de fondeo (ratio buque que accede / buque que fondea)
  - Tipología de buques que suelen fondear (mercancía y dimensiones) y tráficos prioritarios (fondeo poco común, acceso directo sin esperas)
  - Ocupación de las zonas de fondeo (promedio de área ocupada). Tipología de buque según mercancía y dimensiones.

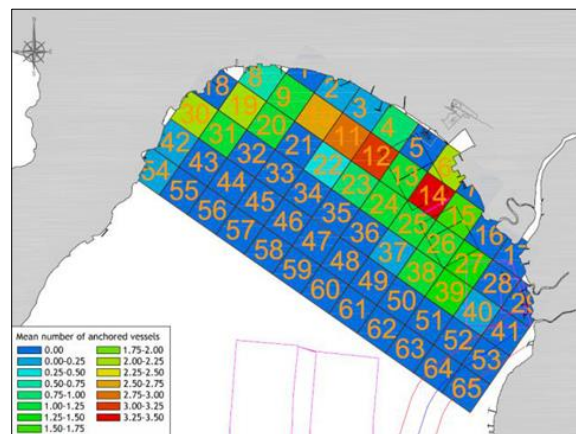


Figura 4: Análisis de ocupación de las zonas de fondeo. Mapa de ocupación de una bahía



- Tiempo de estancia en fondeadero en función de la tipología del buque
- Operaciones de fondeo en función de la terminal a la que acceden los buques (identificación de causa de espera)
- Preferencias de fondeo: zona en la que los buques suelen fondear en función de tipo de buque (mercancía y dimensiones) y terminal a la que se dirigen
- **Análisis de buques en terminal:**
  - Tipo y dimensiones de buques que acceden a cada terminal
  - Frecuencia de acceso (número de operaciones)
  - Nivel de ocupación de las terminales
  - Tiempo de estancia en terminales en función de la terminal (eficiencia de los mecanismos de carga / descarga), mercancía y dimensiones del buque

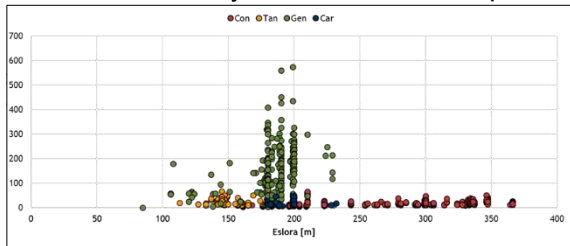


Figura 5: Análisis de tiempo de estancia. Distintos tipos y dimensiones de buques

## 2.2 Definición de indicadores característicos

El objetivo de definir una serie de indicadores característicos es facilitar la toma de decisiones por medio de comparación de los mismos entre los distintos escenarios analizados y, por tanto, han de estar alineados con los objetivos y particularidades del proyecto. Además, los mismos indicadores seleccionados servirán como base para el proceso de calibración del modelo de tráfico marítimo.

Tras calibrar el modelo de tráfico marítimo y analizar los distintos escenarios planteados, se obtienen los indicadores definidos y establecidos ad hoc y se procede a comparar las ventajas e inconvenientes de las distintas medidas estudiadas.

Los indicadores más típicos en este tipo de estudios son los indicadores de **eficiencia** del sistema portuario. No obstante, existen otros indicadores como los de **riesgo**, **económicos** o incluso **medioambientales**, que pueden resultar relevantes en la toma de decisiones.

A continuación, se destacan algunos ejemplos de **indicadores característicos** más comunes:

- Relacionados con el uso de las **terminales**: la **ocupación** de las terminales así como la

fracción de tiempo que los buques permanecen atracados y no están esperando (**tiempo útil** en el atraque) son indicadores tanto de **capacidad** (margen extra de las terminales para absorber más tráfico) del sistema como de **eficacia** (eventos de espera en las terminales).

- Relacionados con el uso de las **zonas de fondeo**: como con las terminales, la **ocupación** de las zonas de fondeo también indica la **capacidad** del sistema (margen extra de los fondeaderos para absorber más tráfico). Así mismo, un mayor uso de las zonas de fondeo indica una mayor congestión y, por tanto, menor **eficacia**.
- Relacionados con la capacidad del **sistema marítimo-portuario**: teniendo en cuenta buques fondeados, atracados y en navegación, se puede determinar la fracción de buques que están en un sistema y están siendo realmente eficaces (carga / descarga en terminales). De nuevo, se trata de una medida de **eficiencia** del sistema.
- Relacionados con los **buques que acceden** al sistema: los parámetros de mayor interés con respecto a los buques que acceden son aquellos relacionados con las esperas de los buques en función de sus dimensiones, calado, mercancía, y terminal en la que operan
  - o Tiempo promedio de espera
  - o Zona en la que espera
  - o Causa de espera. A su vez, ayuda a identificar cuellos de botella.
- Relacionados con el **ingreso económico**: por último, en caso de disponer de información suficiente, se puede estimar el ingreso económico derivado de las actividades náuticas como son las tarifas de entrada a puerto, de uso del VTMS, de uso de fondeadero, de terminal, tarifas de practillaje, de remolque y de amarre.
- Relacionados con el **riesgo**: aunque la herramienta no es adecuada para **cuantificar** el riesgo, sí se pueden obtener indicadores que de alguna forma están directamente relacionados con el riesgo, como son el número de eventos de cruce, o la distancia recorrida por un buque hasta la terminal (si un buque accede de forma directa a terminal o por el contrario ha de navegar una mayor distancia hasta zonas de fondeo disponibles). La siguiente figura ilustra en para tres trayectorias distintas algunos casos de acceso a terminal "indirecto" en que los buques han navegado una mayor distancia que la óptima por fondear lejos de su terminal de destino.

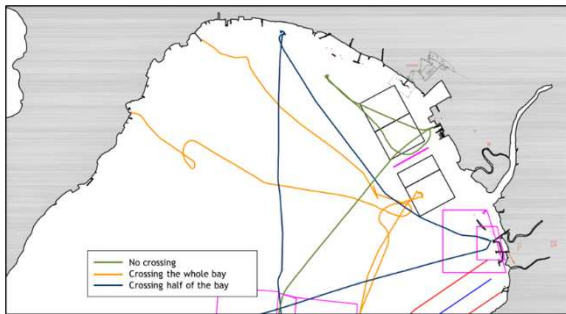


Figura 6: Indicadores de riesgo. Eficacia de la ruta de navegación

### 2.3 Construcción y calibración del modelo de simulación de tráfico marítimo (Siflow21)

La **construcción del modelo** consiste en caracterizar los siguientes elementos, los cuales conforman la creación de un sistema de navegación:

- **Buques:** todas las características de los buques a generar se describen en este módulo para generar una llegada aleatoria de buques representativa de la realidad (destino, patrones de llegada, ruta a navegar, terminales de destino, tiempo mínimo de estancia en terminal, ...). También se define el tiempo que tarda en navegar cada tramo de canal lo cual describe, de forma inherente, la velocidad de navegación del buque. Este módulo también determina cuántos buques se generan según el tipo de flota y cómo varía el tiempo de llegada entre los buques, incluyendo los fenómenos de estacionalidad.
- Elementos estáticos del **puerto**:
  - o **Terminales.** Puntos donde los buques acceden, permanecen un tiempo mínimo determinado necesario para realizar las operaciones de carga / descarga y esperan en terminal antes de iniciar las maniobras únicamente en caso de ser necesario. Se definen como características el número máximo de buques simultáneamente atracados, la longitud de atraque disponible y la profundidad.
  - o **Fondeaderos.** Punto donde los buques esperan únicamente en caso de ser necesario. También es posible exigir a los buques que esperen un tiempo mínimo previamente a continuar la su ruta. Se definen como características el número máximo de buques simultáneamente fondeados, el área de atraque disponible y la profundidad.

- o **Tramos de canal.** Tramos a través de los cuales los buques navegan entre elementos del puerto (entre fondeadero y terminal, canal y terminal, etc.). Se definen como características la profundidad y el número máximo de buques que puede navegar simultáneamente a través de un tramo de canal.

- **Normas de navegación** (control de tráfico, Pilotos o Prácticos). Este amplio módulo describe para cada zona de navegación y buque, las normas aplicables a maniobras de cruce y adelantamiento entre buques, distancia mínima durante la navegación, mínimo nivel de agua bajo quilla. Por último, se incluyen también los límites hidrometeorológicos de acceso (viento, corriente y oleaje).

- **Condiciones de viento, oleaje, y visibilidad:** todas las características de viento (dirección e intensidad), oleaje (dirección, periodo, altura de ola), y visibilidad (buena o mala) se describen en este módulo.

- **Marea y corriente:** se definen las variaciones del nivel de agua e intensidades de corriente en los distintos elementos del sistema (terminales, fondeaderos y tramos de canal de navegación) a lo largo del año.

Una vez se han definido todos los módulos necesarios para la construcción del modelo, el proceso de **simulación** es iniciado por el módulo 'buques', encargado de realizar la **generación aleatoria de buques** en base a distribuciones estadísticas. Tras la generación de cada buque, se comprueban las restricciones a lo largo de su ruta de navegación predefinida.

El **proceso de chequeo** es el siguiente:

- Se comprueban las **restricciones** en el punto más cercano en que el buque puede **esperar** (nivel de agua y disponibilidad/capacidad).
- Una vez verificada la viabilidad de esperar en el punto más cercano posible, se comprueban las **restricciones durante el recorrido** desde la posición actual, hasta dicho punto de espera. En cada tramo de dicho recorrido, se chequea la normativa:
  - o De **cruces:** en base a la zona de navegación, tipología y dimensiones de los buques, el cruce está o no permitido.
  - o De **distancia mínima de seguridad:** al buque más próximo, en función de tipología y dimensiones de los buques.
  - o De **nivel de agua mínimo** bajo quilla.

- En caso de que existan **restricciones**:
  - o Durante el recorrido hasta el punto más cercano de espera, el buque esperará antes de iniciar su navegación hasta que dicha navegación sea viable cumpliendo con la **normativa o regulación** aplicada.
  - o En el punto más cercano de espera: el buque esperará antes de iniciar su navegación por las secciones correspondientes hasta que la espera en dicha zona sea viable cumpliendo con normativa o hasta que la navegación completa hasta la **siguiente zona de espera sea viable**.

Este proceso de comprobación se repite de forma análoga a lo largo de la ruta completa del buque. Las terminales son consideradas como punto en el que los buques también pueden esperar. No obstante, a diferencia de los fondeaderos, los buques han de permanecer obligatoriamente un tiempo predefinido de servicio en las terminales (esperen o no en ellas).

Tras construir el modelo, se realiza la **calibración** sometiendo el modelo a un proceso iterativo de ajuste - simulación - análisis de resultados hasta alcanzar unos resultados lo suficientemente próximos a la realidad. El proceso de calibración es siempre realizado sobre la base de un escenario real, del cual se disponga de información del comportamiento del tráfico marítimo con un adecuado nivel de detalle y precisión.

Los niveles requeridos de detalle para lograr resultados fiables se consiguen el análisis de **datos AIS**. No obstante, hay información que no es posible extraer de su análisis como es el calado de navegación de los buques o las causas de eventos de espera. En este sentido resulta recomendable recopilar información de la **autoridad portuaria** o los **operadores** y mantener **entrevistas con expertos locales** que puedan ampliar la información disponible.

#### 2.4 Análisis de escenarios alternativos

Una vez se ha construido y calibrado el modelo matemático, se emplean los resultados del modelo de la situación actual como referencia para el proceso de comparación de los indicadores característicos de los escenarios alternativos. Siflow21 es una herramienta muy versátil que permite adaptar el modelo e incluir diversos cambios con el fin de valorar su impacto (positivo o negativo) sobre el comportamiento del tráfico apoyándose en los

indicadores característicos definidos para cada estudio.

Los escenarios a futuro pueden considerar:

- Incrementos de volumen de tráfico (número de buques de una o varias tipologías)
- Cambios en la infraestructura (nuevas terminales, profundización de canales)
- Mejora de recursos (señalización, practicaje, remolque, etc.)
- Cambios en las normas de navegación (diurna/nocturna, permisos de cruce, reserva de canal, UKC mínimo, etc.)

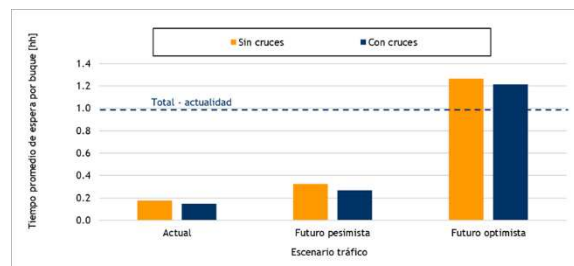


Figura 7: Comparación de indicador característico (tiempo de espera) de diversos escenarios con respecto al base (actuality)

Además de evaluar el impacto de los cambios relevantes para el flujo de tráfico, con el fin de determinar la **capacidad** (número máximo de buques que pueden acceder al sistema) de un determinado escenario es preciso analizar **varios escenarios de intensidad de tráfico** (número de buques que acceden al sistema). En este sentido, cada modificación aplicada sobre el sistema se analiza típicamente para tres niveles de tráfico, permitiendo así realizar **estimaciones y extrapolaciones** con un nivel de fiabilidad suficiente.

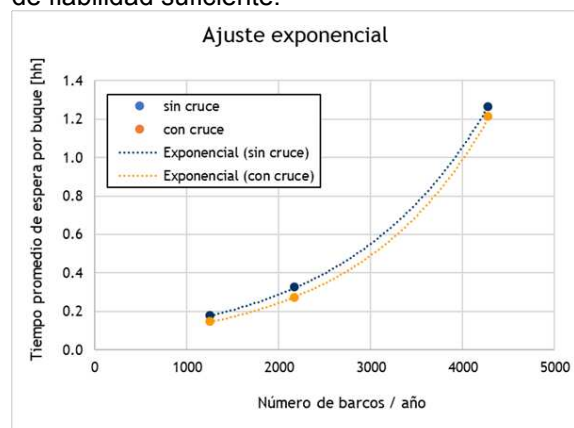


Figura 8: Extrapolación de resultados para tres niveles de tráfico. Comparación de dos escenarios (con y sin zonas de cruce)

La selección de los distintos **escenarios de tráfico** se basa en estudios de **predicción de tráfico a futuro**, cubriendo la **vida útil de la**



**obra** proyectada. Estos estudios se realizan con un alto nivel de detalle, considerando información relevante como evolución histórica del tráfico, planes maestros de terminales y puertos dentro del sistema a modelar, o incluso la previsión de terminales de nueva construcción que puedan suponer nuevos tipos de tráfico significativos para el sistema portuario bien por su tipología (por ejemplo, transporte GNL), o bien por su frecuencia.

Como resultado, se determina el **número máximo de buques** que puede acceder para los **distintos escenarios** analizados, y para un **nivel de congestión máximo** aceptable. Cabe destacar que la capacidad del sistema viene determinada por la capacidad limitante de los elementos del puerto (terminales, fondeaderos, canales, remolcadores, prácticos, etc.).

Adicionalmente, la **combinación de indicadores característicos de eficacia y de riesgo** permite determinar la **combinación óptima de acciones** sobre los escenarios analizados, que supone niveles adecuados de congestión y de seguridad de las actividades náuticas.

### 3 CASOS DE APLICACIÓN

La metodología empleada implica la realización de estudios de un alto nivel de detalle con el fin de poder reproducir fielmente tanto escenarios actuales como futuros, pasando por un proceso de verificación de fiabilidad de los resultados. Asimismo, el modelo Siflow21 permite introducir como parámetros de entrada un gran número de variables que definen con precisión la realidad de sistemas de tráfico marítimo-portuarios con altos niveles de complejidad.

Todo ello ha permitido la aplicación de esta metodología en casos diversos de estudio. A continuación, se citan algunos de los estudios más relevantes por su novedad o magnitud:

- **Proyecto de profundización de un canal.** Cuando el acceso a un canal de navegación viene determinado por el nivel de marea (ventanas operativas de acceso) es relativamente frecuente que exista cierto nivel de congestión y concentración de buques especialmente de mayor calado que buscan la misma ventana de acceso. Una de las medidas más eficaces para reducir estas esperas consiste en profundizar las zonas de navegación necesarias. En este sentido, los estudios de simulación de tráfico marítimo permiten conocer en qué medida una obra de dragado determinada permite reducir la congestión del tráfico y, así mismo, determinar la capacidad del nuevo

canal dragado (cuántos buques más al año pueden acceder tras las obras de dragado).

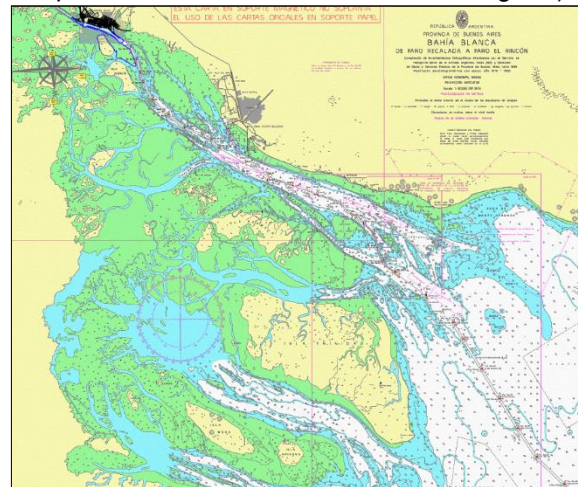


Figura 9: Carta náutica de Bahía Blanca (Argentina). Canal de navegación de gran longitud en un estuario mareal

- **Nuevas terminales de mercancías peligrosas.** El transporte de GNL, por ejemplo, conlleva la implementación de una serie de medidas de seguridad estrictas y específicas para este tipo de tráfico (distancias de seguridad, prohibición de cruces, etc.). Una de las principales preocupaciones es, por tanto, la posible afección que pueda derivarse de este nuevo tráfico en el comportamiento general del tráfico en una zona determinada.
- **Habilitación de zonas de cruce.** La definición de zonas de cruce es una medida frecuentemente aplicada para reducir la congestión en una determinada zona. No obstante, se trata también de una zona crítica para los riesgos náuticos. Los estudios de simulación de tráfico marítimo dan soporte para la toma de decisiones, encontrando el punto óptimo en la reducción de congestión compensa el posible incremento del riesgo de navegación.
- **Reordenación de zonas de fondeo.** Existen sistemas portuarios, como bahías o zonas de refugio, en los que las operaciones de fondeo suponen una operativa común e importante en el flujo de tráfico. En la medida en que el tráfico crece en estas zonas, es común que la operativa de fondeo, ordenada a priori, evolucione a situaciones más caóticas y optimizables. La metodología aplicada puede simular distintos casos de reordenación de las zonas de fondeo, incluyendo además cambios en la normativa. Estos escenarios pueden lograr una mejora sustancial no solo la eficacia del sistema, sino también los

riesgos náuticos minimizando eventos de encuentro entre buques o distancias a navegar.



Figura 10: Fondeadero con alta ocupación

- **Cambios importantes en el flujo de tráfico**, como puede ser desplazar la ubicación de una terminal a otra posición (cambio en la ruta de navegación de todo un tráfico), son también escenarios que se pueden representar y analizar con este tipo de estudios, dando así respuesta al impacto sobre el tráfico en general y sobre el tráfico desplazado en particular.



Figura 11: Sistema portuario complejo  
Puerto de Tarragona (España)

- **Incremento global o individual de la intensidad de tráfico** (número de llegadas). En aquellos casos en que se considera ampliar una terminal de tal forma que el número de escalas sea significativamente incrementado, se puede evaluar el impacto de este incremento sobre la congestión del sistema, identificando los cuellos de botella. Y, en una segunda etapa, evaluar contramedidas de alivio (de infraestructura, recursos u operativas).

### 3 CONCLUSIÓN

Siport21 ha desarrollado el modelo matemático Siflow21, Simulador de Flujo de Tráfico Marítimo basado en SED (simulación de eventos discretos), como herramienta avanzada de análisis de la capacidad y nivel de seguridad de

vías navegables y sistemas portuarios complejos.

En fase de planificación de obras de infraestructura y dragados, aporta datos fiables para la evaluación coste-beneficio de la inversión y la selección de la mejor alternativa, garantizando la capacidad prevista a futuro y su nivel de seguridad/riesgo marítimo.

Tiene también aplicación operativa, pues permite cuantificar el nivel de congestión identificando los factores críticos de operación o seguridad, definiendo y verificando medidas de respuesta, ya sean cambios en normativa, mejora de recursos o actuaciones sobre la infraestructura.

Destaca su potencia y versatilidad para adaptarse a sistemas de navegación de alta complejidad. La diversidad de casos de aplicación en los últimos años así lo demuestra, aportando información y soluciones de gestión de gran utilidad.

Por otra parte, está totalmente alineado con la tendencia Smart Ports 4.0, al gestionar enormes volúmenes de datos con técnicas Big Data, Data Analytics y DataViz, mediante algoritmos de Inteligencia Artificial para identificar relaciones espacio-temporales entre los diversos tráficos y las condiciones físicas. La simulación de escenarios virtuales y la capacidad de gestión casi en tiempo real lo enfocan hacia el concepto Gemelo Digital de la vía de navegación/sistema portuario que se impondrá en un futuro próximo.

### 4 REFERENCIAS

PIANC. 1992. Report Marcom 20 “Capability of ship maneuvering simulation models for approach channels and fairways in harbors”

PIANC. 2014. Report Marcom 121 “Harbour Approach Channels Design Guidelines”

Siport21. 2020. SIFLOW21 - Simulador de Flujo de Tráfico Marítimo. Especificaciones técnicas

Cabello Fernández, Alejandro. 2016. “Desarrollo de un simulador de eventos discretos en Python”. Universidad de Alcalá. Escuela Politécnica Superior. Grado en Ingeniería Telemática

MacDougall, M.H. 1987. “Simulating Computer Systems: Techniques and Tools (Computer Systems Series)”. MIT Press