

## **Paper CA1213 - MEJORA DE LAS AYUDAS A LA NAVEGACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DE NAVEGACIÓN DE BUQUES**

Redondo, Raúl; Atienza, Raúl; Pecharromán, Lourdes; De Andrade Pires, Leandro  
Siport21  
Email: raul.redondo@siport21.es

**ABSTRACT:** Las ayudas a la navegación sirven para asistir a los buques en su tránsito, y cobran especial importancia en zonas confinadas. Que el diseño de las ayudas a la navegación sea óptimo depende del posicionamiento del buque, que se ve afectado por diversos factores como la geometría de la zona de navegación, las condiciones climáticas, el pilotaje y la propia señalización. Las Ayudas a la Navegación son un parámetro fundamental del diseño del canal, junto con los buques de diseño y su maniobrabilidad y, por tanto, se han de analizar en conjunto.

Las ayudas a la navegación proveen información para que los buques se posicionen en el canal de navegación, incrementando la seguridad al indicar la zona navegable mediante el uso de referencias visuales, físicas o electrónicas. Sin embargo, la disponibilidad de las ayudas introduce un cierto error de posicionamiento, afectado según el tipo y número.

Optimizar las señales y la distancia entre ellas permite una navegación más segura, así como expandir los límites de la vía, permitiendo el acceso de buques mayores de forma segura, reduciendo el área efectiva requerida, mientras se minimizan costes de dragado. Optimizar simultáneamente el diseño de la zona de navegación y las ayudas a la misma, lleva a proyectos técnica y económicamente viables sin perjuicio para la seguridad. Incrementar sin control ni análisis las ayudas a la navegación no reduce necesariamente el área de navegación requerida por los buques.

Se presentan dos ejemplos de optimización de las ayudas de la navegación donde se han empleado tanto modelos de maniobra en tiempo acelerado como simuladores de maniobra en tiempo real, por ser las herramientas más adecuadas para este análisis.

El primer ejemplo muestra como los errores de posicionamiento de la vía de navegación se determinan en base a las ayudas existentes. Teniendo en cuenta dichos errores, se realizan simulaciones aleatorias con modelo de autopiloto permitiendo un análisis estadístico del espacio seguro requerido. Mediante la repetición del análisis reduciendo los errores de posicionamiento (dispersión) es posible comparar el área de navegación requerida con diferentes niveles de precisión derivados de la mejora de las ayudas a la navegación. Esto permite, por ejemplo, considerar el ingreso de buques mayores.

El segundo ejemplo muestra maniobras de Simulador en Tiempo Real de buques portacontenedores saliendo de una dársena confinada para acceder a un canal estrecho. Del análisis estadístico según metodología PIANC WG121 se determinan requerimientos de dragado. El análisis de los resultados permite identificar la zona en que una mejora de la señalización llevaría a un mejor posicionamiento del buque, y, por tanto, a reducir el área de navegación requerida y los costes de dragado.

Evaluar en conjunto el canal y las ayudas a la navegación, y su optimización, permite reducir costes de dragado o hace posible, sin perjuicio a la seguridad, el acceso de buques mayores. El uso de modelos de maniobra (autopiloto en tiempo acelerado o Simuladores en Tiempo Real) permite verificar la mejora en eficiencia de las medidas adoptadas antes de implementarlas en la realidad.

Las sesiones de maniobra en Simuladores en Tiempo Real son el lugar perfecto para que las partes interesadas (Autoridades Marítimas y Portuarias, Pilotos, Navieras, ...) interactúen, analicen y trabajen en conjunto para acordar las mejores opciones para la mejora de las condiciones de la navegación mientras se mantiene la seguridad de las operaciones

## 1 INTRODUCCIÓN

Las ayudas a la navegación proveen información para el posicionamiento de los buques en los canales de navegación, incrementando la seguridad al mostrar la zona segura para los buques, ya sea mediante referencias visuales, físicas, o virtuales ...

La disponibilidad de ayudas implica, sin embargo, un cierto error de posicionamiento del buque en la vía de navegación, que varía (incrementando o reduciéndose) dependiendo de tipo de ayuda, las condiciones locales (principalmente relacionadas con la visibilidad como niebla o lluvia) y la distancia entre señales consecutivas

Es posible mejorar las ayudas para optimizar la navegación. Esto se realiza mediante la minimización del error de posicionamiento, permitiendo el ingreso de buques mayores con seguridad sin modificar el ancho del canal. Sin embargo, hay un punto por el cual, aunque se incrementen y añadan más ayudas a la navegación, no se mejora el espacio requerido por los buques, y, por lo tanto, se requiere encontrar el diseño óptimo que maximice el tamaño del buque que accede y no sature de señalización.

Se presentan dos ejemplos de optimización de la señalización donde la mejora de las ayudas permite el acceso de buques mayores o la reducción de costes de dragado. Para la evaluación de las optimizaciones se emplean tanto modelos numéricos de maniobra con autopiloto en tiempo acelerado, como los simuladores de maniobra en tiempo real, ya que son las herramientas más adecuadas para analizar las condiciones de maniobras de buques en canales de navegación.

La importancia de analizar conjuntamente el diseño de la vía de navegación junto con las ayudas requeridas, y su optimización, permite reducir costes de dragado y/o incrementar el tamaño de los buques que navegan en una determinada zona, sin para ello, reducir la seguridad de las maniobras. El uso de los modelos de maniobra en tiempo acelerado o los simuladores en tiempo real, para comprobar y verificar las mejoras de los canales y sus condiciones de navegación es esencial en este tipo de estudios ya que permite verificar la efectividad de las soluciones propuestas antes de su implementación en la realidad.

Los Simuladores de Maniobra en Tiempo Real y las sesiones de simulación son el lugar idóneo

para que las distintas partes implicadas en los diseños y desarrollos, de zonas portuarias o de canales de navegación (Autoridades Portuarias, Prácticos, Patrones de Remolcadores, Capitanes de Puerto, Diseñadores, Operadores ...) interactúen, discutan y evalúen, llegando a puntos en común para la mejor solución de mejora de las condiciones de navegación, y siempre sin perjuicio de la seguridad de las operaciones marítimas.

## 2 ERRORES DE POSICIONAMIENTO

Todas las guías y recomendaciones para el diseño de áreas de navegación, nacionales e internacionales, consideran que las ayudas a la navegación, que se incorporan al diseño para la seguridad de las maniobras, producen cierto error en el posicionamiento de los buques dentro de la zona de navegación, y, por tanto, se deben considerar en el diseño.

Las ayudas pueden ser fijas o flotantes. Las ayudas fijas no poseen un error en su posición mientras que las flotantes, sometidas a fuerzas exteriores, introducen adicionalmente un error propio en su posicionamiento, principalmente debido al desplazamiento y borneo de estas.

Para los objetivos de este trabajo, solo se consideran los errores de posicionamiento que las ayudas a la navegación introducen debido al tipo y número de señales, pero no a sus propios "errores" de posicionamiento

Lo errores de posicionamiento se incrementan con la distancia a las mismas, y a distancias muy reducidas, se consideran para el análisis las siguientes ayudas a la navegación. A modo de ejemplo, a unos 200 m de un par de boyas, el Piloto o Capitan a cargo de la maniobra empieza a tomar como referencia el siguiente par de boyas, olvidándose del más próximo.

La imagen siguiente muestra como los pares de boyas, ayudan a concentrar las trayectorias y permiten que un buque se posicione con un margen de error menor, reduciendo por tanto el espacio ocupado, que cuando solo se dispone de una boya lateral. En el ejemplo siguiente, con más de 100 maniobras reales, se puede observar como la disponibilidad del par de boyas, reduce el ancho del canal de navegación prácticamente a la mitad, con respecto a la boya anterior.

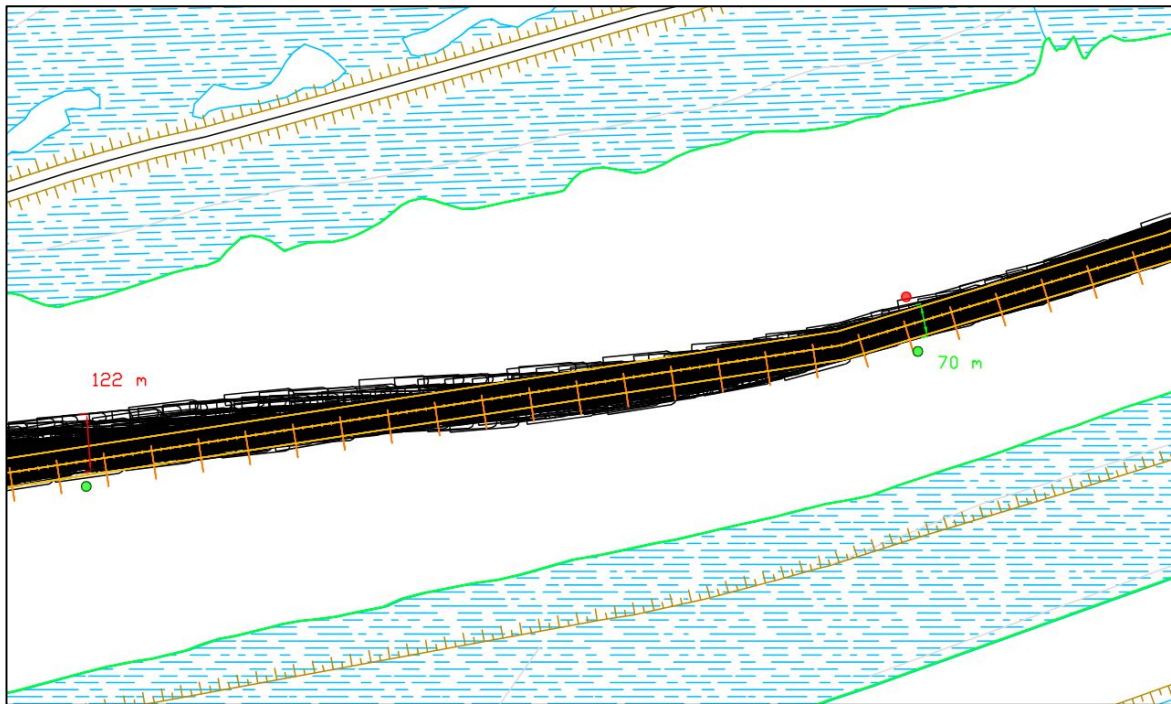


Figura 1: Trayectorias de buques en un canal de navegación. Ejemplo de Reducción en la dispersión en el par de boyas

Las guías y recomendaciones, tanto nacionales como internacionales, consideran estos errores de posicionamiento. Las siguientes tablas y

figuras muestran distintas referencias que se pueden emplear para el diseño de zonas de navegación y con distintos niveles de detalle.

Tabla 1: Sobreanchos debido a errores de posicionamiento. PIANC 121 «Harbour Approach Channels Design

EXCELENTES 0.0 B DE SOBREANCHO	BUENAS 0.2 B DE SOBREANCHO	MODERADAS 0.4 B DE SOBREANCHO
<p><b>Canal:</b> Pares de boyas iluminadas con reflectores de radar Enfilaciones iluminadas VTS, donde sea aplicable</p> <p><b>Disponibilidad:</b> Prácticos/Pilotos DGPS ECDIS</p>	<p><b>Canal:</b> Pares de boyas iluminadas con reflectores de radar Enfilaciones iluminadas</p> <p><b>Disponibilidad:</b> Prácticos/Pilotos DGPS</p>	<p>Cualquier cosa menor que lo mencionado en buenas o excelentes</p>

	Operación sin práctico o sin capitán experimentado en el emplazamiento considerado	Operación con práctico o capitán experimentado en el emplazamiento considerado
• Posicionamiento visual en estuarios abiertos, sin balizamiento:	100 m	50 m
• Posicionamiento visual referido a boyas o balizas en vías de aproximación:	50 m	25 m
• Posicionamiento visual entre alineaciones de boyas o balizas que marquen los límites de la vía:	20 m	10 m
• Posicionamiento visual mediante enfilaciones:	0,5°	0,5°
• Posicionamiento mediante sistemas radioeléctricos (válidos para situarse sobre una carta náutica, sin posicionamiento visual)		
— Radiofaros:	5,0°	5,0°
— Radar (a bordo). Banda S:	1,5°	1,5°
— Radar (a bordo). Banda X:	1,0°	1,0°
— RACON(distancia /demora):	150 m/0,3°	150 m/0,3°
— TRANSIT. Doble Frecuencia:	25 m	25 m
GPS:	100 m	100 m
DGPS:	10 m	10 m

Figura 2: Errores de posicionamiento derivados de la señalización “ROM 3.1-99”

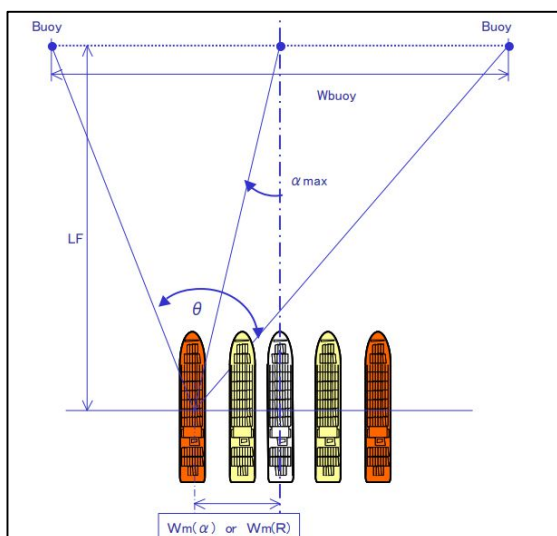


Figura 3: Errores de posicionamiento derivados de un par de boyas. “IALA G1078 THE USE OF ATON IN THE DESIGN OF FAIRWAYS”

Cuando varias referencias están disponibles en la misma zona, como enfilaciones y pares de boyas, aquella que provee menor error de posicionamiento en cada una de las secciones es la considerada. En base a las recomendaciones del cálculo de errores de posicionamiento de las imágenes y tablas superiores, se han obtenido los siguientes valores en un canal de navegación, que como se puede apreciar, varían ampliamente, entre 20 y 70 metros.

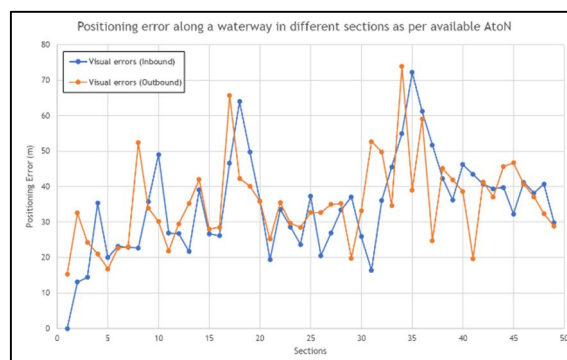


Figura 4: Errores visuales para diferentes secciones del canal de navegación

El área ocupada por el buque en la vía de navegación no solo depende de la señalización, si no que otros factores como el viento, el olaje, el UKC, ... influyen también en el espacio requerido.

Las conclusiones se obtienen, por tanto, teniendo todos los factores en consideración. Para poder evaluar la importancia del error de posicionamiento de las ayudas a la navegación en el ancho global ocupado por los buques se presenta la siguiente imagen, donde se muestra una relación entre el espacio ocupado por el buque, en distintas secciones, y el error de posicionamiento en cada una de ellas, distinguiendo entre tramos curvos y tramos rectos.

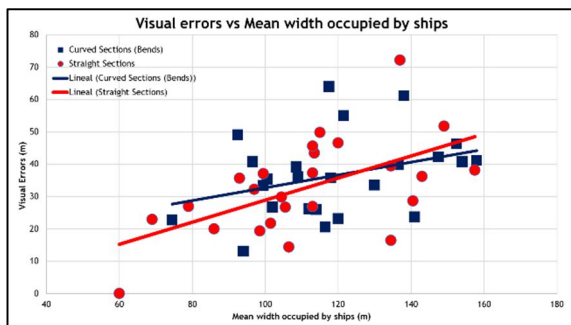


Figura 5: Dispersión de errores visuales frente a ancho medio ocupado

Esta gráfica muestra una relación mayor para tramos rectos que por tramos curvos, esto se debe a que el posicionamiento del buque en curvas, y el espacio ocupado en la misma, está muy ligado al tiempo de respuesta y el factor humano del Práctico o Capitán, y no tanto con el posicionamiento visual cuando un buque se encuentra en una fase transitoria como es un tramo curvo.

### 3 OPTIMIZACIÓN MEDIANTE MODELOS DE MANIOBRAS CON AUTOPILOTO ACELERADO

Los Modelos de Maniobra con Autopiloto en tiempo acelerado permiten la realización de un gran número de simulaciones en un corto periodo de tiempo, combinando distintos parámetros. Con esta herramienta se puede establecer una metodología para evaluar las mejoras de las ayudas a la navegación en grandes canales de navegación. Esto se consigue con la realización de simulaciones con autopiloto aleatorias en combinación con el análisis estadístico para determinar los espacios de navegación segura de acuerdo con el PIANC 121 y a la ROM 3.1-99.

Como se describe en la sección 2, se puede determinar el error de posicionamiento a lo largo de una zona de navegación. Con estos errores de posicionamiento, se realizan maniobras con el modelo numérico de maniobra con autopiloto en tiempo acelerado de forma aleatoria, donde los puntos de referencia de la trayectoria se modifican de forma aleatoria, ligados a un valor medio y a unas desviaciones estándar derivada de los errores de posicionamiento en cada zona.

Considerando las mejoras de las ayudas a la navegación en las zonas más críticas se puede reducir el error de posicionamiento, y repetir las maniobras aleatorias mediante la reducción en la dispersión de los puntos de referencia.

La comparación de los resultados del análisis estadístico del espacio ocupado, con y sin mejoras de la señalización, permite evaluar el beneficio obtenido y la viabilidad de permitir el acceso de buques mayores o de reducir el área de dragado.

Además, los modelos de autopiloto en tiempo acelerado permiten determinar las secciones o zonas críticas para la navegación. Esas zonas críticas son las de mayor potencial de optimización y mejora y, por tanto, se pueden evaluar en detalle con herramientas más avanzadas como el Simulador en Tiempo Real. En el Simulador en Tiempo Real se pueden incorporar las mejoras de la señalización, de tal forma que los Capitanes o Prácticos en la realización de la maniobra vean la nueva señalización y realicen la maniobra con ella, incorporando el factor humano en el análisis antes de acometer las mejoras en la realidad.

### 4 OPTIMIZACIÓN MEDIANTE EL USO DE LOS SIMULADORES DE MANIOBRA EN TIEMPO REAL

Los Simuladores de Maniobra en Tiempo Real son la mejor herramienta disponible para evaluar modificaciones y mejoras de las ayudas a la navegación. Permite determinar si las modificaciones obtienen el objetivo deseado de reducir el área de dragado o permitir el acceso de buques mayores.

Los estudios de Simulación en Tiempo Real incluyen la participación de Capitanes expertos y Prácticos Locales, que realizan la maniobra en un entorno virtual que incluye todas las características requeridas para la navegación, permitiendo que Capitanes y Prácticos evalúen la mejora de la señalización antes de implementarla en la realidad. En esta evaluación se incorpora finalmente el factor humano (percepción y toma de decisión) no disponible en los modelos de autopiloto.

Las siguientes imágenes muestran ejemplos con canales de navegación confinados y su señalización en el Simulador en Tiempo Real



Figura 6: Imagen de Simulador en Tiempo Real. Aproximación al canal, boyas y enfilaciones



Figura 7: Imagen nocturna de Simulador en Tiempo Real, con la iluminación de la señalización



Figura 8: Imagen de Simulador en Tiempo Real con las boyas que indican los límites del canal

El siguiente ejemplo muestra un estudio realizado por fases para determinar tanto la viabilidad del acceso de buques mayores como la optimización del dragado requerido para permitir el acceso de buques portacontenedores New-Panamax a una terminal existente, en un canal diseñado inicialmente para buques menores.

En este estudio se emplea el análisis estadístico de acuerdo con el PIANC 121 para determinar la viabilidad de la estrategia de maniobra y los requerimientos de dragado en combinación con el diseño de las ayudas a la navegación.

Para ello se tuvieron en cuenta las condiciones locales, que en este caso eran moderadas, lo que permite una mayor optimización.

Inicialmente el proyecto consistía en el acceso de portacontenedores New-Panamax de 366 m de eslora y 48.2 m de manga con calado restringido a lo largo de un canal de 1.5 millas náuticas que terminaba en una dársena de reviro frente a la terminal. El canal contaba con unas ayudas a la navegación predefinidas y el uso obligatorio de PPU (Figura 9).

Después (Figura 10), el requerimiento se expandió para buques portacontenedores Maxi New-Panamax de 369 m de eslora y 52.1 m de manga con calado restringido.

Durante esta evaluación, la misma metodología fue aplicada y los resultados mostraron que en

la entrada de la dársena se requerían mayores espacios para el buque New-Panamax en comparación con el buque Maxi New-Panamax (de mayor eslora y manga) para las mismas condiciones y flota de remolque.

Solo había una diferencia que justificaba la reducción del área, y era la modificación de las ayudas a la navegación a la entrada de la dársena desde el canal de acceso, sobre todo considerando que las boyas son la referencia visual principal en dicho canal.

Considerando los distintos resultados en las zonas de navegación, se concluye fácilmente que las nuevas boyas son beneficiosas para reducir el espacio de navegación requerido (boya V-57 frente a la boya R-58 y la V-59). Esto se debe ya que permite que el práctico posicione el buque con mayor precisión y menor error.

Además, del análisis se podía concluir que instalar una nueva boya en la zona sur de la dársena, haciendo un par con la boya V-59 puede reducir o evitar la interferencia en el lado sur de la dársena en las maniobras de salida estribor al muelle, para ayudar al buque a posicionarse mejor, con mayor precisión y manteniendo mayor distancia a la zona de baja profundidad (Figura 11). Esta solución podría reducir o evitar el dragado requerido en el sur para permitir la salida del buque bajo la estrategia definida.

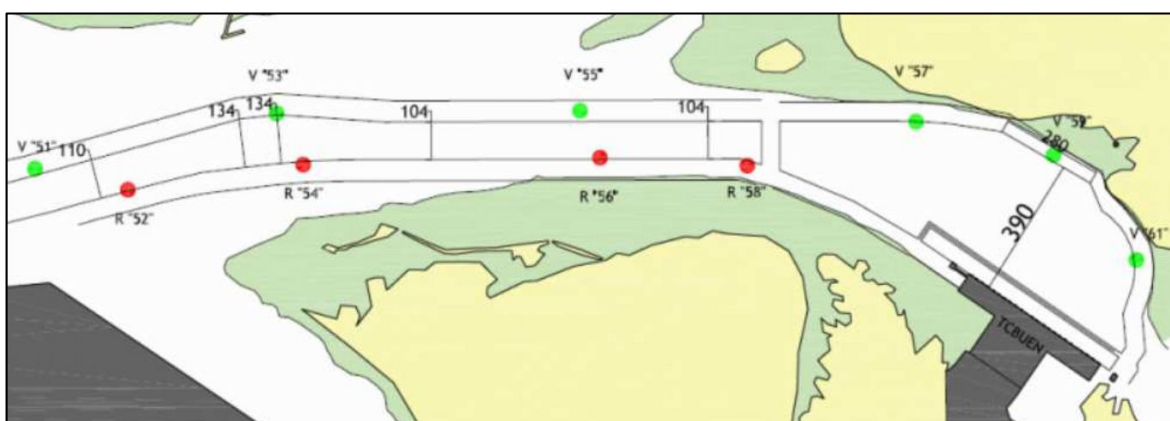


Figura 9: Canal de navegación diseñado para Portacontenedores New-Panamax

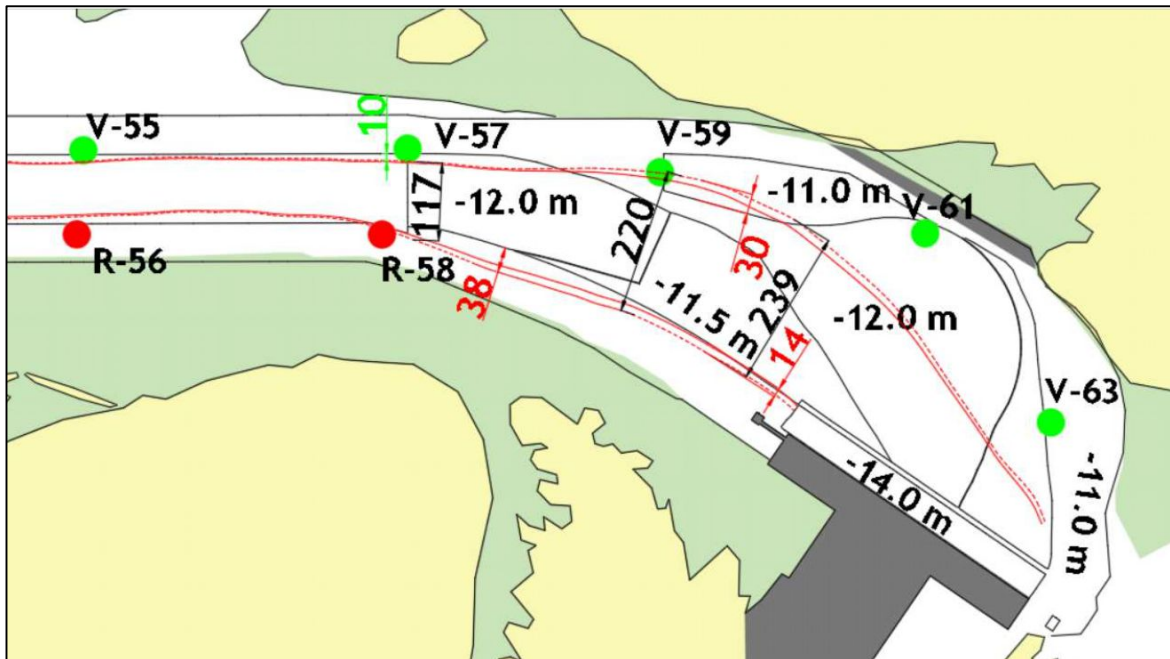


Figura 10: Resultados de los requerimientos de anchos del canal de navegación para portacontenedores Maxi New-Panamax

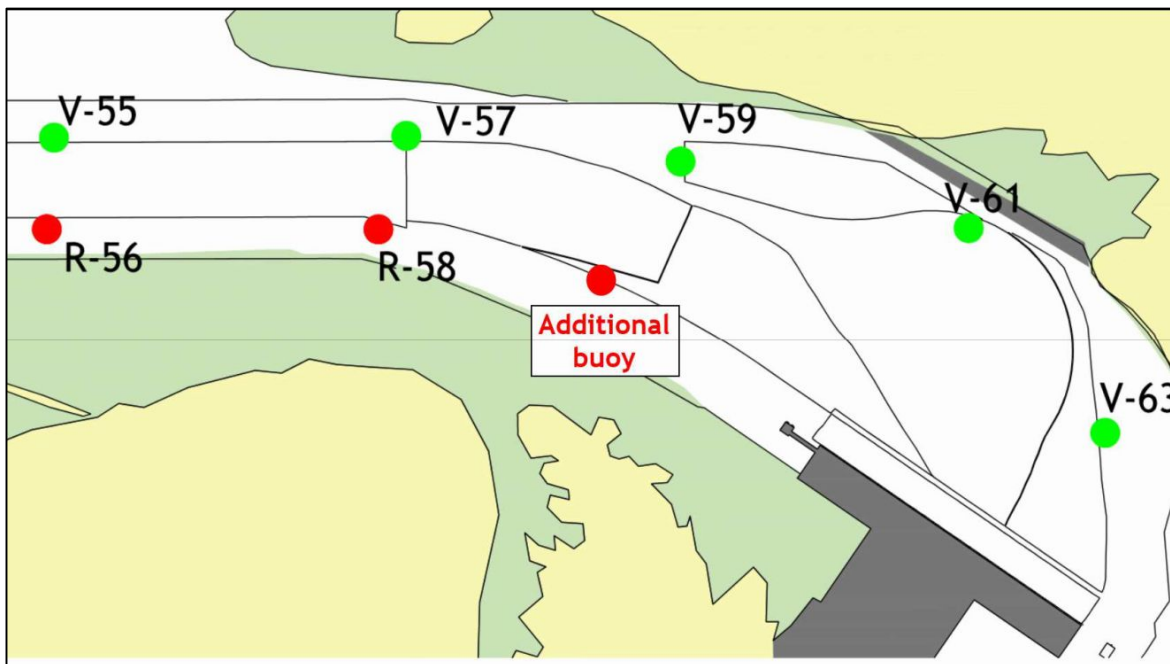


Figura 11: Señalización adicional propuesta para reducir requerimientos de dragado

## 5 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la importancia de evaluar conjuntamente el diseño de canales y las ayudas a la navegación. Esta evaluación combinada permite optimizar el espacio requerido, reduciendo costes de dragado y permitiendo el acceso de buques mayores en

zonas existentes, sin para ello mermar la seguridad de las operaciones marítimas.

El uso de Modelos de Maniobra en tiempo acelerado o mediante simuladores en Tiempo Real permite confirmar y verificar las optimizaciones y las mejoras en las condiciones de navegación. Estas herramientas son imprescindibles en estos estudios, ya que permiten verificar la efectividad de las ayudas



propuestas antes de implementarlas en la realidad.

El Simulador en tiempo Real siempre tiene como ventaja y beneficio adicional frente a los modelos de autopiloto en tiempo acelerado el factor humano, donde la percepción y la toma de decisiones, están directamente incluidos en la evaluación

Los Simuladores de Maniobra en Tiempo Real y las sesiones de simulación son el lugar idóneo para que las distintas partes implicadas en los diseños y desarrollos, de zonas portuarias o de canales de navegación (Autoridades Portuarias, Prácticos, Patrones de Remolcadores, Capitanes de Puerto, Diseñadores, Operadores ...) interactúen, discutan y evalúen, llegando a puntos en común para la mejor solución de mejora de las condiciones de navegación, y siempre sin perjuicio de la seguridad de las operaciones marítimas.

## 6 REFERENCIAS

IALA GUIDELINE 1078 THE USE OF ATON IN THE DESIGN OF FAIRWAYS (2021)

Ohtsu, Kohei & Yoshimura, Yasuo & Hirano, Masayoshi & Takahashi, Hironao & Tsugane, Masanori. (2008). Design standard for fairway in next generation. 20. 6. 10.14856/kanrin.20.0\_6.

PIANC Report 30 (1997). Approach Channels. A Guide for Design.

PIANC Report 121 (2014). Harbour Approach Channels Design Guidelines.

Puertos del Estado (España, 2000). ROM 3.1-99 Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación.