

Paper CA1108 - MODELO DE CÁLCULO DE RIESGO DE VARADA EN NAVEGACIÓN INTERIOR MEDIANTE SIMULACIONES DE NAVEGACIÓN Y PREDICCIÓN DE SQUAT

Carmona, Juan Carlos; Atienza, Raúl; Redondo, Raúl
SIPORT21

Email: jcarlos.carmona@siport21.com

ABSTRACT: En los puertos interiores, cuyo acceso debe realizarse mediante la navegación a lo largo de un estuario, río o canal artificial, la operatividad puede estar muy condicionada por la marea, en caso de que ésta tenga una carrera suficientemente amplia, o el nivel de agua fluvial. La variación del nivel de agua implica restricciones al calado de los buques que accedan o salgan de este tipo de puertos. Para evitar estas restricciones existe la posibilidad de dragar la vía navegable a una cierta cota que permita asegurar la operatividad de buques hasta un cierto calado objetivo. Pero este tipo de solución en muchos casos no es la adecuada, bien porque las actuaciones de dragado necesarias resulten excesivamente caras, bien porque estén limitadas por motivos medioambientales o de otra índole. Por ello, la práctica habitual de este tipo de puertos es recurrir a una solución intermedia, ejecutando por un lado un dragado de mantenimiento que asegure cotas de profundidad mínimas y, por otro, programando las operaciones de entrada y salida de forma sincronizada con la marea a fin de aprovechar al máximo el nivel de agua disponible. En último caso, habrá de limitarse el calado de acceso con la consiguiente merma de capacidad.

Siport21 lleva trabajando durante varios años con puertos de estas características, habiendo desarrollado herramientas de análisis de sincronización, que permiten identificar las “ventanas operativas” y maximizar el calado de los buques en operaciones de entrada y salida, aprovechando la carrera de marea mediante una programación adecuada, de tal forma que se disponga siempre de resguardos bajo quilla con suficiente margen de seguridad. El trabajo presentado va un paso más allá, e introduce en la metodología dos elementos que pueden contribuir a optimizar las operaciones e incrementar la seguridad de estas: estimación precisa del *squat* sufrido por los buques, calibrada mediante simulaciones con modelo numérico hidrodinámico y cálculo de probabilidad y riesgo de varada.

La estimación de *squat* se obtiene a lo largo de toda la vía de navegación, teniendo en cuenta la profundidad y sección cambiante de la misma, así como las formas y calado del buque en cuestión. Esto permite optimizar el calado de acceso y la velocidad de tránsito en cada tramo. El cálculo de riesgos permite evaluar las acciones de optimización de tal forma que se mantenga un nivel de seguridad adecuado.

Esta metodología se aplica a un caso práctico de un puerto que está llevando a cabo acciones de mejora y optimización de sus operaciones. Para ello se han utilizado datos AIS de maniobras de acceso al puerto y datos de marea y corriente a lo largo de toda la vía navegable, obtenidos de sensores de medición y de un modelo numérico de predicción calibrado.

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del trabajo es exponer la metodología utilizada para determinar el riesgo de contacto con el fondo en las operaciones de acceso y salida al puerto interior objeto del estudio. Para ello se ha confeccionado un modelo de cálculo de probabilidad de contacto con el fondo durante un tránsito individual. La probabilidad de contacto máxima admisible para cada tipo de operación puede establecerse a partir del riesgo global admisible en este modo de fallo para toda la vida útil del puerto.

El modelo obtiene de forma automática las probabilidades de contacto de operaciones individuales, de la forma que pueden compararse con los valores límite establecidos previamente. En los cálculos intervienen varios factores fundamentales a tener en cuenta:

- Tipo de buque.
- Velocidad de navegación.
- Propagación de la onda de marea.
- Sincronización con la onda de marea.
- Batimetría del río.
- *Squat*.
- Clima.

El modelo de riesgos calcula, automáticamente, el riesgo de exceder los límites de varada (en planta). Como resultado de acceder a la aplicación o módulo con unos determinados datos de entrada (buque, velocidad, condiciones externas), y teniendo en cuenta la disposición en planta y la batimetría real del área de navegación, el modelo devolverá la probabilidad de varada individual.

Mediante el cálculo de los riesgos individuales para los distintos tráficos, y en función del número de buques de cada tipo, se puede determinar la probabilidad de varada global.

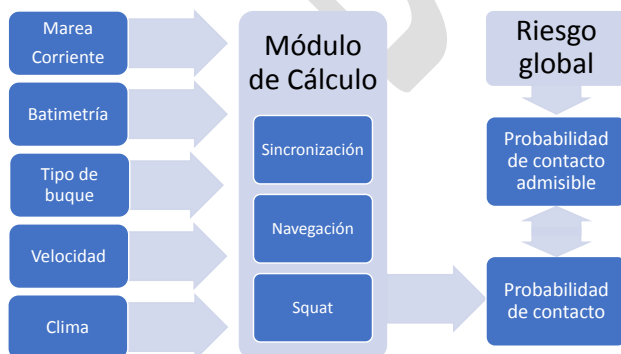


Figura 1: Diagrama del módulo de riesgos de contacto con el fondo.

El modelo de riesgo sirve como herramienta de optimización del calado máximo permitido en las maniobras de acceso y salida del puerto.

2 VARIABLES DE ENTRADA

Para determinar el riesgo de contacto con el fondo es necesario disponer de los inputs requeridos para el modelo:

2.1 Marea y corriente.

El puerto dispone de un modelo matemático muy preciso para obtener predicciones de niveles de agua y corriente en toda la vía navegable.

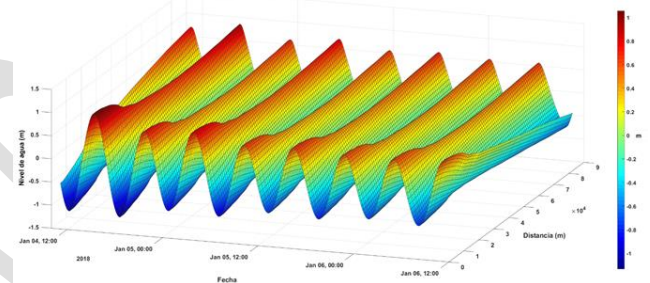


Figura 2: Onda de marea espacio-temporal.

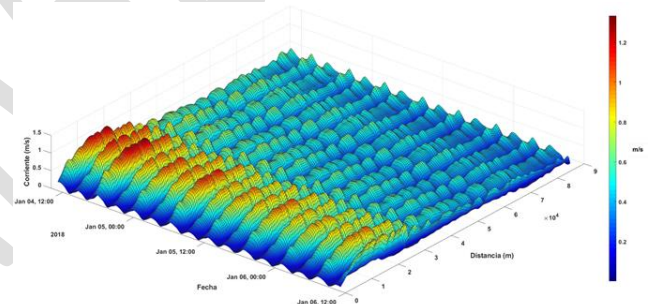


Figura 3: Onda de corriente espacio-temporal.

Durante la simulación de la navegación de los buques, las ondas de marea y corriente permiten conocer con precisión en el instante y lugar en el que se encuentra el buque, tanto el nivel de agua total disponible, como la corriente a la que está sometida el buque (intensidad y dirección). En este trabajo se estudian cinco niveles de marea, correspondientes a probabilidades de excedencia del 20%, 40%, 60%, 80% y 100%.

2.2 Batimetría.

Para poder obtener el nivel de agua total es necesario conocer la profundidad de la vía navegable. El puerto ha aportado para el estudio datos batimétricos obtenidos durante campañas de medida realizadas de forma programada para el

mantenimiento de la vía navegable. A partir de estos datos batimétricos se obtienen los perfiles de la sección del río a lo largo de los diferentes puntos kilométricos.

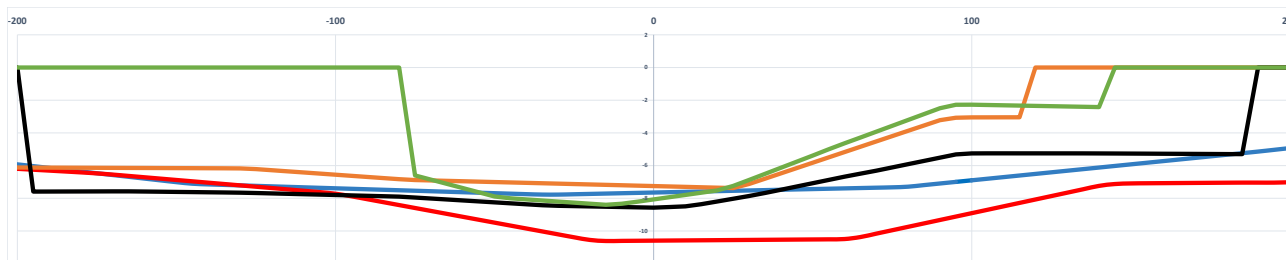


Figura 4: Ejemplo de perfiles en diferentes puntos kilométricos de la vía.

2.3 Tipo de buque.

La tipología del buque es un factor muy importante, dado que, en función de esta, el buque tendrá unas formas más o menos llenas, lo cual afecta al *squat* sufrido por los buques. En el trabajo se clasifican los buques en tres tipos, atendiendo al coeficiente de bloque: crucero, portacontenedor y granelero. Tanto las tipologías, como las dimensiones principales de los buques estudiados se han obtenido de datos de tráfico AIS aportados por el puerto, de manera que se obtuviesen las tipologías y dimensiones habituales en el puerto.

Tipo	Portacontenedor	Granelero	Crucero
Ltot (m)	145.0	169.4	198.2
Lpp (m)	134.0	160.0	179.5
B (m)	22.0	27.2	26.0
GM (m)	1.0	3.0	2.0
C _B	0.7	0.8	0.6
Calado (m)	7.1 -7.5, cada 0.1	7.0 -7.2, cada 0.1	6.4

Figura 5: Tipología de buques estudiados y dimensiones principales.

2.4 Velocidad de navegación.

La velocidad de navegación es crucial en la simulación de la navegación, ya que determina en que punto de la vía navegable se encuentra el buque en todo momento. Con la posición e instante temporal se obtienen tanto el nivel de agua como la corriente que actúa sobre el buque. La velocidad y la intensidad y dirección de la corriente son parámetros fundamentales para la obtención del *squat* sufrido por el buque. En función del nivel de agua la navegación se realiza con un perfil de velocidad diferente. Estos perfiles de velocidad se obtienen de los datos de tráfico AIS aportados.

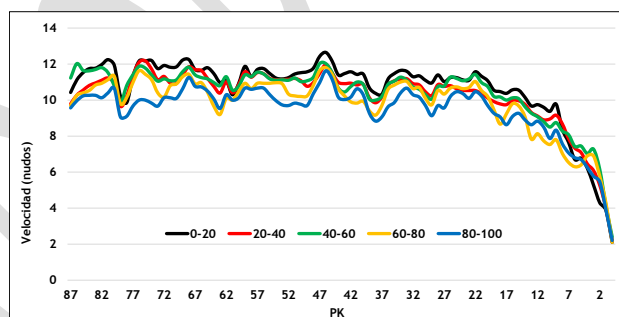


Figura 6: Perfiles de velocidad de navegación.

2.5 Clima (viento y oleaje)

Las condiciones climáticas presentes durante las operaciones es un factor muy importante a tener en cuenta para la obtención del riesgo de contacto con el fondo. En concreto, el viento es el agente climático más importante en este caso de estudio, ya que el oleaje proveniente del exterior se atenúa rápidamente, por lo que sólo es necesario tenerlo en consideración en los puntos kilométricos de la desembocadura del río (10% del trayecto aproximadamente). Las condiciones climáticas utilizadas se han determinado a partir de datos climáticos aportados por el puerto.

Escenario	Zona	Oleaje		Viento	
		Hs	Tp	V (m/s)	Dirección (°)
1	Exterior	1.5	6	7.5	247.5
	Interior	-	-	5.0	225.0
2	Exterior	1.5	6	12.5	247.5
	Interior	-	-	7.5	225.0

Figura 7: Condiciones climáticas utilizadas.

3 ESTIMACIÓN DE SQUAT

Para obtener una estimación de *squat* suficientemente precisa, se realizan cálculos mediante formulaciones empíricas y se comparan estos cálculos con resultados de simulaciones realizadas con un modelo numérico de paneles. Esta comparación de resultados aporta fiabilidad y

calidad a las estimaciones empíricas. Los resultados del modelo numérico se toman como referencia para corregir los resultados de las formulaciones empíricas porque es un método de cálculo más fiable y menos conservador. Todos los cálculos se realizan para los tres tipos de buque indicados anteriormente.

3.1 Cálculos empíricos.

Para el cálculo del *squat* mediante formulaciones empíricas, se han seguido los métodos empíricos descritos en el informe PIANC nº121-2014 "Harbour Approach Channels. Design Guidelines". En este documento se recomiendan formulas empíricas para la predicción del *squat*, adecuadas para diversas tipologías de buques y de canales.

Las diferentes formulaciones para la estimación del *squat* máximo presentes en el PIANC que se van a analizar son: Tuck (1966), Huuska/Guliev (1976),

Barrass3 (2004), Römisch (1989) y Yoshimura (1986).

3.2 Cálculos numéricos.

El software permite la obtención de las fuerzas y momentos que genera uno o varios buques en navegación a través de un canal restringido. De este modo, a partir de las fuerzas y momentos de interacción hidrodinámica entre buques en navegación y el medio (batimetría, taludes, confinamientos, ...) es posible valorar las fuerzas de succión y repulsión de los buques navegando y por tanto el *squat* y trimado de buques condicionados al medio en el que navegan. El modelo tiene en cuenta las formas específicas de cada buque, en una determinada condición de carga, y permite el cálculo de las fuerzas y momentos de interacción hidrodinámica.

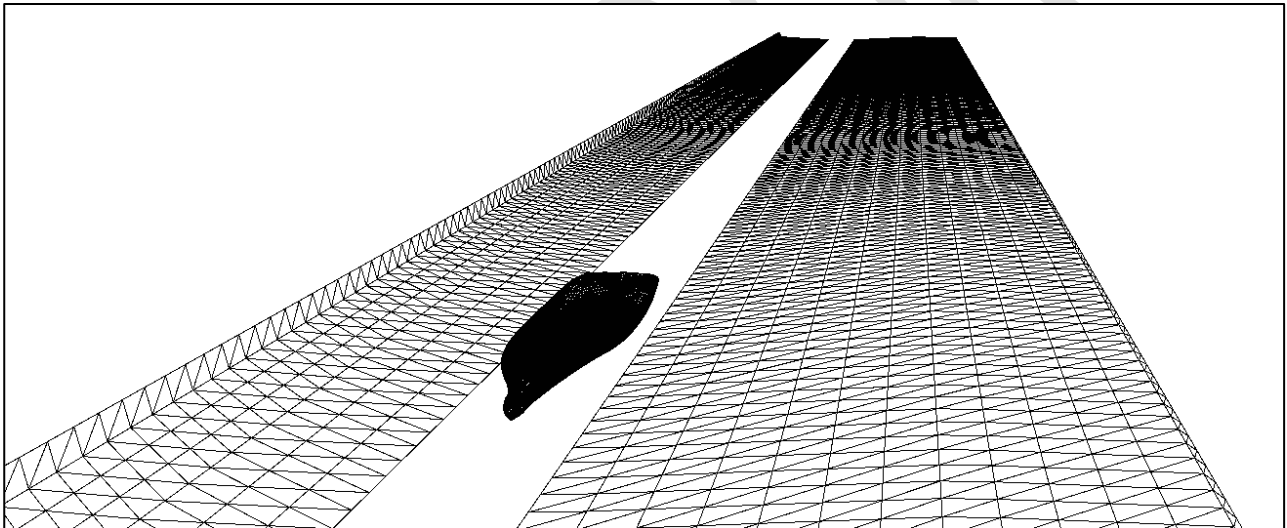


Figura 8: Panelizado en modelización numérica

3.3 Resultados.

Se escogen cinco secciones de la vía navegable para realizar la comparación entre cálculos empíricos y numéricos. Las secciones se escogen de manera que se cubran las tres tipologías genéricas de canal de navegación (U, R y C) y se analicen secciones tanto simétricas como asimétricas.

Las figuras siguientes muestran la comparación de resultados obtenidos con formulación empírica y modelo numérico para las cinco secciones de estudio. En el eje de ordenadas se encuentran la velocidad de navegación respecto al agua en nudos, la velocidad crítica en nudos, la relación h/T , y C_b .

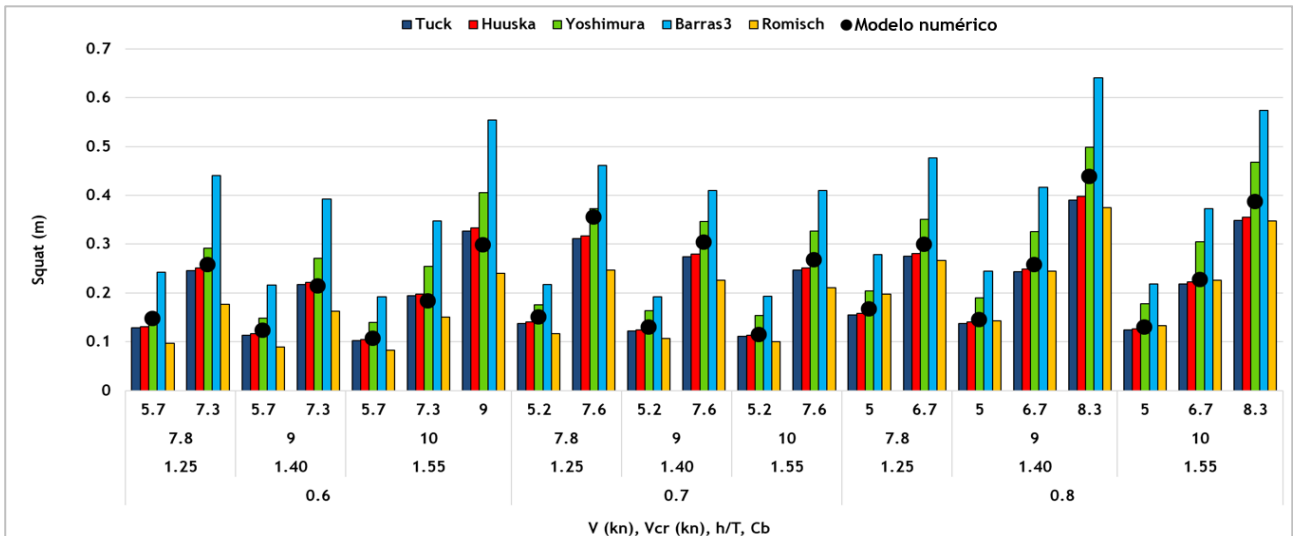


Figura 9: Resultados en punto kilométrico 5.

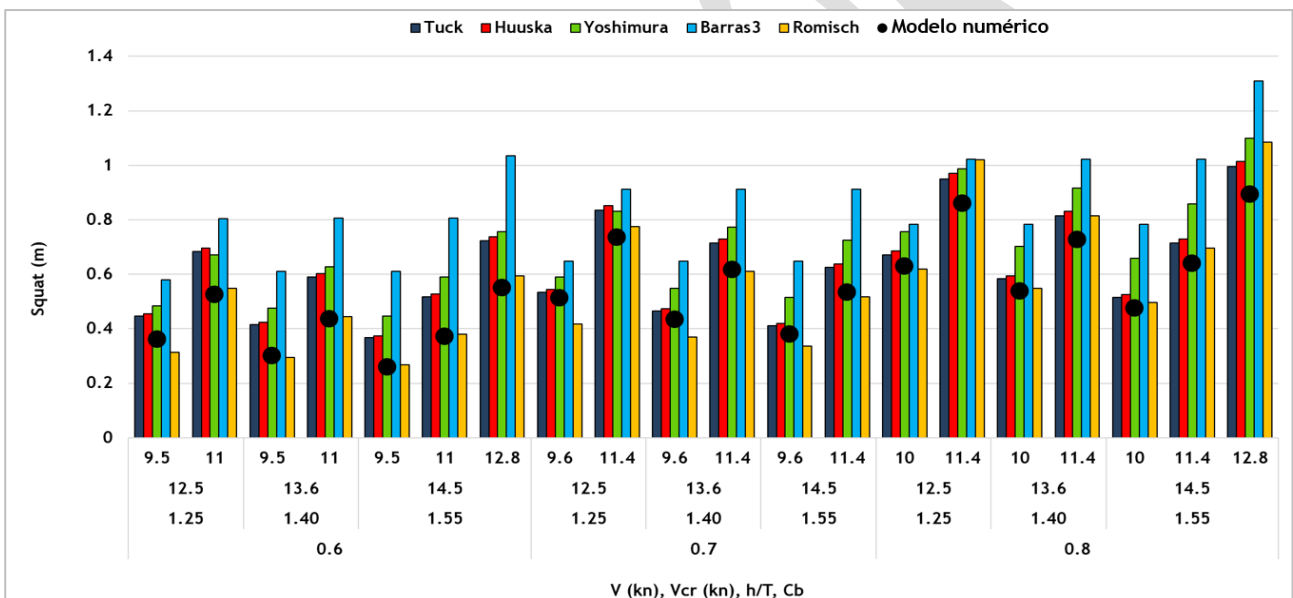


Figura 10: Resultados en punto kilométrico 25.

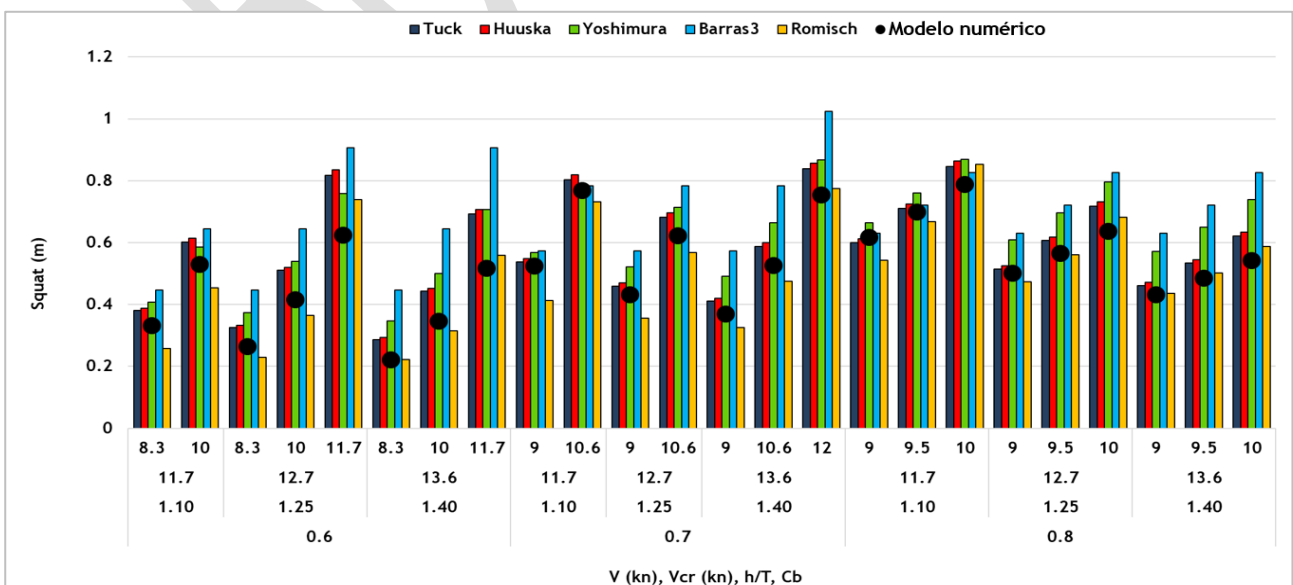


Figura 11: Resultados en punto kilométrico 38.

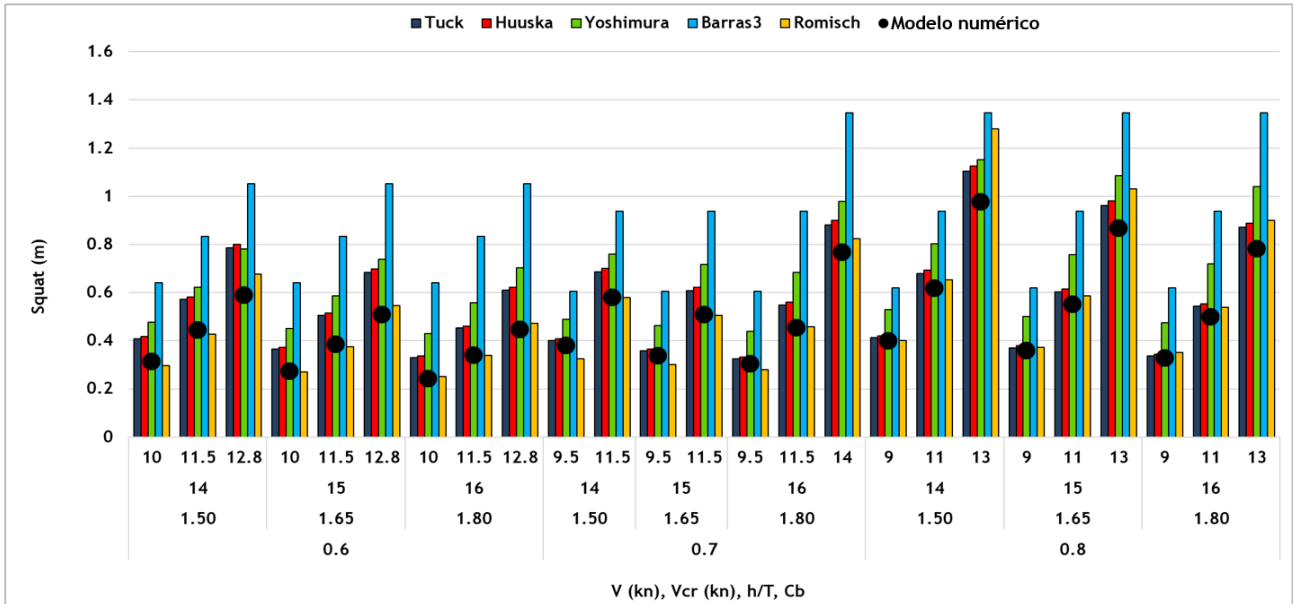


Figura 12: Resultados en punto kilométrico 57.

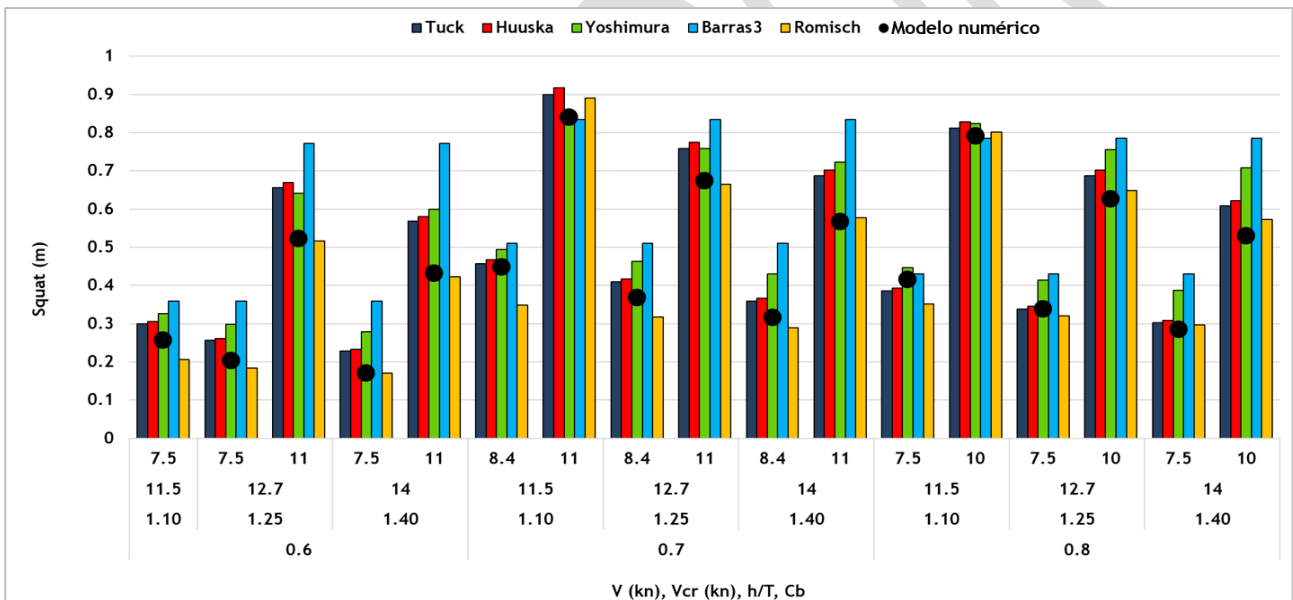


Figura 13: Resultados en punto kilométrico 65.

Los gráficos anteriores ponen de manifiesto la posibilidad de utilizar alguna de las formulaciones anteriores de forma generalizada para obtener una estimación del *squat* a lo largo del río para las tipologías de buque estudiadas, considerando las particularidades de las secciones de la vía navegable. Se comprueba que el parámetro que más influencia tiene en las diferencias entre resultados numéricos y empíricos es el coeficiente de bloque, o tipo de buque, siendo el buque crucero el que presenta mayores diferencias entre los resultados obtenidos con el software de cálculo numérico y los métodos empíricos.

Las formulaciones que mayor estabilidad presentan en cuanto a la desviación respecto a los cálculos numéricos son Tuck y Huuska/Guliev. Se propone

utilizar la formulación de Huuska/Guliev, dado que es algo más simple que la de Tuck. Los resultados anteriores permiten obtener coeficientes correctores a utilizar para la formulación de Huuska en función de la sección y el tipo de buque que se trate.

4 CÁLCULO DE RIESGOS

4.1 Riesgo y probabilidad admisibles.

El nivel de riesgo admisible se expresa mediante la probabilidad de que se produzca un fallo durante la vida útil de la instalación. La tabla siguiente muestra los niveles de riesgo admisibles en función de las consecuencias del fallo producido:

RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS		
Repercusión económica	Posibilidad de pérdidas humanas	
	REDUCIDA	ESPERABLE
BAJA	0.50	0.30
MEDIA	0.30	0.20
ALTA	0.25	0.15
RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL		
Repercusión económica	Posibilidad de pérdidas humanas	
	REDUCIDA	ESPERABLE
BAJA	0.20	0.15
MEDIA	0.15	0.10
ALTA	0.10	0.05

Figura 14: Niveles de riesgo admisibles en función de las consecuencias producidas (ROM 3.1-99).

Teniendo en cuenta el tipo de operaciones que se llevan a cabo en el caso estudiado, se fija el nivel de riesgo admisible en 0.5. Para obtener la probabilidad admisible de contacto con el fondo en un tránsito, es necesario establecer el período de retorno, o vida útil que se debe considerar en la aplicación del nivel de riesgo admisible. La tabla siguiente muestra los períodos de retorno recomendados en función del tipo de canal que se trate, el tipo de fondo y el nivel de riesgo de pérdidas humanas:

Tipo de canal	Tipo de fondo		
	Duro	Medio	Blando
Canal de navegación general	E1: 50	E1: 35	E1: 25
	E2: 250	E2: 150	E2: 100
	E3: 800	E3: 520	E3: 400
Canal de navegación de uso específico	E1: 35	E1: 25	E1: 15
	E2: 150	E2: 100	E2: 50
	E3: 500	E3: 350	E3: 250
E1= Riesgo bajo de pérdidas humanas y daños medioambientales			
E2= Riesgo medio de pérdidas humanas y daños medioambientales			
E3= Riesgo alto de pérdidas humanas y daños medioambientales			

Figura 15: Períodos de retorno recomendados en la evaluación de riesgos (PIANC 121 2014).

En el caso del puerto objeto de estudio, el canal de navegación es de tipo general, con un fondo blando y riesgo bajo de pérdidas humanas y daños medioambientales. Por tanto, el período de retorno recomendado es de 25 años. Tal y como se ha indicado anteriormente, el nivel de riesgo está asociado la probabilidad de que se produzca un accidente o fallo durante la vida útil, en este caso 25 años. La relación entre esta probabilidad global y la probabilidad de que se produzca un contacto con el fondo durante una operación individual se obtiene mediante la distribución de Poisson a largo plazo:

$$P_{UKC} = 1 - \exp(-P_p \cdot N_Y \cdot Y_L)$$

Donde:

P_{UKC} : Probabilidad de un fallo en el período de retorno considerado.

Y_L : Período de retorno.

N_Y : Número de operaciones al año.

P_p : Probabilidad de contacto durante una operación.

Despejando P_p de la ecuación anterior se obtiene:

$$P_p = \frac{-\log(1 - P_{UKC})}{N_Y \cdot Y_L}$$

Expresión mediante la que se puede obtener la probabilidad máxima admisible para una operación.

A partir de los datos AIS se elabora una estadística de tráfico a partir de la cual se obtiene el número de operaciones anuales por tipo de operación. Distribuyendo los datos de tráfico de los buques de carga por calados en agua dulce iguales o superiores a 6.5 m (entradas) y 6.2 m (salidas), y esloras iguales o superiores a 130 m, se obtienen las tablas siguientes.

Calado	Barcos/año
6.5	2
6.6	2
6.7	3
6.8	3
6.9	2
7.0	3
7.1	4
Total	19

Figura 16: Número de operaciones de entrada al año en función del calado.

Calado	$C_B \approx 0.8$	$C_B \approx 0.7$	Total
6.2	1	16	17
6.3	1	13	14
6.4	2	9	11
Total	4	38	42

Figura 17: Número de operaciones de salida al año en función del calado y tipo de buque.

Calado	$C_B \approx 0.6$	Total
6.2	1	1
6.4	2	2
Total	3	3

Figura 18: Número de operaciones de salida al año de cruceros en función del calado.

En base a los datos de la estadística de tráfico se distribuye el riesgo total admisible (0.5) entre los diferentes tipos de operación existentes.

Tipo de operación	C_b	Nivel de riesgo admisible	Tránsitos en vida útil	Probabilidad de fallo admisible en un tránsito
Entrada	0.7 ; 0.8	0.14	500	3.0.E-04
	0.6	0.03	100	3.0.E-04
Salida	0.7	0.27	950	3.3.E-04
	0.8	0.03	100	3.0.E-04
	0.6	0.03	100	3.0.E-04

Figura 19: Probabilidades admisibles de contacto con el fondo para un tránsito.

La tabla anterior permite establecer la probabilidad máxima admisible de contacto con el fondo para una operación en 3.0E-4.

4.2 Cálculo de probabilidad de contacto con el fondo.

Para obtener la probabilidad de contacto con el fondo en un tránsito concreto se utiliza el método probabilístico mediante simulaciones de Monte Carlo. En este método se define una función de fallo, la cual depende de una serie de variables que tienen cierta variabilidad aleatoria. Conocido el comportamiento de esa aleatoriedad de las variables, se realiza una serie de simulaciones para la función de fallo introduciendo valores aleatorios en las variables en base a sus funciones de distribución de probabilidad conocidas. La función de fallo utilizada se define de la forma siguiente:

$$\min[\overline{UKC(PK)}] = \min[\overline{H(PK)} + \overline{NA(PK)} - \overline{T(PK)} - \overline{Sq(PK)}]$$

Donde:

$\overline{UKC(PK)}$ = Resguardo bajo quilla en m, vector con valores para cada punto kilométrico.

$\overline{H(PK)}$ = Profundidad a nivel de agua cero en m, vector con valores para cada punto kilométrico.

$\overline{NA(PK)}$ = Nivel de agua debido a la marea, vector con valores para cada punto kilométrico.

$\overline{T(PK)}$ = Calado del buque en m, vector con valores para cada punto kilométrico.

$\overline{Sq(PK)}$ = *Squat* sufrido por el buque en m, vector con valores para cada punto kilométrico.

La función de fallo (UKC) depende de cuatro variables principales (H,NA,T y Sq), que son a su vez función de otras variables. Estas variables tendrán una distribución estadística que es necesario definir para realizar las simulaciones aleatorias del método de Monte Carlo. A continuación, se definen cada una de las cuatro variables principales.

Profundidad - $\overline{H(PK)}$:

Esta variable depende tan solo del punto kilométrico en el que navegue el buque. La variabilidad aleatoria se introduce como un error aleatorio con distribución uniforme entre 0.0 y -0.1 m, de manera

que este error siempre supone una reducción de la profundidad.

Nivel de agua - $\overline{NA(PK)}$:

El nivel de agua consiste en la predicción de onda de marea aportada por el modelo numérico de predicción de propagación. El error en el nivel de agua de este modelo es de 0.1 m. La variación aleatoria se introduce mediante una distribución normal con media igual al nivel de agua y desviación igual a un tercio del error (0.033 m).

Calado del buque - $\overline{T(PK)}$:

El calado del buque es función del punto kilométrico a través de la curva de variación de la densidad del agua en función del punto kilométrico. Esta curva está definida por el modelo de cálculo de mareas. Se introduce una variación aleatoria a esta curva mediante una distribución uniforme con un error máximo del 10% del valor de la densidad en cada uno de los puntos kilométricos.

Squat - $\overline{Sq(PK)}$:

Es la variable aleatoria con mayor complejidad. El *squat* se estima mediante el método descrito en el apartado anterior. Esta estimación utiliza las siguientes variables, las cuales tienen su variabilidad aleatoria correspondiente:

Calado (T).

Velocidad del buque (V).

Profundidad del punto kilométrico (H).

Corriente (C), en cada punto kilométrico.

La aleatoriedad del calado y la profundidad ya están definidas. La aleatoriedad de la velocidad se introduce mediante una distribución normal con un valor medio igual a la velocidad en cada punto kilométrico y una desviación igual a 3.3% de esa velocidad, de tal forma que tres desviaciones suponen un 10% de la velocidad media, la variabilidad característica detectada en los registros AIS. En cuanto a la corriente, el error máximo del modelo de predicción en la intensidad es de 0.2 m/s. Por tanto, se introduce un error aleatorio en la corriente mediante una distribución normal con media igual a la intensidad en el punto kilométrico y desviación igual a un tercio del error (0.066 m/s).

Una vez establecidas las funciones de distribución de todas las variables aleatorias que intervienen en

el proceso, el método de Monte Carlo consiste en generar un gran número de valores aleatorios de estas variables basados en las funciones de distribución. Los valores resultantes de la función de fallo se comparan con el valor límite de fallo, en este caso el contacto con el fondo (UKC=0). A partir del número de fallos se obtiene la probabilidad de contactar con el fondo en una operación.

5 RESULTADOS

Los resultados de probabilidad se muestran en forma de tablas en las cuales se indican los valores resultantes de probabilidad de contacto para una

operación en cada uno de los casos estudiados. Además, se indica mediante color verde si la probabilidad es igual o inferior a la admisible y mediante color rojo si la probabilidad es superior. A modo de ejemplo, se adjunta la tabla de resultados para las maniobras de entrada en el escenario climático 2, seguida de gráficas que muestran el perfil de nivel de agua total (profundidad + nivel de agua), *squat* y UKC medios obtenidos en cada punto kilométrico en las simulaciones de Monte Carlo para los casos correspondientes a PM0.

Buque	Calado (m)	Excedencia (%)	PM-2	PM-1.5	PM-1	PM-0.5	PM0	PM+0.5
Portacontenedor	7.1	100	1.E+00	6.E-01	2.E-02	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.2	80	1.E+00	4.E-02	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.3	60	1.E+00	1.E+00	7.E-02	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.4	40	1.E+00	1.E-01	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.5	20	1.E+00	1.E+00	9.E-03	<2E-4	<2E-4	<2E-4
Granelero	7.0	100	2.E-02	2.E-03	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.1	80	5.E-03	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.2	60	1.E+00	4.E-02	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.2	40	8.E-04	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
	7.2	20	4.E-01	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
Crucero	6.4	100	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
		80	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
		60	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
		40	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4
		20	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4	<2E-4

Figura 20: Resultados de probabilidad en operaciones de entrada.

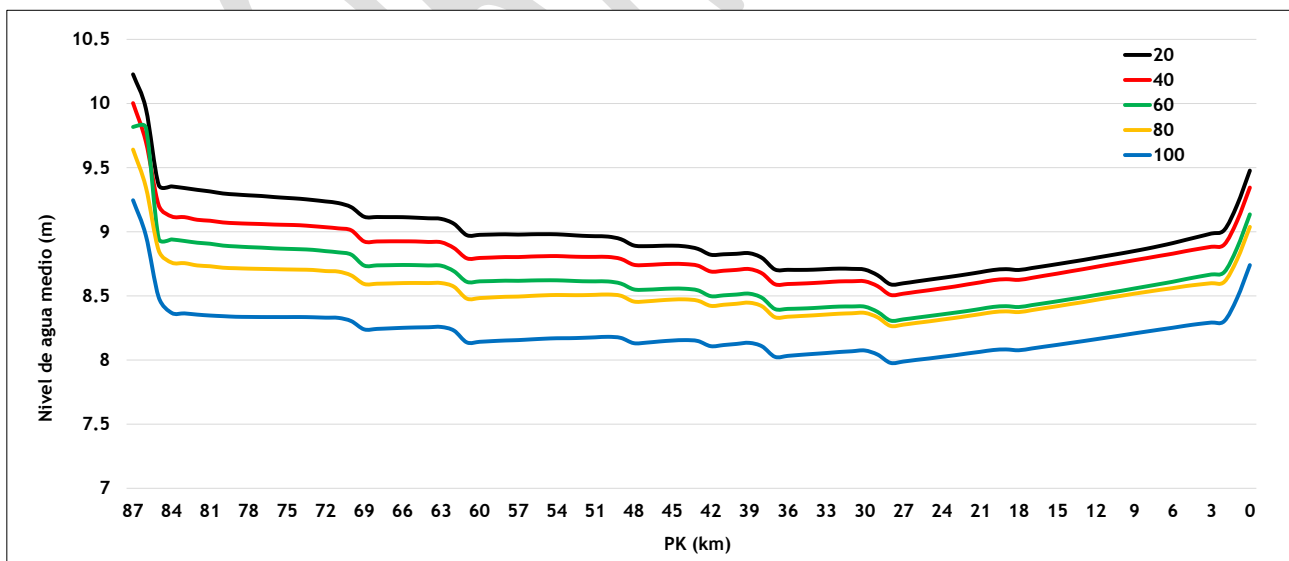


Figura 21: Nivel de agua medio en simulaciones de Monte Carlo.

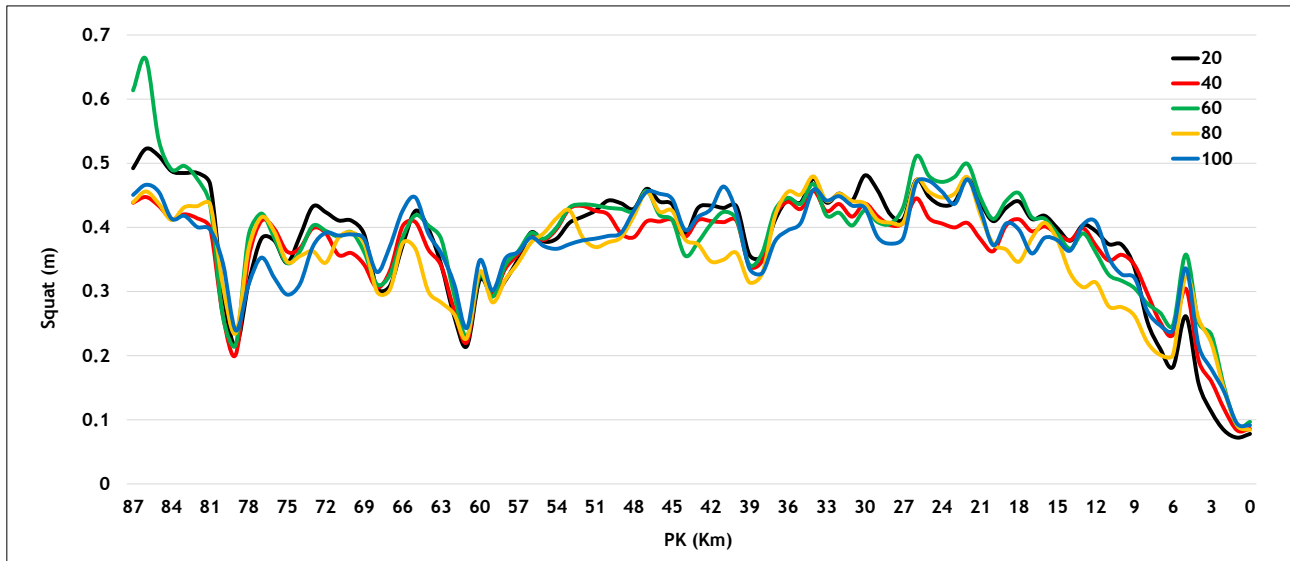


Figura 22: Portacontenedor. *Squat* medio en simulaciones de Monte Carlo.

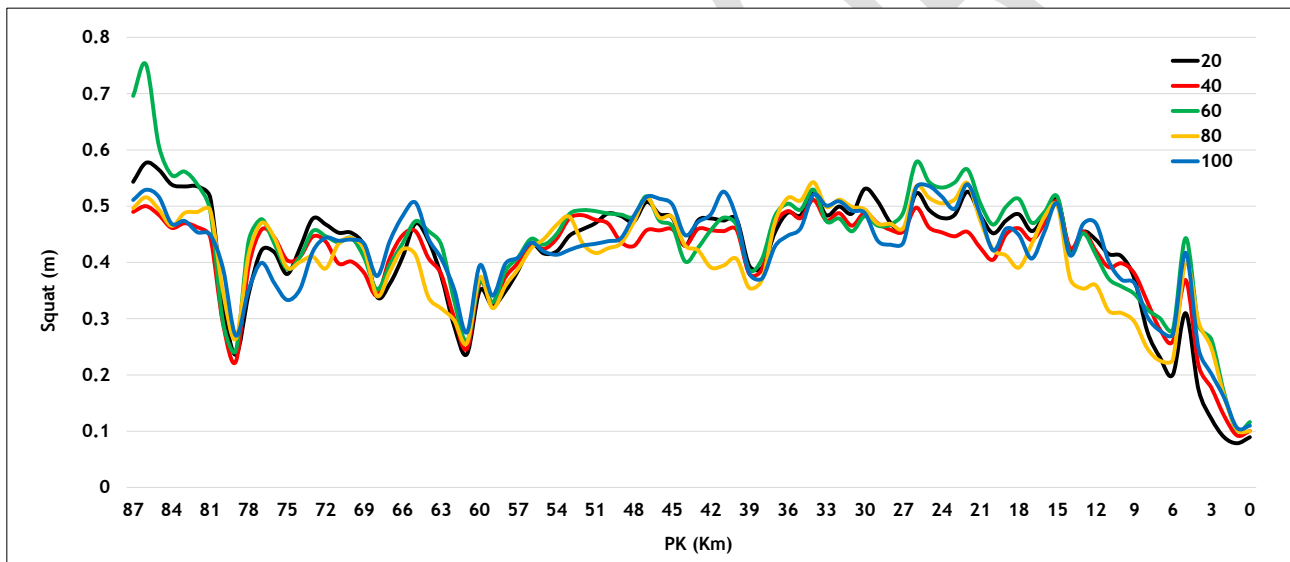


Figura 23: Granelero. *Squat* medio en simulaciones de Monte Carlo.

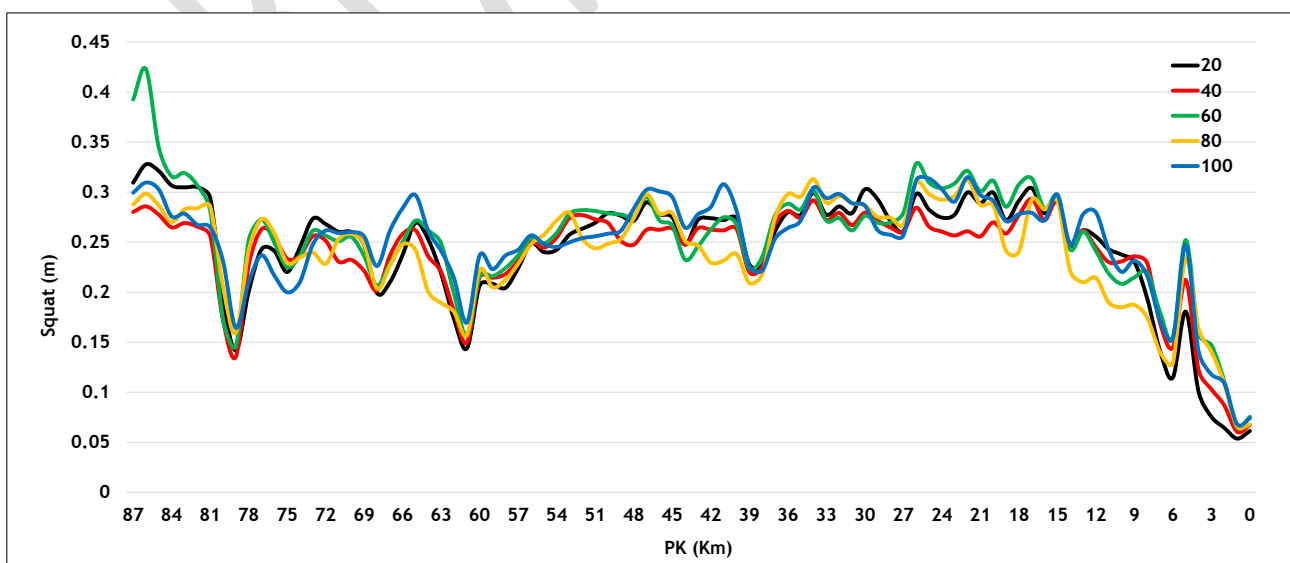


Figura 24: Crucero. *Squat* medio en simulaciones de Monte Carlo.

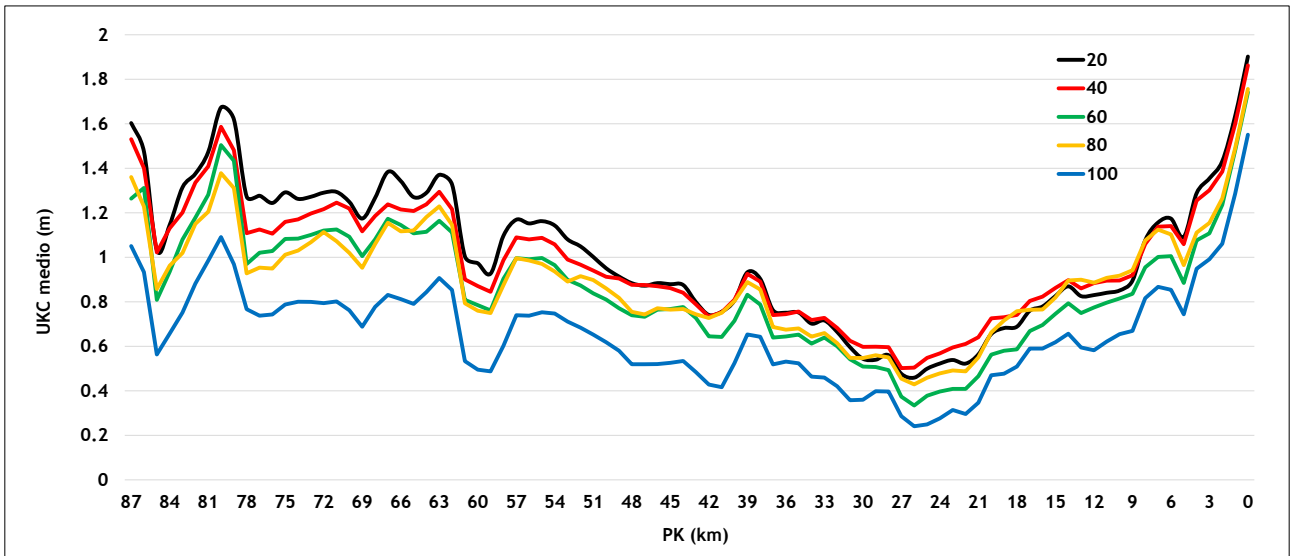


Figura 25: Portacontenedores. UKC medio en simulaciones de Monte Carlo.

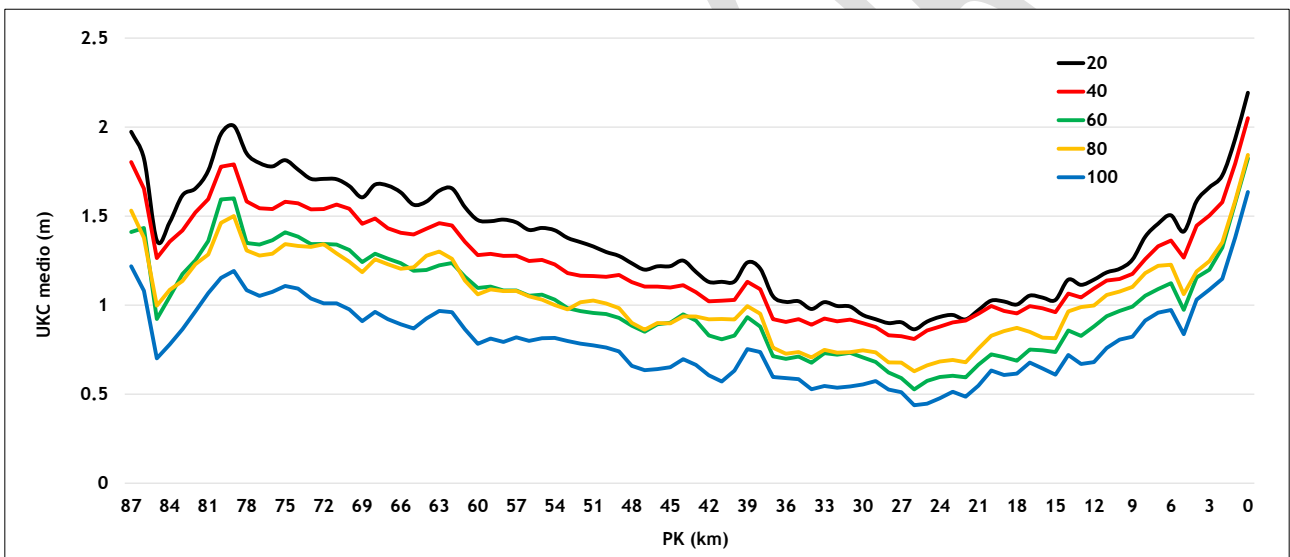


Figura 26: Granelero. UKC medio en simulaciones de Monte Carlo.

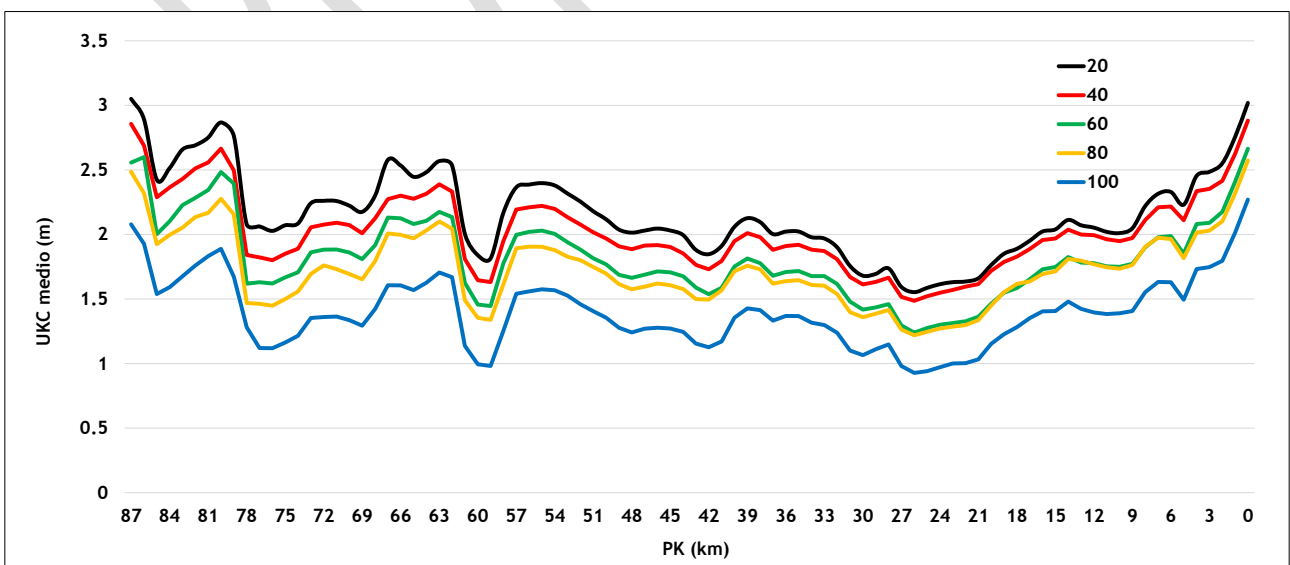


Figura 27: Crucero. UKC medio en simulaciones de Monte Carlo.

6 CONCLUSIONES

Mediante la metodología desarrollada se obtienen, entre otros, los siguientes datos acerca de las operaciones:

- Probabilidades máximas admisibles de contacto con el fondo para cada tipo de operación.
- Probabilidad de contacto con el fondo para la operación de entrada o salida de un buque concreto.
- Ventanas de operatividad.
- Niveles de agua a lo largo de la vía navegable.
- *Squat* sufrido por los buques a lo largo de la vía navegable.
- UKC disponible a lo largo de la vía navegable.
- Puntos kilométricos en los que se produce contacto.

Toda esta información permite establecer de forma precisa los calados máximos de acceso y salida en función del nivel de marea presente.

Para ello es necesario en primer lugar disponer de una herramienta de predicción de la propagación de la onda de marea a lo largo de la vía navegable. El puerto objeto de estudio dispone de este tipo de herramienta, validada mediante medidas de niveles de agua y corriente.

En segundo lugar, es necesario disponer de una estimación del *squat* sufrido por los buques con una precisión adecuada. Este trabajo ha permitido obtener una estimación de *squat* menos conservadora que las estimaciones aportadas por las formulaciones empíricas gracias a la utilización de modelos numéricos de paneles. No obstante, esta estimación se validará mediante medidas de campo a bordo de buques durante las operaciones.

En canales de acceso con fondos blandos y cambiantes, como el caso del puerto objeto de estudio, un conocimiento preciso y actualizado de la batimetría del canal de navegación permite optimizar los calados máximos de acceso y salida, pudiendo disponer de estos calados de forma actualizada en caso de contar con nuevos datos batimétricos de forma periódica.

Por último, la metodología también aporta información sobre las zonas problemáticas, lo que supone una ayuda importante en las labores de mantenimiento de la vía navegable.

REFERENCIAS

“Approach Channels. A Guide for Design” (1997), PIANC (Asociación Internacional de Navegación).

“Harbour Approach Channels Design Guidelines” (2014), PIANC (Asociación Internacional de Navegación).

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