

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NÁUTICAS APLICADAS AL DISEÑO DE ÁREAS DE NAVEGACIÓN EN CUBA

Barrera Luque, Z.¹, Lazo Porta, L.²,

^{1, 2}Empresa GEOCUBA Estudios Marinos,

¹e-mail: zuzel@emarinos.geocuba.cu

²e-mail: livan@emarinos.geocuba.cu

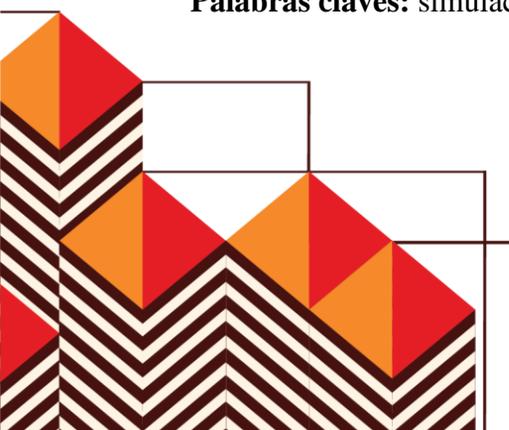
RESUMEN

El diseño de canales y vías navegables en Cuba se ha incrementado a partir de la modernización de los puertos y la explotación de instalaciones turísticas, desde el punto de vista náutico. En tal sentido, el proceso asociado al diseño y desarrollo de nuevos proyectos de dragado han posibilitado implementar las ciencias, orientada a la ingeniería portuaria desde una óptica de seguridad tecnológica.

En Cuba se han diseñado, disímiles obras hidrotécnicas basada en modernas metodologías, normas y recomendaciones, internacionales y nacional. Como resultado se han obtenido canales, más seguros, eficaces y operativos. Todo ello ha sido posible al fusionar al diseño determinístico, estudios probabilísticos y de simulaciones de maniobras náuticas. El disponer del Modelo Numérico de Maniobra de Buques con Autopiloto (SHIPMA; SHIP MAnoeuvering) y un Simulador Marítimo Avanzado, en tiempo real “Full Mission” Navi Trainer Professional 4000, ha permitido obtener resultados relevantes, que facilitan el desarrollo de proyectos técnicos-ejecutivos, sobre la base de criterios de seguridad.

En el presente trabajo se exponen alguno de los principales aportes derivados de implementación de las simulaciones náuticas, aplicadas al diseño de vías navegables en Cuba, que han contribuido al incremento de la seguridad de las maniobras de los buques de diseños, una mayor confiabilidad de los canales e incremento de operatividad de estos.

Palabras claves: simulaciones náuticas, canales, buques, dragado.



1- INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la base de conocimientos asociadas a la Ingeniería Portuaria y el desarrollo de proyectos con impacto al ámbito marítimo-portuario, se encuentran en constante evolución. Ello se debe a la modernización conceptual vinculada con la evolución y experiencias en este tipo de proyectos. Los conocimientos más avanzados, las experiencias más relevantes y las mejores prácticas, han sido extrapoladas desde grandes constructoras transnacionales, consultoras marítimas especializadas, centros de investigación y compañías dedicada a estas actividades, a nivel internacional. A diferencia de otras ramas de la ingeniería, la ingeniería portuaria exige una mayor experiencia y habilidad en la asimilación de nuevas técnicas y procedimientos para su desarrollo. A su vez incorpora, constantemente, modernas tecnologías y herramientas para lograr una efectividad a lo largo de todo el proceso de ejecución de los proyectos. Por otro lado, los accidentes marítimos en zonas próximas y en canales de acceso a puertos, son más recurrentes alcanzando grandes impactos desde el punto de vista ambiental, económico y en la operativa-portuaria.

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental exponer, de manera panorámica, resultados relevantes alcanzados en Cuba en el ámbito de las simulaciones náuticas, aplicadas al diseño de las áreas de navegación. Para ello se abordan aspectos “vitales”, como la implementación de modernas herramientas computacionales orientadas al diseño e investigación, las cuales constituyen un complemento de suma importancia e interés para los proyectos de ingeniería portuaria.

Para lograr la efectividad de los resultados asociados a los estudios e investigaciones que se presentan, se ha requerido el estudio y análisis de bibliografía e información técnica, actualizada, en el estado del arte. Destacan por su nivel técnico-investigativo y de aplicación el análisis y síntesis de argumentos vinculados a los informes técnicos editados por el PIANC (Asociación Internacional creada para promover, a nivel internacional, para el desarrollo en el diseño, construcción, mejora, conservación y explotación de las vías navegables interiores y marítimas, los puertos y las zonas costeras) relacionados con el diseño de vías navegables [1-3] y las

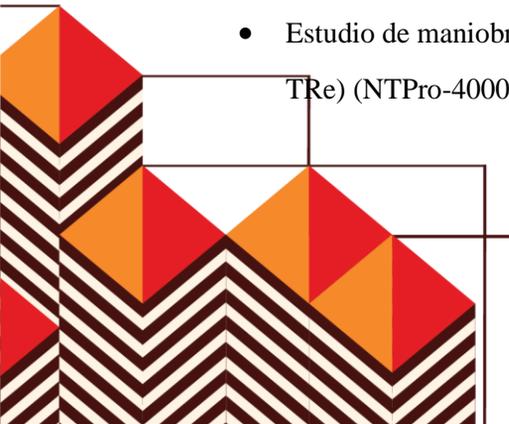
Recomendaciones españolas para Obras Marítimas ROM 3.1-99 [4]. Además, de consultar trascendentales artículos científicos [5-9] y haber participado en Webinars especializados, a nivel internacional, donde se han abordado aspectos afines a estos temas [10-13].

A pesar del elevado desarrollo tecnológico implementado en los buques, sistemáticamente, se suceden varadas, accidentes y siniestros marítimos asociado a hidrovías que han tenido un gran impacto a nivel internacional, como es el caso de la Varada del Portacontenedores “Ever Given” en el Canal de Suez [14]. Ello evidencia la relevancia que se le brinda a los estudios de maniobra y demás estudios náuticos, en vista de alcanzar niveles aceptables de maniobrabilidad de los buques, que satisfagan los criterios de diseño de los canales de navegación, para lo cual ha sido vital la inserción de técnicas avanzadas de simulación y modelación de modelos de buques, desde etapas de diseño conceptual de los proyectos.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

En Cuba, el desarrollo de nuevas inversiones en las zonas portuarias ha demandado de la ejecución de diversos estudios, los cuales que han exigido la evaluación de nuevos buques de proyectos de características dimensionales muy superiores a los buques tipos que originalmente fueron por los que se diseñaron las vías navegables, objetos de análisis. Es así, que el requerimiento de incrementar las dimensiones de los buques de proyecto ha conducido a diseñar nuevos canales de navegación que satisfagan las características de estos nuevos buques. Dentro de los varios proyectos de dragado ejecutados hay tres que sobresalen por su nivel de importancia y complejidad.

- Estudio de Seguridad y Náutica para el canal de acceso al Puerto de Cienfuegos para recibir grandes buques LNG. Estudios de simulación en tiempo real. (Cienfuegos, 2010) [15].
- Estudio de Simulación de Maniobras de Grandes Buques Post-Panamx de 300 y 335 m de eslora para la nueva Terminal de Contenedores de Mariel. (Mariel, 2017) [16].
- Estudio de maniobrabilidad mediante Simulación de Maniobra de Buque en Tiempo Real (ESMB-TRe) (NTPro-4000 v4.62). (Nipe, 2021) [17].

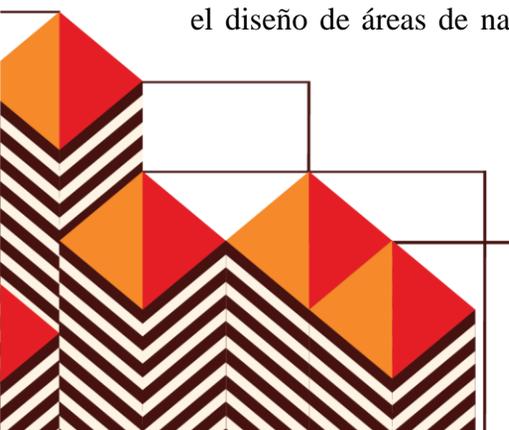


Durante la realización de estos, se aprecia como elemento común la presencia de buques de gran porte y condiciones naturales de la zona restringidas para la navegación y maniobra de los buques, debido a la existencia de bahías con accesos a puertos mediante canales estrechos, bordeados por suelos generalmente duro, que en su momento fueron dragados a partir del diseño de áreas de navegación para buques de menor porte, lo que significa una problemática, no menor.

Con el propósito de dar solución y viabilidad a la solicitud de realizar proyectos de dragados que garanticen el acceso y maniobra segura de los buques, se realizan estudios e investigaciones con un elevado rigor científico-técnico. Se desarrolla el diseño determinístico, aplicando la norma cubana para el desarrollo de Proyectos de Construcción Canales marítimos [18], así como las normas y recomendaciones internacionales enunciadas [1-4].

El diseño determinístico ha permitido determinar y desarrollar áreas de navegación con dimensiones considerables. Asociado a ello, ha sido necesario la ejecución de obras de dragado para volúmenes grandes de extracción, fundamentalmente en suelos duros (rocas). La aparición de este tipo de suelos encarece considerablemente la realización de la obra, a lo que se unen mayores impactos al medio marino. Para contrarrestar esta dificultad, disminuir los costes y el impacto medio ambiental asociado; se buscan alternativas viables y de “eficacia comprobada” con la participación de equipos multidisciplinarios conformado por inversionistas, proyectistas, clientes y entidades reguladoras.

En el presente trabajo se muestra la metodología utilizada en los proyectos de dragado, que ha favorecido a obtener excelentes resultados a partir de la optimización investigativa favorecida por la aplicación de las simulaciones náuticas. En tal sentido el presente trabajo se enfoca, en los resultados del empleo de estudios de simulaciones náuticas en el proceso de validación y optimización del diseño determinístico del canal de acceso a la Terminal de Contenedores Mariel. El trabajo demuestra la importancia que reviste el incluir los estudios de simulación náutica para el diseño de áreas de navegación. Las limitantes de estos estudios están en los altos costos de



ejecución a partir del nivel de complejidad tecnológica de las herramientas que se emplean, el nivel científico requerido por parte de los investigadores, especialistas y los tiempos de ejecución.

La definición de los objetivos está en correspondencia con el alcance del proyecto con el fin de solucionar la misma, para la cual se lleva a cabo una etapa de investigación exploratoria mediante la revisión de trabajos realizados, revistas y consultas a especialistas en el tema, para recopilar información sobre el uso de los estudios de simulación náutica.

2.1. Estudios de simulación náutica aplicados en Cuba

Nuestro país cuenta con un Simulador Marítimo Avanzado (SMA) tipo “Full Mission” emplazado en las instalaciones del Centro de Simuladores de la Academia Naval “Granma”. Este simulador marítimo, constituye una potente herramienta para el desarrollo de estudio de proyectos marítimos y portuarios. Su empleo ha permitido centrar el diseño, explotación de instalaciones portuarias, canales de acceso y áreas de flotación, proporcionando al proyectista una orientación, objetiva, sobre las posibilidades y restricciones del buque, su interacción con la infraestructura, las condiciones climáticas y otros factores útiles en los escenarios objeto de análisis.

Proyecto de obras marítimas y portuarias

Uno de los principales resultados de la implementación de los estudios de simulaciones náuticas en nuestro país, ha sido la evaluación integral y detallada de diferentes alternativas para la construcción o ampliación de obras marítimas y portuarias. Los principales trabajos e investigaciones realizadas han estado encaminado a la evaluación y viabilidad náutica de nuevos canales de acceso a muelle y obras de nueva construcción y la valoración del acceso efectivo de determinados buques de proyecto, de diferentes dimensiones, para definir un nivel de aceptabilidad de las maniobras, determinando el grado de seguridad resultante, los trazados optimizados, más económicos y seguro de la vía navegable proyectada.

Para desarrollar estos estudios un aspecto relevante y que ha favorecido a obtener resultados de impacto ha sido la determinación de las condiciones de navegación.



Los resultados alcanzados han estado determinados por la correcta definición de las condiciones de simulación desarrolladas para ello las etapas ejecutadas han sido:

- Disposición en Planta y Batimetría
- Datos de Clima Marítimo
 - Viento
 - Oleaje
 - Marea
 - Corriente
 - Escenarios Meteorológicos
- Buques de Estudio
- Remolcadores

Estos elementos han permitido acometer los estudios a partir de realizar una correcta selección de los escenarios de maniobra. La planificación de este proceso previo es extremadamente importante, cuando se emplea un simulador en tiempo real, como es el caso del SMA NTPro-4000 versión 4.62. en tal sentido se presenta a modo de ilustrar las investigaciones ejecutada, el caso estudio relativo a las simulaciones náuticas asociada a la Terminal de Contenedores de Mariel.

2.2. Principales resultados del Estudio de Simulación en la Terminal de Contenedores del Mariel

Las potencialidades asociadas con este trascendental estudio por su impacto económico y en el proceso constructivo está asociado a verificar y optimizar el diseño determinista existente del Canal



de Acceso y de los Espacios Navegables requeridos para buques Neo-Panamax de 366.5 m de eslora total, 51.2 m de manga y 15.0 m de calado.

El estudio fue concebido en dos etapas: la primera: Diseño Conceptual o Básico en planta y alzado mediante estimaciones aproximadas, buscando un método de ejecución rápido, sólido y completo; y la segunda ha consistido en un Diseño Detallado o Avanzado en planta y alzado destinado a validar, desarrollar y refinar el diseño previo.

Dimensionamiento en Planta

El dimensionamiento en planta se ha llevado a cabo utilizando el Simulador de Maniobra de Buques, en Tiempo Real de SIPO21. Las maniobras en simulador se llevan a cabo utilizando como base el diseño preliminar del canal obtenido en la fase de Diseño Conceptual teniendo en cuenta principalmente lo establecido en la documentación de referencia de la ROM y del PIANC. Como resultados se obtienen la determinación de anchos y profundidades preliminares definidos en cada tramo del canal como se expone en la figura 1.

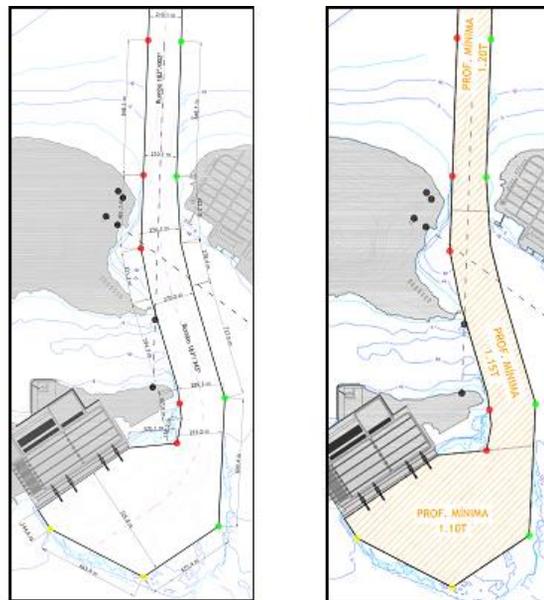


Figura 1. Configuración en planta (izquierda) y alzado (derecha) del canal preliminar propuesto para el acceso de buques portacontenedores Neo-Panamax

Las **Condiciones hidrometeorológicas** empleadas estribaban en valores que garantizan un elevado nivel de operatividad en el rango 96.4%–97.5% (9-13 días o 220-315 horas de excedencia al año). Dentro de los resultados alcanzados estuvo la determinación de las **zonas navegables propuestas** para la **optimización del Diseño Conceptual**. Lo cual fue posible a partir de considerar válidas las condiciones de acceso límite definidas del viento máximo, de altura de ola máxima, de la corriente superficial máxima en el exterior y los medios de maniobra similares a los considerados (hélices de maniobra de proa y una formación de 3 remolcadores de propulsión especial (ASD) de 50 t de tiro a punto fijo). Estos factores posibilitaron definir un nuevo canal que se muestra en la figura 2.

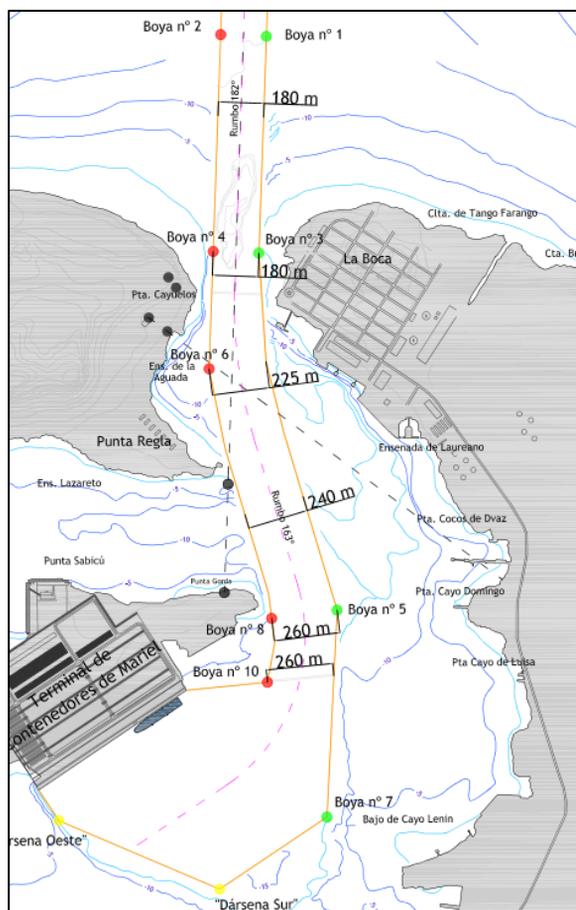


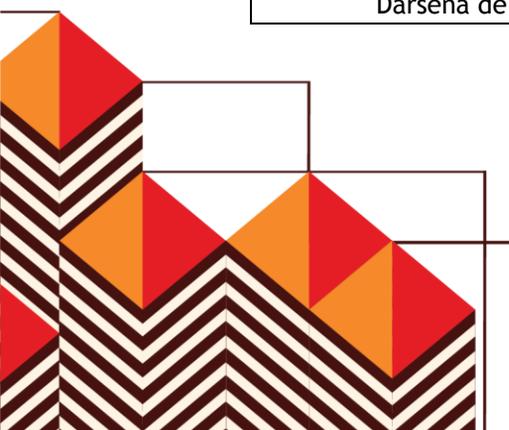
Figura 2. Canal de acceso definido.

El dimensionamiento en alzado se ha llevado a cabo empleando un programa informático específico, desarrollado por Siport21, que realiza los cálculos basados en el método de integración numérica en combinación con el método de Monte Carlo mediante un análisis probabilista, tomando en consideración los siguientes aspectos:

- Los resultados obtenidos corresponden a una probabilidad de contacto con el fondo de 10^{-4} en un trayecto individual a lo largo del canal y a la exigencia de un resguardo bajo quilla mínimo (mayor valor de 5% del calado ó 0.6 m).
- El canal se divide en 3 zonas: Canal Exterior, Canal Interior y Dársena de Reviro. En cada una de estas zonas se define una profundidad (cota de dragado mínima) que permite el acceso con un nivel adecuado de seguridad.
- La profundidad mínima debe ser garantizada. No se tiene en cuenta la eventual sedimentación del canal ni se ha considerado una tolerancia de dragado para prevenir problemas de sedimentación, si existiesen, o para garantizar la profundidad mínima si la tolerancia de dragado es mayor.
- Se limita el acceso o la salida del buque a 3.6 m de altura de ola máxima ($H_s=2.2$ m), que es el máximo permitido según el estudio de maniobra. Ha de tenerse en cuenta que este valor límite de altura de ola se corresponde, según los datos de oleaje de la NOAA, con una operatividad de 97.64%.

Tabla 1. Cotas mínimas de dragado recomendadas. Calado 15 m

Zona	Alternativa 1	Alternativa 2
Canal Exterior	17.25 m (1.15·T)	17.75 m (1.18·T)
Canal Interior	16.65 m (1.11·T)	16.65 m (1.11·T)
Dársena de Reviro	16.30 m (1.09·T)	16.30 m (1.09·T)



3- RESULTADOS

Partiendo de las conclusiones del estudio de simulación el proyecto de dragado para el barco de 366 eslora quedo reajustado de la forma siguiente:

Se mantienen los tres objetos de obra:

- Canal exterior
- Canal interior
- Dársena de maniobra y caja de atraque

Canal exterior con un ancho de 180 m hasta el área de transición donde se empieza ampliar para entrar al canal interior que comienza con 225 m en el área cerca a Punta Gorda se amplía a 240 m al final y a la entrada de la dársena tiene 260 m, la dársena de maniobra con un área de 644390 m² tiene una longitud en el centro de 797 m.

Profundidad de dragado

Canal exterior: 17.25 m

Canal interior: 16.65

Dársena de maniobra y caja de atraque: 16.30

- Como resultado del trabajo se logra optimizar el proyecto en los aspectos siguientes:
 - Se disminuye el ancho del canal exterior de 200 a 180 m
 - Se disminuye el calado del buque tipo a emplear de 15.6 m a 15.m
 - aleja el límite de dragado en la zona de Punta Gorda de 22 a 57 m
 - logra una disminución de la profundidad de dragado en todas las zonas del proyecto con una relación Profundidad calado más eficiente.



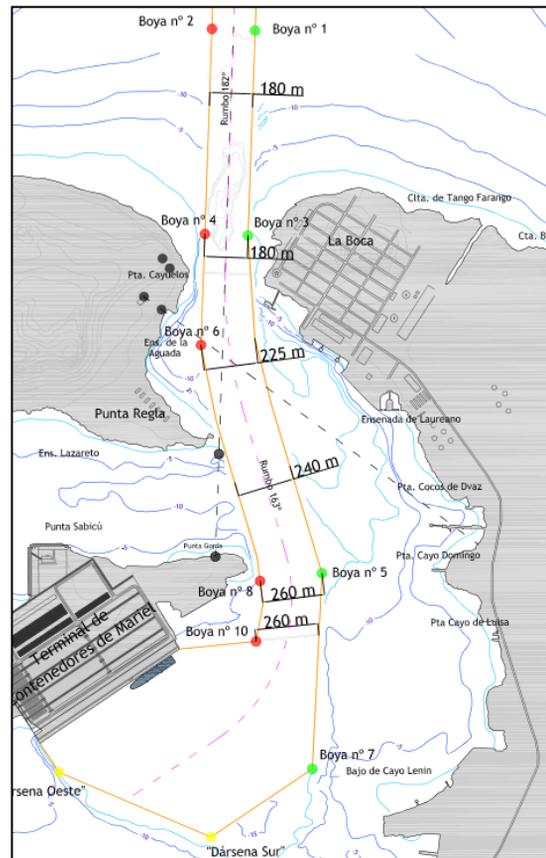
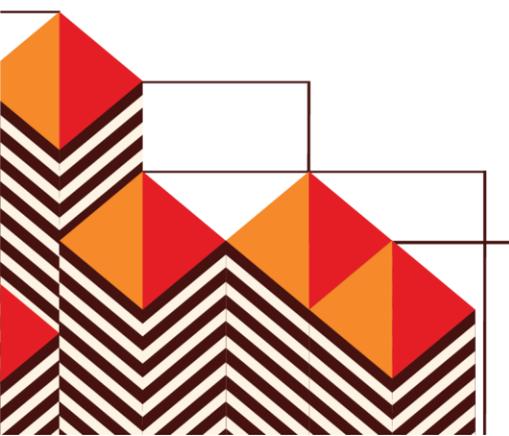


Figura 3. Canal de acceso propuesto

4- DISCUSIÓN

Con los nuevos parámetros obtenidos se logra una disminución del volumen total, aportando ahorros significados al proyecto y disminuyendo los plazos de ejecución lo que facilitará al Explotador y la Administración Marítima de Cuba, comercializar el puerto para buques de gran porte.

Se logra un proyecto para una operatividad del puerto de más del 95%, situándolo al nivel de los puertos de su tipo en el mundo.



La optimización obtenida se alcanza con la experiencia y herramientas con que cuentan los especialistas del SIPORT 21 que logran una mejor y adecuada estrategia de maniobra que permite la entrada y salida del buque con mayor seguridad y uso racional de los remolcadores.

Las autoridades marítimas representadas, el proyectista, los inversionistas y el explotador consideran que, en el nuevo canal, es viable el acceso del buque portacontenedores Neo-Panamax de 366.5 m de eslora, 51.2 m de manga y 15.0m de calado, garantizando la seguridad en las maniobras con las condiciones hidrometeorológicas simuladas que aseguran un nivel de operatividad del puerto superior al 95%.

La disminución de los volúmenes de dragado fundamentalmente en roca permite marcar una nueva estrategia de dragado.

Se optimiza la maniobra, reduciendo el tiempo de uso efectivo de los remolcadores durante el tránsito por el canal con 3 remolcadores de propulsión especial (ASD) de 50 t de tiro a punto fijo).

El canal propuesto tiene asociado un nivel de probabilidad de excedencia (varada) entre 0.1% y 0.01% (zona de reviro y canal, respectivamente). En todos los casos, se han considerado las condiciones que más pueden comprometer la seguridad del resto de las terminales y del propio buque. Se busca disminuir la velocidad del buque hasta lograr pararlo y controlarlo, sin exceder los límites del canal dragado y sin interferir con buques colindantes ni estructuras portuarias.

De acuerdo a la batimetría actualizada en octubre del 2017 los volúmenes pendientes a dragar según proyecto aprobado y optimizado se pueden apreciar en la tabla 2:

Tabla 2. Diferencias de volúmenes con el resultado de estudio

Zona	Volumen total en m3		
	Proyecto aprobado (200m)	Proyecto optimizado (180m)	Diferencia
Canal exterior	464774	321933	-142841
Canal Interior	932410	678104	-254306
Dársena y caja de atraque	1124967	542466	-582501
Total	2522151	1542503	-979648

5- CONCLUSIONES

1. El proceso de Simulaciones Náuticas aplicadas al diseño de áreas de navegación en Cuba ha facilitado la optimización de proyectos de dragados, vitales para el desarrollo económico del país.
2. La implementación de las simulaciones náuticas al Proyecto de Dragado asociado con la explotación del canal de acceso al Puerto del Mariel permitió la optimización del mismo, logrando disminuir el volumen total de dragado pendiente a extraer en un 38%.
 - En el canal exterior se logra disminuir en 114300 m³ el volumen de roca a extraer.
 - En el canal interior se logra disminuir en 47226 m³ el volumen a extraer.
 - Para un ahorro total de 161526 m³ de roca a dragar.
 - Los volúmenes totales para dragar disminuyeron en 123850 m³.

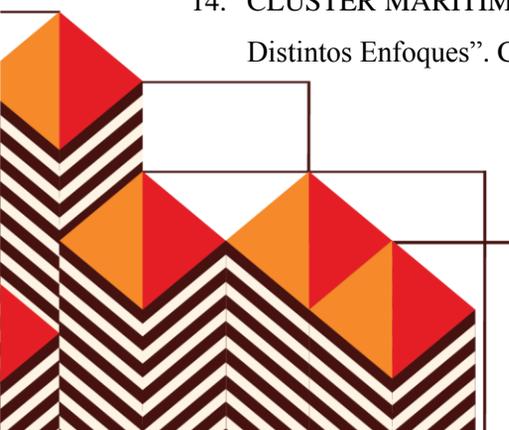
Estos resultados evidencian, el nivel de importancia de aplicación en este tipo de proyecto y los grandes ahorros por conceptos de costes financieros asociados.

6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PIANC. “Harbour Approach Channels Design Guidelines”. Report No. 121-2014. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. VAT BE 408-287-945. Brussels. Belgium. 2014.
2. PIANC. “Ship Handling Simulation Dedicated to Channel and Harbour Design”. Report No. 20-171. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. Brussels. Belgium. 2022.
3. PIANC. “Approach Channels. A Guide for Design”. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. Brussels. Belgium. 1997.
4. ROM. “ROM 3.1-99 Proyecto de configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación”. Editorial Obras Marítimas Tecnología. Puerto del Estado. España. 1999.
5. Bénédict, K., Kirchoff, M., Gluch, M., Fisher, S., Schaub, M., Baldauf, M., and Klaes, S. “Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling”. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). DOI: 10.12716/1001.08.01.15. University of Gdansk. Poland. 2014. No. 8 (1). pp 131-141.



6. Baldauf, M., Benedict, K., Kirchhoff, M., Gluch, M., Fischer, S. and Schaub, M. “Simulation-Augmented Methods for Safe and Efficient Manoeuvres in Harbour Areas”. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). DOI:10.12716/1001.10.02.02. University of Gdansk. Poland. 2016. No. 10 (2). pp 193-201.
7. Łącki, M. “Intelligent Prediction of Ship Maneuvering”. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav), 10(3), 511-516. DOI:10.12716/1001.10.03.17. University of Gdansk. Poland. 2014. No. 10 (3). pp 511-516.
8. Mansuy, M., Candries, M., Eloit, K. and Wéry, B. “Optimization of a Ship Turning Basin Using Real Time Simulations – A Case Study for the Quai Des Trois Fontaines (Chooz, France)”. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). DOI:10.12716/1001.13.02.12. University of Gdansk. Poland. 2019. No. 13(2). pp 357-363.
9. Kløvning, E.M. “Wind Affecting Berthing Operations”. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). DOI:10.12716/1001.14.03.26. University of Gdansk. Poland. 2020. No. 14 (3). pp 721-725.
10. Atienza, R. “Diseño de canales de gran complejidad. Necesidad de asesoría náutica”. Webinar: Maniobras de Buques en canales de alto riesgo. Propuesta de soluciones desde el diseño. Asociación Nacional de Prácticos de Colombia (ANPRA). Bogotá, Colombia. 2021.
11. Jaen, F. “Modelos a escala tripulados como preparación para navegar en canales estrechos”. Webinar: Maniobras de Buques en canales de alto riesgo. Propuesta de soluciones desde el diseño. Asociación Nacional de Prácticos de Colombia (ANPRA). Bogotá, Colombia. 2021.
12. Gilardoni, E. “Condiciones restrictivas de la maniobra en zonas de canales”. Webinar: Maniobras de Buques en canales de alto riesgo. Propuesta de soluciones desde el diseño. Asociación Nacional de Prácticos de Colombia (ANPRA). Bogotá, Colombia. 2021.
13. Iribarren, J.R. “Recomendaciones PIANC WG121 y ROM 3.1-99. Una visión ampliada”. Webinar: Maniobras de Buques en canales de alto riesgo. Propuesta de soluciones desde el diseño. Asociación Nacional de Prácticos de Colombia (ANPRA). Bogotá, Colombia. 2021.
14. CLUSTER MARÍTIMO ESPAÑOL. Webinar “La Varada del Ever Given” en el Canal de Suez. Los Distintos Enfoques”. Clúster Marítimo Español. Madrid, España. 2021.



15. MARIN. “Safety and Nautical Study for the access channel of Cienfuegos Port to receive LNG Carriers. Phase 3: Real Time Simulations. Draft Report No. 23709-1-MSCN. The Netherlands. 2010. 86 pp.
16. SIPORT21. “Estudio de Simulación de Maniobras de Grandes Buques Post-Panamx de 300 y 335 m de eslora para la nueva Terminal de Contenedores de Mariel. Informe Final. Código: 2016035. Madrid. España. Noviembre 2017. 76pp.
17. Barrera Luque, Z.; Lazo Porta, L. y Otros. “Estudio de maniobrabilidad mediante Simulación de Maniobra de Buque en Tiempo Real (ESMB-TRe) (NTPro-4000 v4.62). Canal Dragado. Ensenada de Cajimaya. Bahía de Nipe”. Agencia de Ingeniería de Costa. Empresa GEOCUBA Estudios Marinos. Noviembre 2021. 147 pp.
18. NORMAS CUBANAS. “NC 53 -176. 1987. Proyectos de Construcción Canales marítimos. Métodos de cálculo”. Oficina Nacional de Normalización (ONN). Ciudad de La Habana. 1987.

