

## Paper 31 - Modelación y planificación del vertido de productos de dragado mediante AutoCAD CIVIL 3D

Larnaudie, D. y López Laborde, J.

*CSI Ingenieros SA, Soriano 1180 – Montevideo, R. O. del Uruguay*

Email: [dlarnaudie@csi-ing.com](mailto:dlarnaudie@csi-ing.com)

**ABSTRACT:** From December, 2015 till March, 2016, CSI Ingenieros SA monitored and supervised the dredging works related to the rectification of the nautical areas corresponding to Punta Pereira Port Terminal (Colonia department, Uruguay), with special reference to work programming and operational aspects of both activities: dredging and dumping of dredge materials. Such works were conducted by Van Oord Marine Ingenuity and were made with the aid of a backhoe dredger (SIMSON, one of the largest in the world, which used a bucket of 32 m<sup>3</sup> capacity) and two self propelled barges (CORNELIS LELY and PIETER CALAND) with 2,853 m<sup>3</sup> of Hooper capacity each one. For project purposes, the dumping area reached a surface area of 4.35 km<sup>2</sup>; however, subsequent requests from the competent authorities implied a reduction of the same one (to 2.64 km<sup>2</sup>) and established a certain clearance depth (3.80 m PRH) which reduced the available dumping area even more (up to 0.67 km<sup>2</sup>). Although the remaining area had enough capacity (theoretically) there was no room for inefficiencies; consequently, it was necessary to perform planning and implementation of dumping activities with the greatest detail and accuracy.

In early February, the dredging contractor conducted a multibeam bathymetry and submitted a report indicating capacity problems as well as the necessity to perform a large number of low volume discharges (75% of them should be less than 3,000 tons) which would imply significant extra costs.

As multibeam bathymetry allowed to know – with a great detail – the morphological characteristics of the dredged material discharges, it was decided – as a way to support the dredging contractor works – to use AutoCAD ® CIVIL 3D ® as a tool for modeling and planning the remaining dredge material dumps. The methodology was developed in two stages: **1)** Morphological analysis, in order to obtain a representative model of the dredged material discharges (both longitudinal and transverse to discharge direction); and **2)** Dumping simulation by volume balances based on: **a)** a parameterized dynamic criteria; **b)** automatic calculation of discharges location; and **c)** volume optimization (in order to ensure non exceeding the allowance depth).

The result was a total of 113 possible locations for dredge material disposal capable to accommodate a higher volume than the one required; most of such discharges involved 3,000 tons or more (without the need to pay extra costs). In practice, it was not possible to perform all the scheduled discharges due to difficulties to reach the dumping site (previous dumps acted as real "obstacles to navigation"); however, the virtues of the modeling and planning tool – AutoCAD ® CIVIL 3D ® – were evident (having contributed to meet compliance with the projected dredging program). Consequently, authors recommend its application from the earliest stages of dredge material dumping works (once the information in order to morphologically characterize the dumps is available).

### 1 INTRODUCCIÓN

Zona Franca Punta Pereira SA opera una terminal portuaria ubicada en la localidad de

Punta Pereira (Departamento de Colonia, República Oriental del Uruguay, Figura 1) que se encuentra íntimamente asociada a una planta de celulosa y energía y que está

conformada por dos muelles, un muelle de barcazas y un muelle oceánico – multipropósito (Figura 2), destinados a proveer los servicios logísticos necesarios para el funcionamiento de la planta industrial.

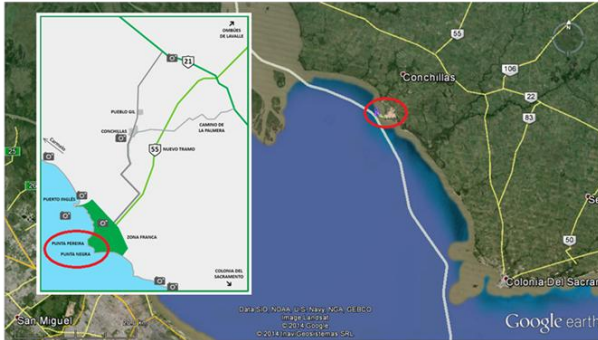


Figura 1. Ubicación de la Terminal Portuaria Punta Pereira



Figura 2. Vista general de la Terminal Portuaria de Punta Pereira

Las áreas náuticas de dicha Terminal Portuaria (Figura 3) fueron definidas en el año 2007 para una embarcación de diseño de 200 m de eslora, 27 m de manga y 11 m de calado (30.000 DWG).



Figura 3. Relevamiento batimétrico (año 2014) de las áreas náuticas de la Terminal Portuaria

Las obras correspondientes al dragado de apertura fueron efectuadas por Dredging International NV entre Octubre de 2011 y Abril de 2012 utilizando, a tales efectos, la draga de succión con cortador “Rubens”.

Al presente, la Terminal Portuaria opera con buques de 6ta generación, tipo “Open Hatch Gantry Crane” (OHGC), con hasta 225 m de eslora, 32,26 m de manga y 9,75 m de calado (70.000 DWG). En consecuencia, la Corporación Uruguaya de Prácticos del Río Uruguay, Río de la Plata y Litoral Marítimo Oceánico planteó la necesidad de introducir mejoras al diseño de las áreas náuticas a efectos de lograr condiciones operativas más seguras – en todas las condiciones de viento y corriente – y, muy particularmente, en el tramo más próximo al canal Martín García donde se producen corrientes cruzadas que “empujan” al buque hacia el veril rojo – estribor – de dicho canal de acceso (Figura 4).

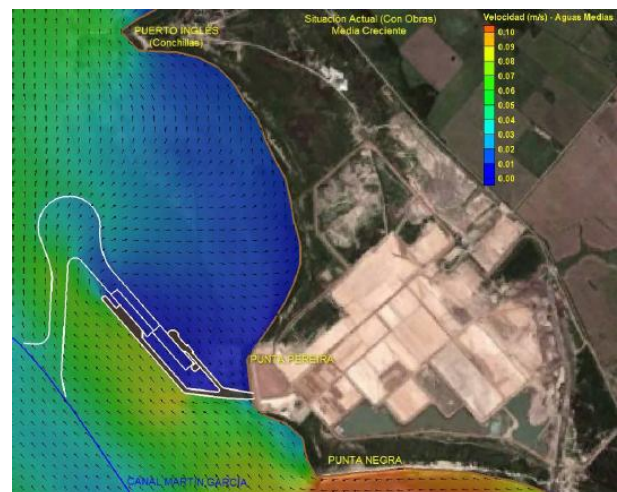


Figura 4. Modelación de las condiciones de corrientes para una situación de aguas medias y marea creciente

En respuesta a lo anterior, a partir de la aplicación de las normas más comúnmente utilizadas a tales efectos (USACE, 1980; UNCTAD, 1985; PIANC, 1997; Guardia Costera Canadiense; 1999; ROM, 2000, 2007) complementadas con ejercicios (simulaciones) de navegación y maniobras realizadas en el equipamiento perteneciente a la División Simulación y Tecnologías Educativas de la Escuela Naval (Armada Nacional, Uruguay), se proyectó la modificación del diseño geométrico de dichas áreas náuticas consistente en la rectificación de (Figura 5): **a)** el círculo de maniobras mediante la conformación de dos líneas tangentes perpendiculares entre sí; **b)** el enlace con el canal de acceso a los muelles; **c)** el acceso desde el canal Martín García mediante una ampliación del ancho en 90 m adicionales hacia el Oeste (veril verde); y **d)** la

curva de enlace con el canal Martín García correspondiente al extremo Este (veril rojo).

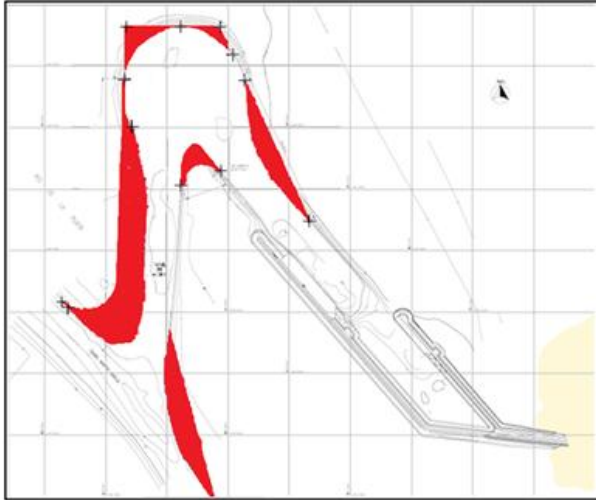


Figura 5. Características del dragado de rectificación de las áreas náuticas

El área de vertido fue seleccionada a partir de la consideración de diversos elementos que incluyeron: **a)** la distancia respecto a la zona de dragado; **b)** las profundidades disponibles; **c)** los volúmenes de vertido disponibles; **d)** el no invadir las zonas de vertido asignadas al mantenimiento del canal Martín García (tomando en consideración, a tales efectos, la información disponible en las cartas náuticas); y **e)** el no superar una cierta distancia mínima con respecto a dicho canal (fijada en 500 m).

Dicha área, con una superficie de 4,35 km<sup>2</sup> y profundidades que, de acuerdo a las cartas náuticas y los relevamientos oportunamente realizados, oscilaban entre los 4,0 y 7,5 m LIMB se desarrollaba entre las progresivas km 99,6 y 103,1 sobre el veril Este del canal Martín García y a una distancia del veril variable entre 1.100 y 1.500 m (Figura 6).

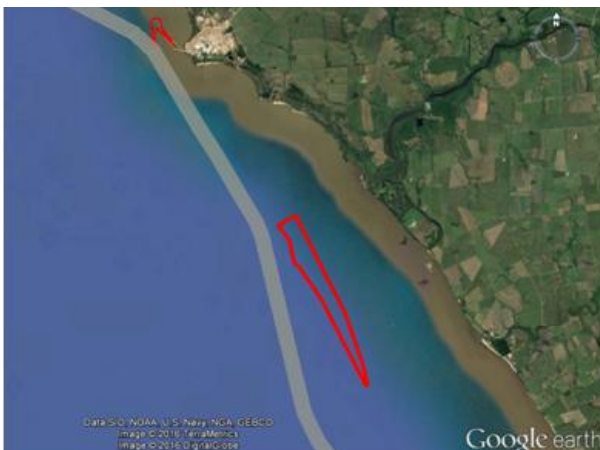


Figura 6. Ubicación de la zona de vertido seleccionada durante la fase de proyecto

Posteriormente, en Octubre de 2015, considerando que, entre otros aspectos, “existían diferencias entre la ubicación de las áreas de vertido actualmente en uso y las ubicadas en las cartas de navegación”, la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) dictó la Resolución N° 38/15 por la cual se aprueba la ubicación de las áreas de descarga para las tareas de dragado y mantenimiento de los canales del Río de la Plata entre el km 37 (Barra del Farallón) y el km 0 del Río Uruguay (canal Martín García).

Es así que surge una superposición entre el área previamente seleccionada y el área denominada San Juan Sur (Figura 7); lo anterior reduce el área de vertido a una superficie aproximada de 2,64 km<sup>2</sup>.



Figura 7. Superposición de la zona de vertido seleccionada durante la fase de proyecto y el área San Juan Sur según coordenadas establecidas por Resolución CARP 38/15

Finalmente, en Noviembre de 2015, mediante Resolución Ministerial N° 1479/2015, la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), otorgó la Autorización Ambiental Previa para las obras correspondientes al dragado de rectificación, quedando las mismas condicionadas al cumplimiento de diversos compromisos entre los cuales se incluía el que “los vertidos de productos de dragado sean realizados de forma tal que en ningún caso se generen calados inferiores a 3,80 m LIMB”.

Lo anterior se constituye en una nueva limitante que reduce aún más el área de vertido quedando disponible tan sólo 0,67 km<sup>2</sup> (Figura 8).



Figura 8. Área de vertido remanente (en rojo)

De acuerdo a los cálculos realizados a efectos de la licitación de las obras, el volumen de dragado ascendía a 494.060 m<sup>3</sup> (en sitio). Por su parte, la zona de vertido remanente disponía de una capacidad geométrica total que ascendía a (Figura 8 y Tabla 1): **a)** 467.747 m<sup>3</sup> con profundidades medias de 1,80 m bajo la cota -3,80 m LIMB, o **b)** 1.236.136 m<sup>3</sup> en profundidades superiores a 2,00 m bajo la cota -3,80 m LIMB (Figura 9 y Tabla 1). Si, por razones operativas, se considerara utilizar – solamente – la tercera parte de dicho volumen se llega a capacidades reales de vertido equivalentes a 155.915 m<sup>3</sup> y 412.045 m<sup>3</sup>; es decir un total de 567.960 m<sup>3</sup>, un 15 % superior al volumen “en sitio” de dragado. En consecuencia, no existía margen para ineficiencias por lo que la planificación y ejecución del vertido de los productos de dragado debía realizarse con el mayor detalle y precisión posibles.

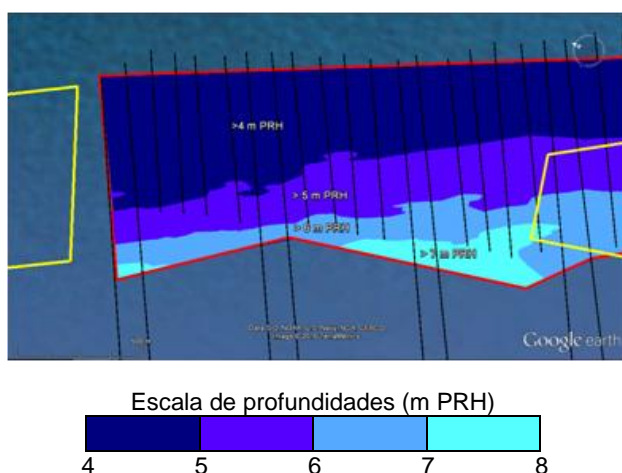


Figura 9. Profundidades (m PRH) del área de vertido remanente

Prof. (m PRH)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	1/3 Volumen (m <sup>3</sup> )
3,8 a 5,8	467.747	266.182	155.915
> 5,8	1.236.136	405.166	412.045
<b>Total</b>	<b>1.703.883</b>	<b>671,348</b>	<b>567.960</b>

Tabla 1. Cálculo de la capacidad real (1/3 del volumen disponible)

Las obras, fueron adjudicadas a Van Oord Marine Ingenuity y ejecutadas entre los meses de Diciembre de 2015 y Marzo de 2016 mediante (Figura 10): la draga retroexcavadora SIMSON (una de las más grandes del mundo en su tipo, que utilizó un balde de 32 m<sup>3</sup> de capacidad) y dos gánguiles autopropulsados (CORNELIS LELY y PIETER CALAND) de 2.853 m<sup>3</sup> de capacidad en cantara.



Figura 10. Vista de los equipos a cargo del dragado de rectificación

A inicios de Febrero – a poco más de 50 días de iniciadas las obras, cuando se había dragado un volumen igual a 338.292 m<sup>3</sup> “en sitio” equivalentes a 808.224 ton de descargas – el contratista realizó una batimetría “multihaz” y presentó un informe indicando: **a)** la falta de capacidad para albergar el dragado remanente; y **b)** la necesidad de realizar un importante número de descargas de bajo volumen (75 % de las descargas debía ser inferior a 3.000 ton), lo cual implicaría importantes sobrecostos. Tomando en consideración que la batimetría “multihaz” permitía conocer, con gran detalle, las características morfológicas de las descargas realizadas hasta ese momento, se decidió – como forma de apoyar los trabajos a cargo del contratista de las obras de dragado – utilizar AutoCAD ® CIVIL 3D ® como herramienta para la modelación y planificación de las restantes descargas.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 AutoCAD ® CIVIL 3D ®: Características

AutoCAD ® CIVIL 3D ® es una herramienta para cálculo, diseño y simulación en ingeniería civil que posee comandos y funciones similares

al AutoCAD® pero que, además, incluye otras específicamente dedicadas al diseño tridimensional (Autodesk, 2016).

Es una herramienta muy útil para el modelado de elementos vectoriales permitiendo trabajar con una cantidad considerable de datos y realizar análisis tales como la modelación de superficies de terreno, de proyectos lineales y de explanadas con capacidades BIM (“Building Information Modeling”) para el diseño, análisis y documentación de proyectos.

Su principal característica es que puede crear relaciones inteligentes entre los objetos de un proyecto de forma tal que los cambios realizados al mismo se actualizan en todo el proyecto y, al mismo tiempo, se recalcula la información de tablas y perfiles; se constituye así en una valiosa ayuda para la planificación y simulación de las posibles variantes del proyecto.

Como ya fuera indicado, tomando en consideración que la batimetría “multihaz” permitía conocer, con gran detalle, las características morfológicas de las descargas realizadas hasta ese momento, se decidió – como forma de apoyar los trabajos a cargo del contratista de las obras de dragado – utilizar AutoCAD® CIVIL 3D® como herramienta para la modelación y planificación de las restantes descargas.

La metodología aplicada se desarrolló en dos etapas: **a)** análisis morfológico de las descargas ya realizadas y obtención de un modelo representativo de su comportamiento; y **b)** simulación del vertido mediante balances de volumen.

## 2.2 Análisis morfológico de las descargas ya realizadas y obtención de un modelo representativo de su comportamiento

Como ya fuera indicado, la alta definición ofrecida por la batimetría “multihaz” permitía conocer, con gran precisión, las características morfológicas particulares de cada descarga. En consecuencia, se procedió a la comparación de las secciones transversales y longitudinales de una importante cantidad de descargas (140 de un total de 300; es decir el 46 % de las descargas realizadas hasta ese momento).

Para dicho conjunto (Figura 11), las capacidades de AutoCAD® CIVIL 3D® permitieron generar – en forma independiente, para las secciones transversales (Figura 12) y longitudinales (Figura 13) – vistas en perfil y series de datos cuyo análisis estadístico, mediante herramientas automáticas de mejor

ajuste (“Best Fit”) y criterios de regresión lineal, permitió identificar los cambios de pendiente significativos y, de ese forma, modelar una descarga tipo (Figura 14).

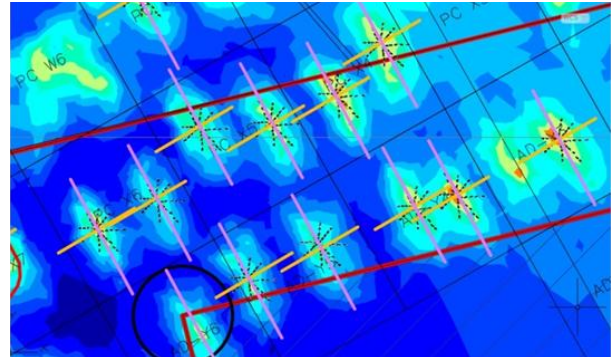


Figura 11. Vista parcial del conjunto de descargas seleccionado

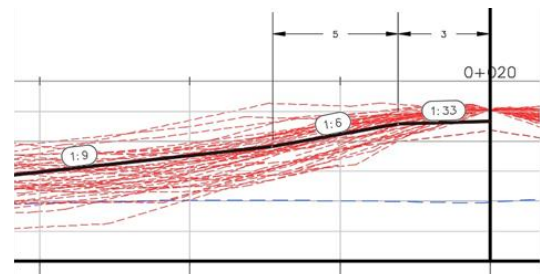


Figura 12. Comportamiento de la sección transversal del conjunto de descargas seleccionado

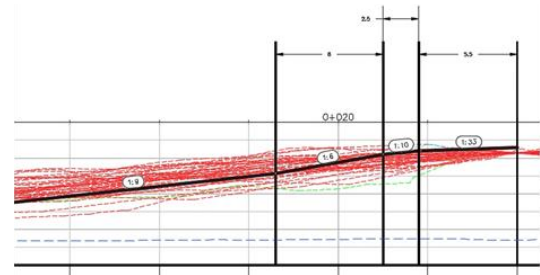


Figura 13. Comportamiento de la sección longitudinal del conjunto de descargas seleccionado

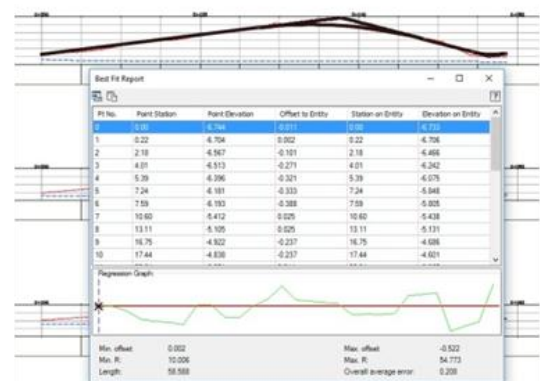


Figura 14. Análisis estadístico del conjunto de descargas seleccionado

## 2.3 Generación del modelo dinámico para un vertido tipo

A partir de los resultados del análisis morfológico de los vertidos ya realizados, se procedió a elaborar un modelo dinámico que, posteriormente, sería el utilizado para la simulación de las futuras descargas. A tales efectos, se utilizó la herramienta de modelación de explanadas ("Gradings") de AutoCAD® CIVIL 3D® creándose un modelo con la capacidad de adaptarse dinámicamente al relieve batimétrico y ajustar su altura en función del volumen requerido (balance de volúmenes). El modelo final, basado en el análisis estadístico de las descargas ya realizadas, presenta tres zonas con criterios geométricos claramente diferenciadas (Figura 15):

- a) La denominada Zona "A" corresponde a la parte superior de la descarga y presenta un ancho de 6,0 m y una longitud de 16,0 m. Sus pendientes son variables desde el centro hacia los bordes: **a)** en sentido longitudinal, presenta una pendiente inicial de 1:3 en los primeros 5,5 m (desde el centro) mientras que en los siguientes 2,5 m presenta pendiente 1:10; y **b)** en sentido transversal la pendiente es uniforme (1:10). En términos de modelación, dicha zona presenta forma constante (en todos los vertidos analizados) y sólo varía su elevación y ubicación planimétrica (no su forma).
- b) La denominada Zona "B" corresponde a la parte intermedia de la descarga y rodea a la Zona "A" con un ancho de 5,0 m y pendiente uniforme (1:6). Al igual que la Zona "A" esta zona del vertido tiene una forma constante y sólo varía su elevación y ubicación planimétrica.
- c) La denominada Zona "C" corresponde a la zona de contacto entre el vertido y el lecho del río presentando pendiente homogénea (1:9). En términos de modelación esta zona modifica su forma automáticamente para así ajustarse al lecho del río al variar su ubicación planimétrica y altimétrica. De este modo, al solicitar al programa de modelación que genere una descarga de un volumen determinado, el mismo deberá realizar modificaciones de la altura de la descarga recalculando los taludes de la Zona "C" hasta encontrar el volumen requerido.

La Figura 16 presenta una vista tridimensional del resultado de la modelación de una descarga.

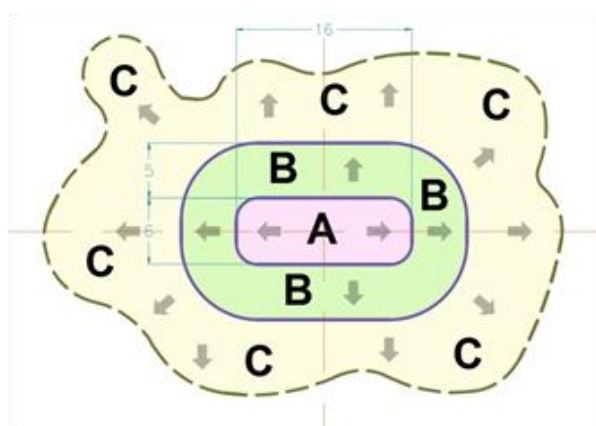


Figura 15. Zonas de una descarga tipo

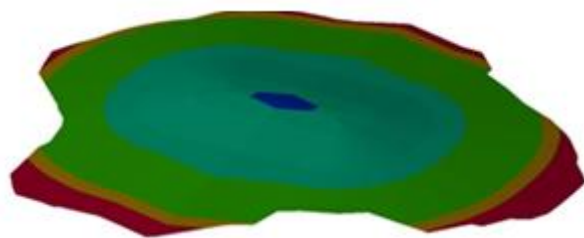


Figura 16. Vista tridimensional de una descarga tipo

## 2.4 Simulación del vertido de productos de dragado

Una vez finalizada la etapa de análisis de las descargas ya realizadas y generado el modelo dinámico, se procedió a ubicar las posibles nuevas descargas sobre la batimetría "multihaz" intentando, como criterio general, el lograr una descarga del mayor volumen posible de forma tal que su punto más elevado no sobrepasase la cota preestablecida (-3.80 m PRH). La Figura 17 presenta, en planta, la etapa inicial del análisis.

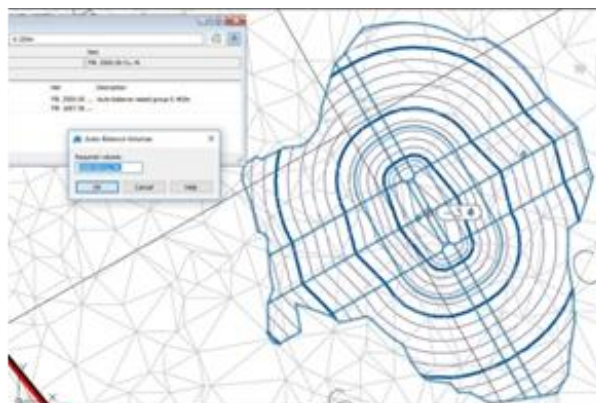


Figura 17. Modelación de una descarga: Vista en planta de la versión inicial

Posteriormente, mediante modificaciones de la altura y el volumen (capacidad) de cada descarga, el programa permite analizar dichos cambios en tiempo real, de modo que si el criterio de elevación máxima se supera ello resulta claramente identificable ya que las zonas que superan dicha cota se identifican con el color rojo (Figura 18).

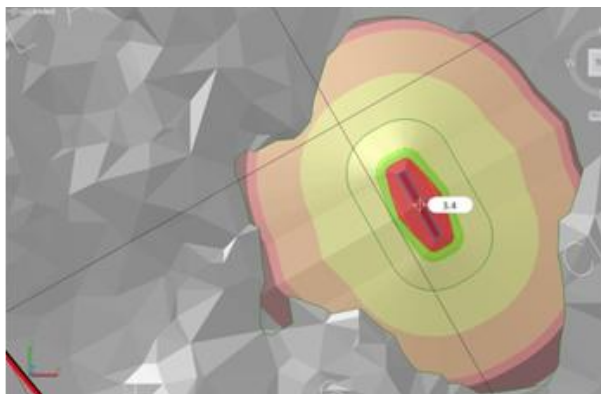


Figura 18. Modelación de una descarga:  
Vista en planta del análisis de la versión inicial

### 3 RESULTADOS

De la forma anteriormente descrita, la modelación mediante AutoCAD ® CIVIL 3D ® permitió identificar un total de 113 posibles descargas (Figura 19 y 20) capaces de albergar un volumen superior al requerido y que, en su mayoría, implicaban volúmenes iguales o superiores a 3.000 ton. Por otra parte, el volumen total correspondiente a dichas descargas resultaba más que suficiente para la finalización de los trabajos de dragado.

En la práctica no fue posible realizar todas las descargas planificadas, por imposibilidad de llegar al sitio de vertido (ya que descargas previas actuaban como “obstáculo a la navegación”). No obstante, ante las evidencias presentadas, respecto a la capacidad del área de vertido, los trabajos se extendieron por más de 30 días hasta totalizar 509.174 m<sup>3</sup> de dragado (en sitio) equivalentes a 1.144.264 ton de descargas permitiendo completar las obras previstas (Figura 21).

De esta forma, las virtudes de la herramienta de modelación y planificación – AutoCAD ® CIVIL 3D ® – fueron evidentes (habiendo contribuido a cumplir con la obra proyectada). En consecuencia, se recomienda su aplicación desde las más tempranas etapas de las obras de vertido de productos de dragado (una vez que se disponga de información suficiente como para caracterizar morfológicamente el tipo de vertido en consideración).

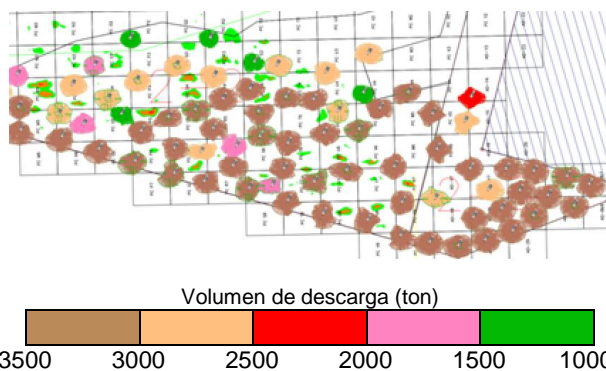


Figura 19. Modelación de descargas:  
Resultados (vista parcial, en planta)

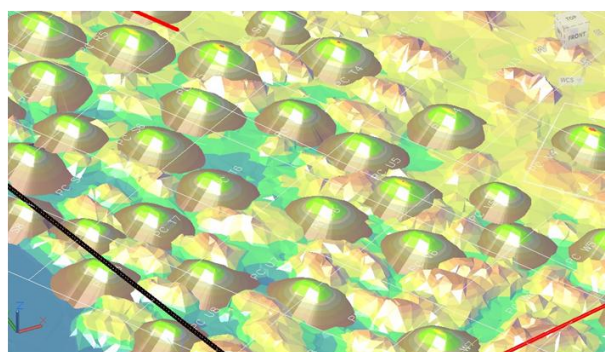


Figura 20. Modelación de descargas:  
Resultados (vista parcial, tridimensional)



Figura 21 Relevamiento batimétrico (año 2016)  
de las áreas náuticas de la Terminal Portuaria

### 4. CONCLUSIÓN

La modelación virtual de los proyectos de ingeniería permite – como nunca antes – el seguimiento de las obras a tiempo real, aportando soluciones precisas a problemas concretos y con escasos tiempos de definición. Tecnologías tales como el relevamiento batimétrico “multihaz”, combinadas con programas informáticos de avanzadas capacidades de modelación y técnicos expertos en el uso de las mismas, permiten realizar mejores proyectos en menor tiempo, optimizando los recursos disponibles y llevando

a niveles mínimos los tradicionales “imprevistos de obra”.

Si bien estas tecnologías no son sencillas de implementar, cuando se consideran los beneficios económicos que las mismas pueden aportar, resulta evidente que dicha inversión es altamente rentable.

El análisis aquí presentado fue completamente realizado en cinco (5) días; si hubiera demorado más su impacto en la obra no hubiera sido tan significativo. En consecuencia, la capacitación en el uso de las nuevas tecnologías – tales como las aquí aplicadas – resulta de particular importancia, al igual que la permanente actualización en el uso de las mismas.

## REFERENCIAS

AUTODESK. 2016. AutoCAD Civil 3D Tutorials. En: <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-civil-3d>

Canadian Coast Guard – Fisheries and Oceans Canada. 1999. Canadian Waterways National Maneuvering Guidelines: Channel Design Parameters.

Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP). 2015. Resolución N° 38/15: Áreas de Vaciado de los Canales del Río de la Plata entre el km 37 (Barra del Farallón) y el km 0 del Río Uruguay.

Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) – Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA). 2015. Resolución Ministerial N° 1479/2015.

Ministerio de Obras Públicas – Puertos del Estado (España) 2000, 2007. ROM 3.1–99: Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos, Canales de Acceso y Áreas de Flotación.

Permanent International Association of Navigational Congresses (PIANC). 1997. Approach Channels: A guide for design.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) 1985. Port development: A handbook for planners in developing countries.

United States Army Corp of Engineers (USACE). 1980. Layout and design of shallow draft waterways. Engineer Manual 1110–2–1611.