



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Ingeniería civil – Hidráulica

**ANÁLISIS Y MEJORA EN EL PROCESO DE
DRAGADO DE MANTENIMIENTO EN
PUERTOS A TRAVÉS DEL
COMPORTAMIENTO DE LOS SEDIMENTOS**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

P R E S E N T A:

GIBRÁN HUMBERTO MANJARREZ PÉREZ

Tutor principal:

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN
Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería

Comité tutorial:

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN
Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería
DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL
Facultad de Ingeniería
DRA. LILIA REYES CHÁVEZ
Coordinación de Hidráulica, Facultad de Ingeniería
DR. ISMAEL DE JESÚS MARIÑO TAPIA
Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F, NOVIEMBRE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN.
Secretario: DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL.
Vocal: DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN.
1er. Suplente: DRA. LILIA REYES CHÁVEZ.
2do. Suplente: DR. ISMAEL DE JESÚS MARIÑO TAPIA.

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

DEDICATORIA

*A mis padres y hermanos, pilares en mi vida.
A mi abuelita, María Domitila Ruíz Ochoa.
A mi Chaparrita.
Con amor.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no sería posible sin el aporte y enriquecimiento de las personas que contribuyeron significativamente en él, algunos de manera técnica y otras emotivas, sin importar en donde estén, quiero darles las gracias por formar parte de mí, por sus bendiciones y contribuciones.

Inicialmente agradezco de manera especial y sincera a mis tutores Dr. Edgar Mendoza Baldwin, y al Dr. Rodolfo Silva Casarín, el comienzo de este proyecto de vida fue posible gracias a su apoyo. Su confianza y respaldo profesional y personal, me ayudaron a superar limitaciones; además que su capacidad de guiar mis ideas fue un aporte invaluable. Permitirme participar en proyectos y campañas de campo a su lado, contribuyo en mi formación como investigador.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (el lugar más hermosa de la CDMX), y a su autoridades de por las facilidades y buen trato otorgado. Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por permitirme forma parte de su gran familia, el II lo convertí en mi primera casa, viví cinco sismos y conocí a personas maravillosas que enriquecieron mi vida y este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa y a su Programa de Formación de Doctores Jóvenes, por estar al pendiente de mi avance, formar vínculos entre los sinaloense y respaldarme profesionalmente; así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología porque en gran medida, su apoyo me permitió culminar este proyecto.

A mi comité tutorial: Dr. Ismael de Jesús Mariño Tapia, Dra. Lilia Reyes, Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval, agradezco sus valiosos comentarios, sugerencias y observaciones, mismas que enriquecieron esta tesis; gracias por su motivación y gran apoyo.

A Dragamex; International Associations of Dredging Companies (IADC); CEDA, Radex Building por brindarme la atención y guía. A la Administración Portuaria de Altamira Tamaulipas, por su interés y facilidades al inicio de mi investigación. A mi actual casa CPVM, del grupo OHL, por las facilidades y apoyo para mi realización profesional.

A la Facultad de Ciencias del Mar, por su ayuda a través del Dr. David Ernesto Serrano Hernández, quien amablemente revisó y aportó sugerencias a mi tema de tesis.

Mis maestros que a lo largo de este trayecto favorecieron mi formación. Tuve la fortuna de contar con su guía académica y su amistad fuera de las aulas: Dr. Jesús Meza, sus comentarios y sugerencias muy acertadas; M.I. Jaime Martínez, la pasión por la geotecnia nos mueve; Dr. Rafael Carmona, su pasión y la forma de ver los datos es maravillosa; mi querido profesor de Ética, Mtro. Ing. Óscar Vega Roldán un tipazo; Ing. Jaime Lara, amigo, aplicamos todos los días lo aprendido en Curso con Expertos; a los Cuasi ingenieros de PROTECO, aprender a programar sin ustedes sería muy complicado; a la Ing. Xóchitl Delgado, gracias por toda la información y su ayuda incondicional, e invitarme a continuar en mi formación profesional; A la Mtra. Magnolia Soto y al Dr. Javier Chávez, quienes constantemente mostraron interés en mis avances.

Agradezco a mi familia; muy especialmente a mi señora madre, Norma, tu gran corazón me acompaña invariablemente, usted siempre está a mi lado de muchas formas; y a mi padre, Cumberto, desde antes de tomar la decisión de estudiar un doctorado has contribuido en mi formación como investigador. Papá eres un gran maestro, y yo un alumno muy relajado.

A mis princesas, Mariel y Mónica: ustedes me han apoyado en todo cuanto les pedía, gracias por su tiempo y amor. A mi Brother, Jesús J, encontrarte me brindo la tranquilidad que necesitaba, estoy orgulloso de ti, ¡llegaremos lejos!; a mi cuñado Jesús, mi tío Abelardo, mi primo Omar se ganaron mi respeto y cariño por lo que hicieron por la familia y por mí. A mis enanos gracias por las alegrías Diana, Naomi, Janei y Logan. ¡Ya cuídate, duerme, descansa!

Por supuesto a mis tíos Daniel Manjarrez, Horacio y Héctor Pérez por su motivación. A mi querida Lorena González y Héctor Hernández, gracias por sus consejos y por cuidarme tanto.

A mi familia Juárez Cosío; Don Raúl, Raúl, Ricardo y Don Richar, gracias por lo que me enseñaron e integrarme a la familia. A mis arenosos, y futuros ingenieros: Eduardo Landa. Eduardo Saucedo., Laura Moreno, Oscar Ortiz, Juan Ortiz, Vianey Espinal. Mil gracias por todos los momentos juntos, por hacer de esta experiencia algo más llevadera, por esas noches en vela con pizzas, charlas interminables y mucho trabajo.

Imposible de olvidar a quienes diariamente contribuyeron y fueron testigos de mi desarrollo, Gracias por la convivencia y su ayuda en diferentes trabajos: Valeria, Abril, Rubí, Dalila, Poncho, Mario, mi estimada Musmé, mi pequeña Ligia. A mis colegas y amigos Miguel, Jaime, Jair y German su aporte en la programación no hubiera sido la misma. En especial y sincero a Sebastien de Brye, Alejandro Ruíz, Miguel Delgadillo, Angélica Félix y Mireille Escudero quienes además de una amistad, contribuyeron en las bases del código. A mis chicos del Laboratorio hija Ana, mi hijo Alejandro, Regina, Jesús, Iván, David, Carlos y Erick.

A Cuauhtémoc Franco, Angélica F, Ana Meneses, Ichel Pérez, Xavier Chávez, Antonio González, Juan Pablo, Miguel D, Gerardo, Miguel Laverde, Francisco Gutiérrez, Erick Freyermuth y Raúl Martell; mi estancia no habría sido la misma sin ustedes que me brindaron su amistad, su familia y aportes, mis grandes amigos los llevo en el corazón.

También a mis caballeros de estilo y Psicococos, mi compadre y hermano Ramón López, Carolina, Nora, Katia Pardo, Eliza y Roxana por sus revisiones, observaciones, tramitología y consultas. A mis hermanos Denise y Fernando por su apoyo y cariño. Mi colega Alberto Zaldívar, ¡es tiempo de hacer negocios!

A mis compañeros de trabajo, Elizabeth Quintero, Gerardo Puente, Víctor Bejarano, Luis Guillen y Cristo Parra, en especial al Ing. Mauro López Aguilar y Deisi Labarrios por ayudar directamente en este trabajo, así como sus enseñanzas.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros del II, UNAM; al Dr. Elías Becerril Bravo, Dra. Adriana Palma, Patricia R, Rene B, Angélica M, Mariana, y muy en especial a mi gran amiga la Dra. Tania Gómez Borraz, por su amistad sincera e incondicional, ayudarme a encauzar esfuerzos para terminar este proyecto.

¡Uno es para siempre responsable... Vida!

RESUMEN

ABSTRACT

En este trabajo se presenta el desarrollo, validación y aplicación de una nueva herramienta numérica que permite estimar la variación morfológica en los recintos portuarios y playas. La herramienta permite analizar de manera cualitativa y cuantitativa la influencia que ejerce el dragado en la evolución morfológica, así como el vertido de los materiales cercanos al puerto que ocasionan cambio morfológico en el fondo. Este modelo se acopla con un módulo de topografía que simula el dragado, y con un módulo estadístico de predicción de oleaje, el cual permite estimar las condiciones hidráulicas a la que estará sometido el sistema (altura de ola, la dirección del oleaje, el ángulo de incidencia, duración e intensidad de una tormenta). Esto último es de gran utilidad ya que en la República Mexicana existe una gran carencia de monitoreo e información del clima marítimo en zonas costeras.

Como apoyo técnico al modelo, se elaboró dentro del cuerpo de la presente tesis, los temas de dragado y manejo de sedimentos. En estas secciones se versa sobre los principales equipos, el manejo que se debe de dar a los materiales contaminados, técnicas más empleadas en esta área y métodos y procedimientos para el empleo de equipos de dragado.

Se presenta una simulación que consiste en la presencia de una playa con pendiente uniforme y la existencia de un rompeolas paralelo a la costa, se analiza el efecto que ejercen los obstáculos artificial en los estados morfodinámicos de la playa; la bondad de este caso es que se cuenta con la solución numérica para la predicción de la forma en planta de equilibrio debido a un dique no ligado a la costa.

Otro ejemplo de aplicación de efectos de dragado, se utilizó el Puerto de Coatzacoalcos, ya que se cuenta con datos estadísticos del clima marino de la zona, esta información es necesaria para que el modelo realice la simulación Montecarlo para determinar las condiciones y periodo de tormentas. La predicción oportuna de las modificaciones morfológicas e hidrodinámicas a las que es sometido un sistema debido a los cambios ocasionados por el dragado, es útil en proyectos de construcción y/o mantenimiento de puertos. Los resultados de esta evaluación suelen ser fructíferos para el manejo de cambios evolutivos no deseados y/o perjudiciales en el medio costero. El presente trabajo contribuye a mejorar las herramientas de diseño en ingeniería costera.

ABSTRACT

This study presents the development, validation and application of a new numerical tool that allows the estimation of the morphological variation in port areas and beaches. This tool can analyze qualitatively and quantitatively the influence of dredging on morphological evolution, as well as the disposal of materials near to the port that generate morphological change. This model is

coupled with a topography module that simulates dredging, and with a statistical wave prediction module, allowing the estimation of the hydraulic conditions affecting the system (wave height, wave direction, angle of incidence, duration and intensity of a storm). The latter is very useful since, in the Mexican Republic, there is a lack of measured data on the maritime climate in the coastal zones.

As technical support to the model, the topics of dredging and sediment management were developed in the thesis. These sections present the main equipment, the management that should be given to the polluted materials; the most used techniques in this area and the methods and procedures for the use of dredging equipment.

In addition, a simulation is presented in which a beach with a uniform slope is influenced by the presence of a breakwater parallel to the coast. Likewise, the effect of artificial obstacles in the morphodynamic states of the beach is analyzed. The advantage of this case is that it has the analytical solution for the prediction of the equilibrium shape in plan view due to a dike not connected to the coast.

Other example of application for dredging, the bathymetry of the Coatzacoalcos Port was used. Timely prediction of morphological and hydrodynamic modifications in which a system is subjected to changes due to dredging can be useful in construction and/or maintenance projects. The results of this assessment help the decision makers to have a broader understanding of what could happen in a development, and thereby avoid undesirable and/or detrimental morphological changes in the coastal environment. Thus, the present work contributes to improve the design tools in coastal engineering.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| RESUMEN/ABSTRACT | VI |
| ÍNDICE..... | VIII |
| RESUMEN/ABSTRACT | XIV |
| LISTA DE ILUSTRACIONES | XIV |
| RESUMEN/ABSTRACT | XVII |
| LISTA DE TABLAS..... | XVII |
| CAPÍTULO 1..... | 18 |
| Introducción | 19 |
| 1.1 Organización del trabajo | 21 |
| CAPÍTULO 2..... | 22 |
| 2 Generalidades del dragado | 23 |
| 2.1 Etapas en el proceso de dragado | 25 |
| 2.1.1 Descripción de las etapas | 25 |
| 2.2 Aplicación de las obras de dragado..... | 27 |
| 2.3 Materiales de dragado recurso productivo..... | 29 |

| | | |
|------------------------|---|-----------|
| 2.4 | Clasificación de las obras de dragado | 30 |
| 2.4.1 | Según el emplazamiento | 30 |
| 2.4.2 | Según las características del terreno..... | 30 |
| 2.4.3 | Según el tipo de dragado..... | 30 |
| 2.5 | Problemas en el dragado..... | 31 |
| 2.6 | Frecuencia de las operaciones de dragado | 32 |
| 2.7 | Tipos de materiales que pueden ser dragos | 32 |
| 2.8 | Desarrollo sostenible..... | 33 |
| 2.9 | Disposición de los materiales de dragado..... | 35 |
| CAPÍTULO 3..... | | 37 |
| <hr/> | | |
| 3 | Planteamiento del problema y objetivos | 38 |
| 3.1 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 38 |
| 3.2 | HIPÓTESIS | 39 |
| 3.3 | Objetivos | 39 |
| 3.3.1 | Objetivo general | 39 |
| 3.3.2 | Objetivos específicos..... | 40 |
| CAPÍTULO 4..... | | 41 |
| <hr/> | | |
| 4 | Métodos y procedimientos de dragado | 42 |
| 4.1 | Procesos básicos en el dragado..... | 43 |
| 4.1.1 | Tratamiento previo con explosivos | 44 |
| 4.1.2 | Tratamiento previo con medios mecánicos o percusión | 47 |
| 4.1.2.1 | Percutores mecánico o hidráulicos | 48 |
| 4.1.3 | Extracción del material dragado | 50 |
| 4.1.3.1 | Remoción del material | 50 |
| 4.1.4 | Transporte de los materiales extraídos..... | 51 |

| | | |
|------------------------|--|-----------|
| 4.1.5 | Descarga del material dragado..... | 52 |
| 4.1.5.1 | Impactos ambientales del dragado. | 54 |
| 4.1.5.2 | Selección de sitio de disposición | 56 |
| 4.1.5.3 | Vertido o Disposición en aguas abiertas..... | 59 |
| 4.1.6 | Recintos de disposición | 60 |
| CAPÍTULO 5..... | | 62 |
| <hr/> | | |
| 5 | Equipos de dragado..... | 63 |
| 5.1 | Clasificación de los equipos de dragado. | 63 |
| 5.2 | Técnicas de dragado..... | 64 |
| 5.3 | Tipos de dragas..... | 64 |
| 5.3.1 | Dragas mecánicas e hidráulicas..... | 65 |
| 5.4 | Dragas mecánicas:..... | 67 |
| 5.4.1 | Dragas de rosario..... | 68 |
| 5.4.2 | Dragas tipo pala o dipper | 68 |
| 5.4.3 | Dragas tipo pala o Dipper de retroexcavación | 69 |
| 5.4.4 | Dragas de cuchara | 70 |
| 5.5 | Dragas hidráulicas | 70 |
| 5.5.1 | Dragas Dustpan (Recogedora de fango)..... | 70 |
| 5.5.2 | Draga por inyección de agua | 71 |
| 5.5.3 | Draga de succión por arrastre | 72 |
| 5.6 | Dragas mixtas | 72 |
| 5.6.1 | Draga de succión con cortador (CSD)..... | 73 |
| 5.6.2 | Draga de succión con cortador vertical..... | 73 |
| 5.7 | Otras dragas | 73 |
| 5.7.1 | Rastra de fondo (Bed leveller)..... | 74 |
| 5.7.2 | Arado (Plough)..... | 74 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| 5.7.3 | Seafloor Production System | 74 |
| CAPÍTULO 6..... | | 75 |
| <hr/> | | |
| 6 | Modelos numéricos de evolución costera | 76 |
| 6.1 | Modelos de evolución morfológica en el dragado..... | 76 |
| 6.2 | Modelos de evolución | 77 |
| 6.2.1 | Modelo de área costera 3D y 2D | 79 |
| 6.2.2 | Modelos de perfil Transversal | 80 |
| 6.2.2.1 | Modelos de evolución de la línea de costa de una o varias líneas | 80 |
| 6.2.3 | Modelos de equilibrio de playas | 81 |
| 6.2.3.1 | Modelos de evolución morfodinámica | 81 |
| 6.3 | Aplicación de modelos numéricos..... | 82 |
| 6.4 | Efecto de diques rebasables y sumergidos en las formas en planta..... | 84 |
| CAPÍTULO 7..... | | 88 |
| <hr/> | | |
| 7 | Herramienta de apoyo al dragado marítimo portuario, SETRAD..... | 89 |
| 7.1 | Aplicación de los modelos de evolución morfológica en el dragado | 91 |
| 7.2 | Descripción del modelo <i>SETRAD</i> | 92 |
| 7.3 | Cálculo del transporte | 95 |
| 7.3.1 | Ecuaciones de gobierno y condiciones iniciales..... | 96 |
| 7.3.1.1 | Inicio de movimiento..... | 98 |
| 7.3.1.2 | Efecto de la pendiente..... | 99 |
| 7.3.1.3 | Evolución morfológica | 100 |
| 7.4 | Condiciones de frontera | 103 |
| 7.5 | Datos de entrada..... | 104 |
| 7.5.1 | WAPO (WAVE Propagation On the coast) | 104 |
| 7.5.2 | COCO | 105 |
| 7.6 | Validación del modelo numérico..... | 106 |

| | | |
|---|---|-----|
| 7.6.1 | Comparación de la herramienta con un caso teórico | 109 |
| 7.6.1.1 | Predicción de la forma en planta de equilibrio debido a diques exentos..... | 112 |
| 7.7 | Caso de aplicación | 122 |
| CAPÍTULO 8..... | | 129 |
| <hr/> <hr/> | | |
| Aportaciones, Conclusiones, y Futura Línea de Investigación | | 129 |
| 8 | Aportaciones, conclusiones, y futura línea de investigación | 130 |
| 8.1 | Aportaciones | 130 |
| 8.2 | Conclusiones..... | 131 |
| 8.3 | Futura línea de investigación | 133 |
| 9 | REFERENCIAS..... | 135 |
| <hr/> <hr/> | | |



LISTA DE ILUSTRACIONES

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 2-1, Proceso de desarrollo (Melorose et al., 2015). | 34 |
| Ilustración 2-2, Diagrama de flujo para la elección del sitio de vertido (Melorose et al., 2015) | 36 |
| Ilustración 4-1, Explosivos utilizando cargas huecas (derecha). (EXSA, 2009; Grimaldos). | 45 |
| Ilustración 4-2, Pontones (Jack-up), empleados en las obras de dragado (© 2017 BBC, Martrade, 2012). | 45 |
| Ilustración 4-3, Transporte y descarga por tuberías.(Marine Service Mediterranean, 1993). | 46 |
| Ilustración 4-4, Descarga por bombas, ©2007-2017 <i>The Construction Index</i> | 46 |
| Ilustración 4-5, Gánguil de casco partido, descarga por gravedad.(Clara Lahiguera, 2015) | 47 |
| Ilustración 4-6, Descarga del gánguil con pala o dipper con retroexcavadora © Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz, 2008 | 47 |
| Ilustración 4-7, Pílon instalado en grúa (Ltd., 2015). | 48 |
| Ilustración 4-8, “A, B, C, D” Martillos hidráulicos en operación, “E” diferentes tipos de picas, (Maquinaria, 2013). | 49 |
| Ilustración 4-9, “A” Tambor estándar, “B” Tambor para perfilado de paredes, “C” Tambor para materiales blandos (© Aplec España, 2001). | 49 |
| Ilustración 4-10, Fresadoras de rocas (CMM, 2015). | 50 |
| Ilustración 4-11, Estaciones de rebombeo (© H2O Control Ingeniería, 2010; Gözüyilmaz, 2013). | 51 |
| Ilustración 4-12, Vertido del material (EPA, 2004) | 53 |
| Ilustración 4-13, Configuración típica de los CDF, (Welp, 2008) | 61 |
| Ilustración 5-1, Cortador de acción giratoria © 2014APT Global Marine Services L.L.C. | 67 |
| Ilustración 5-2, Tipos de cubos (Brokers, 2016) | 67 |
| Ilustración 5-3, Draga de Cangilones (Sánchez, 2017) Ilustración 5-4, © 1999-2017, Alibaba. | 68 |
| Ilustración 5-5, Draga de pala tipo Dipper (Brokers, 2005). | 69 |
| Ilustración 5-6, <i>Draga tipo dripper de retroexcavadora (Promares, 2015)</i> | 69 |
| Ilustración 5-7, Draga de cuchara, removiendo piedras en el canal de Tunkey | 70 |
| Ilustración 5-8, Draga Dustpan (© 2000-2017 GlobalSecurity.org) | 71 |
| Ilustración 5-9, Draga por inyección de agua. (DRAVOSA, 2016) | 71 |
| Ilustración 5-10, Dragas de succión por arrastre (DRAVOSA, 2016). | 72 |
| Ilustración 5-11, Draga de succión con cortador (DRAVOSA, 2015) | 73 |
| Ilustración 5-12, Rastra de fondo (Bed leveller) © 2014 DEME. | 74 |
| Ilustración 6-1; Clasificación de los diferentes modelos de evolución de playas (Hanson et al., 2003) | 78 |
| Ilustración 6-2, Batimetría inicial. | 82 |
| Ilustración 6-3, Batimetría a los siete días. | 82 |
| Ilustración 6-4, Evolución morfológica. | 83 |
| Ilustración 6-5, Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo GENESIS frente | |

| | |
|--|-----|
| a la magnitud medida en Lakeview Park, Lorain (Ohio, Estados Unidos), (tomada de Komar, 1998). | 84 |
| Ilustración 6-6, Esquema de tómbolo. | 85 |
| Ilustración 6-7, Esquema de saliente. | 85 |
| Ilustración 6-8, Esquema doble saliente. | 87 |
| Ilustración 7-1, Diagrama de flujo de modelos de transporte de sedimentos. Referencia | 93 |
| Ilustración 7-2, Diagrama de flujo del modelo. | 94 |
| Ilustración 7-3, Batimetría del caso teórico. | 107 |
| Ilustración 7-4, Resultados de 72 horas | 107 |
| Ilustración 7-5, Resultados de modelos presentados. | 108 |
| Ilustración 7-6, Resultados modelo SETRAD | 109 |
| Ilustración 7-7, Batimetría del caso teórico. | 109 |
| Ilustración 7-8, Definición de las variables para determinar la forma en planta de equilibrio. | 112 |
| Ilustración 7-9, Esquema del tómbolo. | 113 |
| Ilustración 7-10, Esquema de saliente..... | 113 |
| Ilustración 7-11, Esquema de doble saliente..... | 114 |
| Ilustración 7-12, Rompeolas paralelo a la costa | 116 |
| Ilustración 7-13, Solución analítica. | 119 |
| Ilustración 7-14, Resultados de la simulación $t = 0$; $t = 720$ horas. | 120 |
| Ilustración 7-15, Comparación entre los resultados analíticos y numérico..... | 121 |
| Ilustración 7-16 Localización del puerto de Coatzacoalcos. | 122 |
| Ilustración 7-17, Dirección y altura del oleaje. | 123 |
| Ilustración 7-18, Mapa de corrientes..... | 123 |
| Ilustración 7-19, Caso de aplicación en Puerto de Coatzacoalcos, Ver. | 124 |
| Ilustración 7-20, Perfiles A de los casos a modelar. | 126 |
| Ilustración 7-21, Perfil A con los resultados de las simulaciones de 300 horas. | 127 |



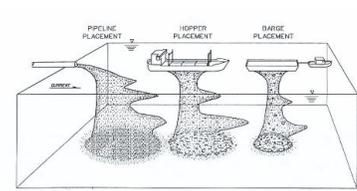
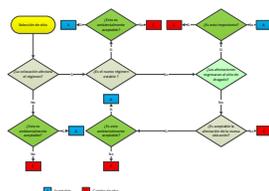
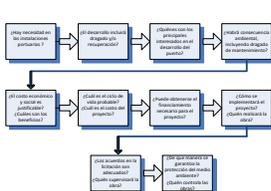
*LISTA
DE
TABLAS*

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 2-1, Principales problemas y soluciones en el dragado..... | 31 |
| Tabla 2-2, Principales problemas y soluciones en el dragado..... | 32 |
| Tabla 3-1, Niveles de acción de los materiales procedentes de dragado (Comisión nacional de estrategias de Marinas, 2015)..... | 57 |
| Tabla 4-1, Clasificación de dragas..... | 65 |
| Tabla 4-2, Clasificación de los diferentes tipos de dragas | 66 |
| Tabla 6-1, Parámetros de calibración del modelo..... | 106 |
| Tabla 6-2, Relación del diagrama geométrico. | 116 |
| Tabla 6-3, Coeficientes C_0 , C_1 , y C_2 en función de β | 118 |
| Tabla 6-4 Proyecciones de la forma del tombolo. | 119 |

CAPÍTULO 1

Introducción



Introducción

Los litorales comprenden la frontera natural entre el mar y la tierra, es por esta razón que su morfología depende de las características geológicas de la zona y de los procesos físicos que ocurren en ambos sistemas. Éstos se componen por sedimentos de diversos tamaños y características, las cuales van desde sedimentos no cohesivos como gravas y arenas, hasta cohesivos como arcillas y limos. Los sistemas sufren cambios topo-batimétricos debido a la acción de forzamientos que actúan sobre ellos; como son el viento, corrientes, oleaje, marea, corrientes de ríos, así como de las actividades antrópicas y biológicas. Las costas en donde se albergan numerosas marinas y puertos a nivel mundial, son de las regiones más dinámicas en la tierra pues son afectados por un incesante transporte de sedimento.

Los avances tecnológicos y la necesidad de mejorar la rentabilidad del comercio naval han dado lugar al mejoramiento de los buques, cada vez más grandes y eficientes; esto conlleva a profundizar ríos y canales de navegación con el fin de proporcionar accesos adecuados a los puertos. Lo que hace necesario, que los puertos recurran a obras de dragados, sea de mantenimiento o ampliación, en todas sus áreas de navegación. La paradoja a este respecto radica en que, un canal o área que se draga, se convierte por definición en una trampa de sedimento y esto eventualmente disminuye dramáticamente la vida útil de los dragados, máxime cuando la planeación y/u operación de los mismos no es la deseable. Sin embargo, los costos derivados de esta actividad suelen ser inesperadamente altos y por ello, se cuestiona la manera actual de realizarlo y se buscan herramientas que permitan optimizar sus costos, disminuyendo el transporte de sedimento mediante el empleo de obras y/o técnicas que lo capten o lo direccionen hacia zonas fuera del puerto.

Estos problemas ocasiona la necesidad de obtener información y predecir el comportamiento morfológico después de un dragado. La respuesta oportuna puede mejorar la evaluación de las características del impacto que éste causará. La predicción del destino de los sedimentos, es un elemento clave en la ingeniería costera para la planificación adecuada de los trabajos de dragado.

La implementación de modelos numéricos que resuelven la hidro-morfo dinámica de forma detallada suele ser a veces impráctico por el hecho que frecuentemente se tienen restricciones en cuanto a la calidad y detalle de la información base (datos de oleaje, perfiles, etc.). Una alternativa de solución a este inconveniente es la utilización de modelos numéricos, que de manera simple reproducen de forma confiable los cambios generales del sistema, con un enfoque ingenieril.

Los modelos de evolución morfológica de playas tratan de determinar las alteraciones que los cambios en la dinámica marina producen en la playa; lo cual depende principalmente del oleaje, mareas, viento, precipitación, topografía, características del sedimento, etcétera y las interacciones entre la morfología tridimensional de una playa con la dinámica del oleaje y del tipo de sedimento (procesos de retroalimentación).

En este trabajo se presenta la implementación y validación del programa *SETRAD* (Sediment TRANsport for Dredging), así como la descripción de su arquitectura. *SETRAD* se perfila como una herramienta auxiliar para el manejo del dragado en puertos, al predecir la variación morfológica en los recintos portuarios, y la trayectoria de los sedimentos mediante la determinación de parámetros tales como el campo de oleaje, campo de velocidad y tasa del transporte de sedimento. Incluye procesos de erosión y depósito de sedimentos. El modelo es capaz de simular meses de transporte de sedimento y tiene un módulo de topografía que simula la evolución espacio temporal del dragado y otro módulo estadístico predictivo de mareas de tormenta.

La importancia medular de este trabajo es: a) el desarrollo de una metodología y su implementación numérica, b) establecimiento de criterios para el manejo que deben de recibir los materiales de dragado y, c) directrices para el empleo de los equipos de dragado. Por lo que se desarrollaron temas que explican el uso de los principales equipos de dragado, las técnicas más utilizadas, métodos y procedimientos importante para el empleo de estos equipos, así como los elementos auxiliares que facilitan esta actividad.

1.1 Organización del trabajo

Este trabajo se distribuye en cinco capítulos, (*SETRAD*) a continuación se describen brevemente:

- El Segundo Capítulo, explica los procedimientos y métodos de dragado; así como el trato que deben de recibir los materiales utilizados antes, durante y después del dragado, y el uso de cobertura rígida conforme el grado de contaminación.
- El Capítulo Tercero, se plasman los objetivos del presente trabajo. En él se presenta el planteamiento del problema y la hipótesis.
- El Capítulo Cuarto, se abordan los procedimientos que se deben de emplear al realizar un dragado; la importancia y los tipos de trabajo que se pueden realizar; así como las consideraciones técnicas.
- El Capítulo Quinto, versa sobre los equipos y métodos empleados en el dragado. Se mencionan los diferentes mecanismos de dragado, con sus características principales y capacidad, en relación al tipo de suelo a tratar. También se contemplan los elementos auxiliares que facilitan el dragado.
- El Capítulo Sexto, se presenta el estado del arte que versa sobre el estudio de los modelos evolutivos morfológicos, conocimientos básicos de la morfología costera, y la ecuación de la parábola empleada en tombolos, esta información se emplea en los siguientes capítulos.
- El Capítulo Séptimo, se maneja la estructura del modelo de simulación numérica, describe su arquitectura; así como las ecuaciones de gobierno, la aplicación e implementación de ésta en un caso analítico, un ejemplo de aplicación, y finalmente se desarrollan las conclusiones a las que se llegaron después del análisis de los resultados.
- Finalmente, se generan las aportaciones, conclusiones y futura línea de investigación del proyecto doctoral en cuestión, lo anterior se menciona en el Capítulo Octavo.

CAPÍTULO 2

Generalidades del Dragado



GENERALIDADES DEL DRAGADO

02

CAPÍTULO SEGUNDO

2 Generalidades del dragado

Se entiende por dragado a los trabajos de extracción de materiales de origen geológico en un medio ambiente acuático; en otras palabras, el dragado es una excavación técnica bajo el agua que respeta en todo proceso las limitaciones ambientales.

El dragado es indispensable para crear y mantener las vías de navegación; tanto en marinas como en grandes puertos a nivel mundial. Los equipos de dragado son esenciales en proyectos de reclamación de tierra e infraestructura costera. Actualmente también se emplean para conservar el medio ambiente.

La historia se remonta a los chinos quienes fueron precursores del arte del dragado; por su parte los romanos utilizaron la pértiga con saco, herramienta denominada *bed levellers* (1565). Los holandeses, debido a las características litorales de su territorio, fueron los inventores de las primeras dragas (1600); las cuales estaban hechas de madera y compuesta de cangilones. Estas se accionaban con energía humana y posteriormente se utilizaron caballos. Fue hasta 1765 con la perfección del motor a vapor (James Watt) que se dio impulso a las bombas centrifugas y de esta forma a las obras de dragado. En 1867 con la apertura del canal de Suez se realizó el primer dragado hidráulico.

Las obras de dragado han permitido a las civilizaciones potencializar su desarrollo. Dos terceras partes de la tierra están cubiertas por agua, de ahí que desde tiempos remotos las personas, equipos, materiales y materias primas han sido transportados por el agua. Los avances tecnológicos

y la necesidad de mejorar la rentabilidad han dado lugar al perfeccionamiento de los buques, cada vez más grandes y eficientes; esto conlleva a profundizar ríos y canales con el fin de proporcionar accesos adecuados a los puertos; la función de los puertos es la de actuar como intercambiadores entre los modos de transportes marítimos y terrestres, lo cual resulta obvio atendiendo a que la existencia de la actividad marítima es la razón de ser de los puertos. Sin embargo, en la actualidad esta función ha sido sobrepasada y se llegan a convertir en centros logísticos de transporte intermodal de primer orden, en los que se realizan muchas otras actividades de valor añadido.

Muchos puertos requieren del dragado, lo que significa la eliminación de los sedimentos acumulados en el fondo del canal para garantizar las dimensiones proyectadas en la obra de construcción.

El dragado se realiza por diversas causas o finalidades, su objetivo obedece a diversas razones. En las Normas de Construcción e Instalaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (NOM-002-SCT4-2013, 2017) define al dragado en el apartado 4.310 Dragado (portuario) como: Operación que consiste en excavar bajo el agua para limpiar el fondo de los puertos, canales, ríos, lagos, etc. Esta definición es un poco limitativa, por lo cual es prudente ampliar la definición. Dragado es la acción de ahondar y limpiar para mantener o incrementar las profundidades en los puertos o vías navegables; sanear terrenos pantanosos, abriendo zanjas que permitan el libre flujo de las aguas; eliminar material en las zonas en las que se proyectan estructuras, eliminar los suelos de mala calidad para sustituirlos por otros adecuados y en general, efectuar movimientos de tierras cubiertas por las aguas.

El dragado resuelve problemas en la construcción, mantenimiento o desazolve de canales, en dársenas de puertos, estanques de acuicultura, obras de drenaje y de riego; permite el desarrollo en diferentes sectores tales como: infraestructura pesquera, portuaria y turística. El material producto del dragado se puede reubicar en las zonas de disposición, ya sea en el mar, en los cauces de ríos, en tierra firme o utilizarlo en rellenos de áreas bajas (para industria y urbanización).

2.1 Etapas en el proceso de dragado

El proceso de dragado consiste conceptualmente en disgregar, extraer, cargar, transportar y verter los materiales extraídos de los fondos marinos y fluviales.

Estas etapas son fundamentales y deben analizarse con detenimiento para optimizar las operaciones, las cuales se realizan con embarcaciones especializadas llamadas dragas, éstas tienen instalados equipos e instrumentos necesarios para realizar excavaciones. Existen numerosos equipos que se diferencian principalmente por la forma de realizar la excavación, ya sea por medios mecánicos, hidráulicos o combinados.

2.1.1 Descripción de las etapas

- **Disgregación del material:** es la fracturación del material, se efectúa por diversos medios dependiendo del tipo de draga, se emplea para este fin un cortador ubicado en la cabeza dragadora y equipos de quebrantamiento previo, los cuales pueden ser el uso de explosivos o medios mecánicos.
- **Elevación del material:** es el traslado del material desde el lecho marino o cuerpo de agua hasta la superficie, se puede realizar por medios mecánicos, hidráulicos o la combinación de éstos, dependiendo del tipo de draga.
- **Transporte del material excavado:** implica el movimiento del material desde el área de dragado hasta el sitio en que se utilizará, también incluye el vertido y/o tratamiento intermedio. El transporte se realiza por uno de los siguientes medios: tolvas de las dragas autopropulsadas, embarcaciones remolcadas, gánguiles de carga, barcazas, bombas centrifugas (transporte por tuberías), y utilizando las fuerzas naturales como el oleaje y las corrientes.
- **Lugar de descarga:** es uno de los elementos que más influye en el costo de dragado. Éste define la distancia y el método de transporte, puede ayudar a definir el tipo de draga. La descarga se efectúa en tierra o en zonas de aguas de mayor profundidad, lo más usual es el vertido

mediante descarga por fondo o por bombeo a través de tuberías. En pocas ocasiones se transporta el material mediante camiones de volteo o correas transportadoras. La reutilización y el aprovechamiento de los materiales procedentes del dragado es cada vez más frecuente.

En algunos casos el dragado busca satisfacer la demanda de materiales. Los dragados ambientales o para la navegación se realizan con el objeto de remover el material de su lugar original. En estos casos surge la pregunta, ¿qué hacer con el material removido?, como resultado del crecimiento de las restricciones medioambientales, la búsqueda de una respuesta, ha llegado a ser una dificultad creciente, especialmente cuando el material está contaminado; en su caso, el subsiguiente uso final de los materiales extraídos puede representar una alternativa adicional de benéficos resultados con el tratamiento adecuado.

Las limitaciones ambientales están dadas por las condiciones de los materiales a dragar y por las características del medio acuático. Hay una tendencia mundial muy fuerte a extremar las precauciones para no producir impactos ambientales desfavorables.

En las etapas del dragado se debe considerar, además de los factores propios de la obra, aspectos ambientales, normativos y sociales. En este sentido, el éxito del mismo puede llegar a depender en mayor medida a las políticas y alternativas del vertido del material, que a la ejecución del dragado.

La profundidad a que se debe dragar un puerto está subordinada a los navíos de mayor calado que lo frecuentan, ésta se calcula al tomar como referencia los datos estadísticos de los ingresos y salidas de los buques, los cuales se clasifican conforme a su calado, con ello se establece la norma para determinar la profundidad de dragado, que generalmente es la que corresponde al calado del 95% de los buques.

La profundidad también es influenciada por las características del fondo, oleaje y velocidad de los buques (Lavalle Argudin, 1972). Como dato puntual, el espacio entre quilla y fondo debe ser: suelo suave 30 centímetros, y de 90 cm en rocoso.

La profundidad de navegación en los puertos es una infraestructura básica, para llegar a una profundidad del buque de diseño se cuenta con el dragado. Dependiendo del caso puede ser dragado de construcción o dragado de mantenimiento, este último permite corregir el azolvamiento derivado del transporte litoral y los aportes de materiales provenientes del escurrimiento terrestre, a efecto de garantizar la profundidad de las vías navegables o cuerpos de agua en general.

2.2 Aplicación de las obras de dragado

Las obras de dragado están especialmente relacionadas con la construcción y mantenimiento portuario, regeneración de playas, y obras en ríos; sus aplicaciones son diversas: en ingeniería civil, la minería y acuacultura. Éstas se clasifican según el objetivo del dragado, su emplazamiento y características del terreno a dragar. El dragado generalmente no es un fin, sino un medio.

Las razones generales que hacen necesaria una operación de dragado son fundamentalmente cinco, pudiendo estar combinadas:

1. **Excavar el fondo del mar, de un río o un lago.** Por ejemplo: en la construcción de nuevos puertos o muelles, bases submarinas, mantenimiento y mejora del calado, aumento de la capacidad de desagüe en ríos y canales, construcción de trincheras submarinas para oleoductos, tuberías y emisarios, formación de trampas de arena, drenaje de zonas pantanosas, etc.
2. **Reemplazar material.** Se realiza para sustituir terrenos de bajas características geotécnicas, poca capacidad de carga o muy deformable.
3. **Obtener materiales para construcción y minería.** Como gravas, arenas, oro, manganeso, etc.

4. **Relleno.** El material extraído en el dragado puede ser utilizado en los siguientes tipos de rellenos: para formar espacios portuarios, construcción de cajones de cimentación, protección de obras marítimas, elaboración de zanjas para cubrir tuberías, formación de islas y playas artificiales, construcción de diques y aeropuertos, reposición de arena en playas erosionadas, recuperación de zonas bajas inundables, construcción de bases de carreteras, etc.

5. **Reciclar.** Se reciclan los materiales para mejoras ambientales, esto consiste en excavar y separar sustancias indeseables en lugares contaminados por la industria o la urbanización, tales como: lagos, ríos, embalses, puertos, zonas portuarias, etcétera. Su utilización en la minería es adecuada ya que permite procesar y depositar materiales que portan diversos minerales nocivos al ambiente y depositarlos en lugares seguros, la construcción de recintos contención es una opción muy viable (*confined disposal Facility*). Otro uso ambiental del dragado ha estado en las iniciativas destinadas a eliminar los sedimentos contaminados, esta acción contribuye a mejorar la calidad del agua y la restauración de los ecosistemas acuáticos, conocido como “rehabilitación o limpieza”. El material removido puede ser tratado y utilizado después o desechado bajo estrictos controles ambientales que garanticen un adecuado aislamiento; ésta es una alternativa viable para la eliminación in situ, es decir, confinar el material de dragado.

Para poder realizar las obras de dragado es necesario recabar información de campo que permita conocer las condiciones del sitio y poder determinar el tipo de equipo a utilizar. Entre la información requerida, para una adecuada planeación programación y ejecución de obra de dragado sobresalen las siguientes:

1. Levantamientos batimétricos.
2. Datos hidrodinámicos.
3. Investigaciones geológicas y geotécnicas.
4. Transporte de sedimentos.
5. Datos meteorológicos.
6. Limitaciones ambientales.

Además del trabajo de campo, es necesario elaborar planos y documentos técnicos. El tipo de material determina el diseño y/o la planificación de las operaciones de dragado.

2.3 Materiales de dragado recurso productivo

Desde el punto de vista de la dragabilidad, los materiales se pueden clasificar en rocas, suelos granulares, suelos plásticos, y materiales orgánicos. Los materiales producto del dragado pueden ser utilizados en obras de construcción, rellenos de playas, etc., puesto que predomina su extracción en lugares limpios, haciéndolos un producto útil en muchos casos similar al suelo de un jardín en el que se cultivan verduras. Es posible aprovechar los materiales extraídos en algún uso productivo, siempre y cuando las características físicas y químicas del material lo permitan; su aprovechamiento en obras marítimas, vendrán condicionados por la granulometría del material extraído, abarcando un amplio espectro que va desde rocas y gravas hasta arenas, limos y arcillas.

En los lugares industrializados la calidad de los materiales es afectada por los contaminantes industriales. En medida de lo posible y conforme a la legislación aplicable, los desarrolladores de proyectos pueden utilizar los materiales libres de contaminantes de una manera eficaz y económica. El material granular puede ser un excelente relleno para la recuperación de tierras, si es cohesionada puede ser utilizada para la jardinería o la mejora de las tierras agrícolas.

Su reubicación y reutilización debe ser considerada cuidadosamente desde un punto de vista ingenieril y ambiental, entre los usos comentados se tiene los siguientes:

- Creación de zonas húmedas o mejoras de las mismas mediante compartimentación de zonas intermareales o de aguas someras.
- Mejoras de terrenos, tales como la nivelación por relleno, mejora del sustrato para el desarrollo vegetal, entarquinamiento, etc.
- Provisión de áridos para la construcción en general.
- Protección y desarrollo de hábitats para la vida salvaje.

2.4 Clasificación de las obras de dragado

Como se mencionó, las obras de dragado están especialmente relacionadas con la construcción o mantenimiento portuario y regeneración de playas, es pertinente conocer la forma en que éste se clasifica de acuerdo a su objetivo, emplazamiento y características de los terrenos a dragar.

2.4.1 Según el emplazamiento

Las condiciones en que se desarrollan las obras de dragado son también muy distintas en función del emplazamiento de la obra respecto a la línea de costa. Pudiendo realizarse en mar abierto, en zona costera o en aguas abrigadas, ya sea en el interior de un puerto, un río o un lago, las condiciones cambian conforme a la proximidad de estructuras, ya que puedan entorpecer la operatividad de los equipos; así como la necesidad de mantener el tráfico marítimo.

2.4.2 Según las características del terreno

Los terrenos a dragar pueden ser de naturaleza muy diversa; desde rocas duras hasta fangos, por lo que el comportamiento frente a la excavación, el transporte y al vertido es diferente en cada caso. La naturaleza del material a dragar condiciona en gran medida la draga y la técnica de dragado utilizada.

2.4.3 Según el tipo de dragado

El dragado de construcción se realiza cuando es necesario crear o aumentar las profundidades y dimensiones en planta o ambos. Es conveniente emplear el material extraído para relleno si éste es apropiado para dicho fin.

El dragado de conservación o mantenimiento se efectúa con la finalidad de retirar los azolves que fueron originados por las corrientes, marejadas, acarreo litorales, etc. Éste puede ser periódico o

permanente, el cual debe efectuarse para conservar las tres dimensiones del proyecto, particularmente la profundidad. Este tipo de dragado se requiere principalmente en los canales de navegación, dársenas, barras de ríos y puertos en los que frecuentemente los depósitos de sedimentos son permanentes y de mucha consideración.

2.5 Problemas en el dragado

La naturaleza de los problemas involucrados con las técnicas de dragados en gran parte dependen del tipo de trabajo a realizar y podrían ser clasificados de la siguiente manera (Donkers, 1973):

| TRABAJO | PROBLEMA |
|--|---|
| Dragados en tierra, como en cielo abierto, utilizados en la industria minera y en la extracción de carbón, zonas pantanosas, etc. | Diseño de las instalaciones adecuadas para el trabajo en tierra. |
| Transporte del equipo al sitio de dragado | Dragas portátiles. |
| Creación de islas artificiales. | Diseño del dragado y equipo de transporte para manejar cantidades muy grandes en corto tiempo. |
| Eliminación de sedimentos contaminados como parte de la rehabilitación. | Diseño de dragas especiales para: a) minimizar la suspensión de los sedimentos y, b) minimizar el contenido de agua del material dragado. |
| Dragado en el canal de navegación, en mar abierto bajo varias condiciones como; oleaje, marea, corriente, viento, etc., y una profundidad del orden de 30 a 45 m | Elección adecuada del equipo de trabajo bajo estas condiciones. |
| Dragado de rehabilitación de playas erosionadas cerca de la línea de costa, utilizando arena existente en los alrededores. | Elección del equipo adecuado para trabajar en la zona de rompiente y transporte. |

Tabla 2-1, principales problemas y soluciones en el dragado.

| TRABAJO | PROBLEMA |
|--|---|
| <p>Dragado para la recuperación de minerales encontrados en el lecho marino cerca y/o lejos de la línea de costa.</p> | <p>Elección del equipo para aguas profundas. Las operaciones de dragado deben ser complementadas por un continuo proceso de retención de materiales valiosos como el oro, estaño, diamantes, etc., sin tomar en cuenta materiales diferentes.</p> |
| <p>Limpeza de la contaminación ocasionada como resultado del dragado de materiales contaminados, eliminación y dispersión de los mismos.</p> | <p>Elección del equipo de dragado adecuado que cumpla con las limitaciones ambientales para minimizar los niveles de contaminación.</p> |

Tabla 2-2, Principales problemas y soluciones en el dragado.

2.6 Frecuencia de las operaciones de dragado

En los proyectos de dragado de mantenimiento la frecuencia de dragado puede ser establecida mediante sondeos periódicos que ayudan a determinar la tasa de sedimentación. Es preferible realizar dragados a profundidades superiores a la mínima requerida con el fin de permitir que la colmatación de sedimentos dure un período más largo, reduciendo la frecuencia de las operaciones de dragado y la necesidad de la movilización de equipos, lo cual incurre en una actividad costosa; sin embargo, puede implementarse la utilización de procedimientos poco prácticos, tales como trampas de sedimentos estratégicamente ubicadas en áreas que sean fácilmente accesibles para el dragado, según el equipo elegido. Esto puede ser útil especialmente en la reducción del riesgo de los bancos de arena que se forman.

2.7 Tipos de materiales que pueden ser dragos

Los materiales a dragar varían considerablemente de un proyecto a otro e incluso dentro de los confines del mismo, se presentan generalmente en forma estratificada como consecuencia de las sedimentaciones originadas por procesos hidráulicos. Las propiedades varían en función del origen y el método de dragado. Si los estratos son lo suficientemente gruesos, el tratamiento de dragado puede ser gestionado separadamente según el material que lo constituya.

Los principales materiales extraídos en el proceso de dragado son los siguientes:

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| Arcillas. | Turba y suelos orgánicos. |
| Arenas. | Gravas. |
| Adoquines. | Rocas. |
| Suelos cementados y corales. | |

Los sedimentos en la fracción de las arcillas y limos tienen un comportamiento cohesivo, lo que implica la adherencia de las partículas unas con otras para formar partículas de mayor tamaño (floculación), los contaminantes son preferentemente absorbidos por las partículas de tamaños menores del sedimento, las que de esta manera proveen un importante mecanismo para su transporte, siendo de relevancia desde el punto de vista ambiental.

Es importante tener en cuenta que el suministro de arena puede ser reducido o puede aumentar a través de los cambios naturales. Si bien se debe buscar que los procesos naturales permitan mitigar el incremento de aporte litoral. Un ejemplo de esto es cómo la costa se retira, y expone a las arenas, lo que puede provocar erosión

2.8 Desarrollo sostenible

Quizá el mayor desafío al desarrollar un proyecto, es la necesidad de considerarlo en el contexto del medio ambiente (Ilustración 2-1), todos los dragados causan cambios ambientales, percibiéndose como buenos, malos o indiferentes, esto depende del punto de vista del observador o los afectados por el dragado. Es necesario comprender y abordar las preocupaciones desde el inicio del proyecto, considerar las consecuencias en el medio ambiente con el fin de ser explicados, comprendidos y mitigados, si es necesario se debe tomar en cuenta los conceptos de protección ambiental además de considerar los costos e incorporarlos al inicio del proceso.

Actualmente se busca tener un entorno que esté en armonía con la naturaleza, esto se refleja en las instituciones de crédito, pues requieren de evaluaciones ambientales antes de considerar favorable la solicitud de fondos para un desarrollo. Estas instituciones financieras han desarrollado algunas guías que permiten financiar los estudios ambientales iniciales.

En el desarrollo de un proyecto se debe considerar utilizar un sistema de gestión integral en su ciclo de vida y en la estructuración del mismo, se debe involucrar todas las partes desde el principio; planificación, diseño, costo, construcción, dragado, científicos, ambientalistas, economistas, planificadores financieros y especialistas en transporte quienes juegan un papel importante en el desarrollo. El proceso integrado o de colaboración de gestión de proyectos asegura que las partes estén involucradas en todas las actividades y no sólo en fases especiales.

El proyecto se debe de desarrollar a través de diferentes disciplinas, pero sin duda, cada método y fase afecta muy de cerca a los demás, sólo mediante de la integración de las diversas ciencias se pueden evitar descuidos y errores costosos. Organismos de obras públicas incluso con experiencia, tales como el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, y el Ministerio de Transporte y Vías Navegables en los Países Bajos, han sido responsables de la proyección y desarrollos de puertos desde hace más de un siglo, éstos han llegado a la conclusión de que sus esfuerzos podrían ser más eficaces si se implementa un enfoque integrado y de colaboración.

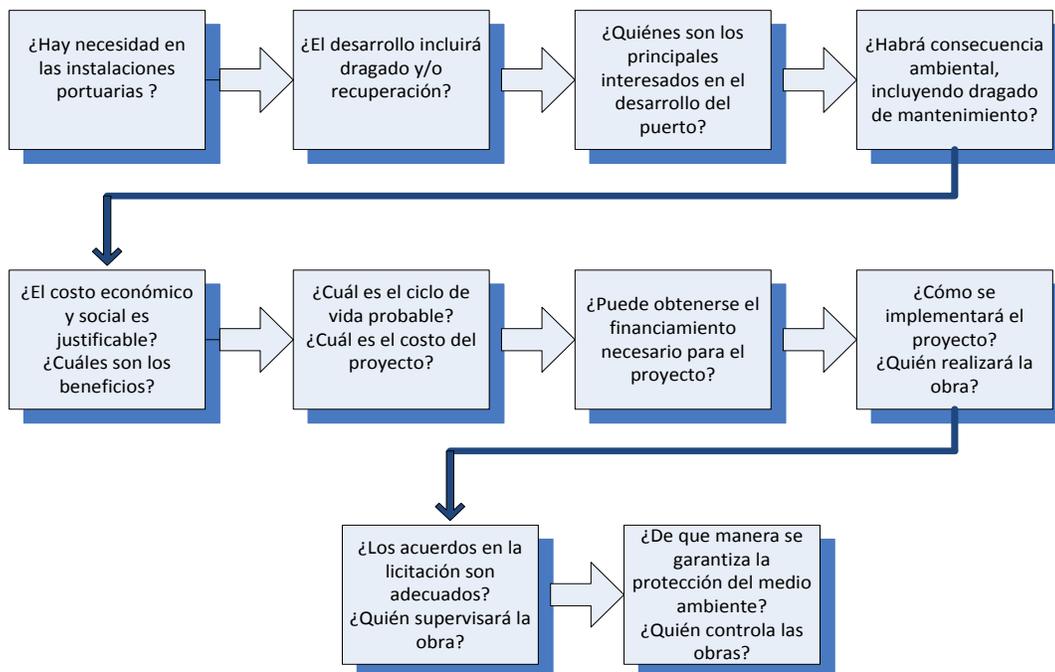


Ilustración 2-1, Proceso de desarrollo (Melorose et al., 2015).

Hay diversos métodos implementados en el desarrollo de un proyecto portuario para los efectos de este trabajo sólo se enunciarán de manera básica:

- Planificación preliminar y presupuesto de diseño.
- Consideración de temas importantes (dependencia, equipos, problemas iniciales, condiciones de sitio).
- Las ofertas y orden (contrato, costos, supervisión).
- Diseño detallado.
- Construcción y supervisión.
- Operación y mantenimiento.

2.9 Disposición de los materiales de dragado

El último paso en el proceso del dragado es reubicar o depositar el material en un lugar apartado de su extracción, a continuación se enlistan una serie de opciones para los materiales no contaminados:

- Mar abierto.
- Rellenos de áreas bajas en el mismo sistema.
- Rellenos hidráulicos en tierra.

La elección empleada dependerá de una serie de factores:

- Acceso al sitio de trabajo.
- Tipos de draga y sistemas de transporte.
- Considerar si el material contiene contaminantes.
- Costos.
- Factores ambientales.

En la (Ilustración 2-2) se indica el diagrama de flujo que ayuda en la elección del sitio de vertido (Melorose, Perroy, y Careas, 2015)

Siempre es conveniente obtener un beneficio del material de dragado. Como ejemplo pueden ser; la construcción de plataformas para uso urbano o industrial, utilizarlo como agregado, emplearlo en la creación de hábitat para la fauna, construcción de obras de protección costera, regeneración de playas, relleno en obras mineras abandonadas y canteras, generación de áreas verdes. Cuando el material se manipula con fines aprovechables generalmente hay un costo-beneficio que reduce los costos reales del dragado.

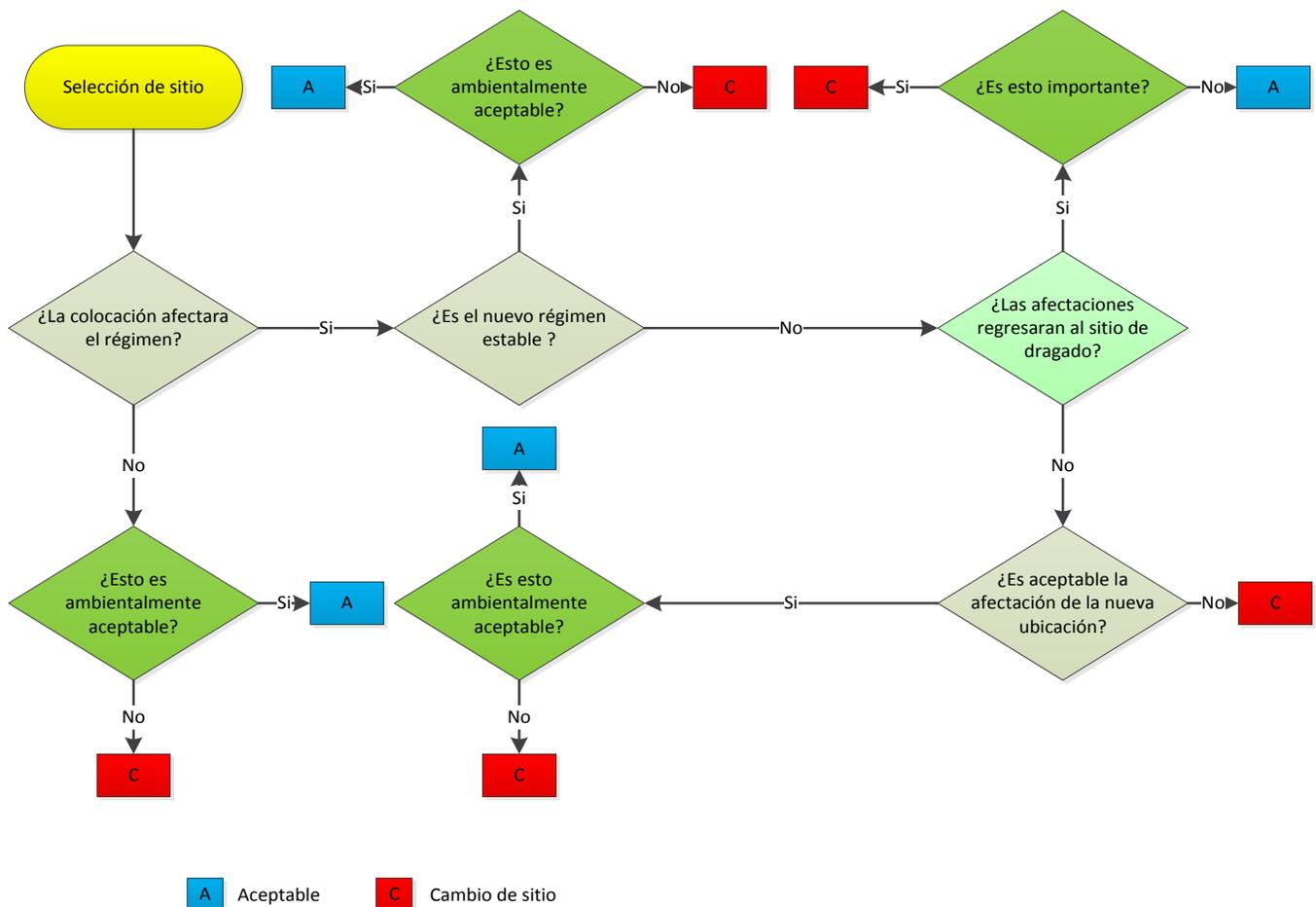


Ilustración 2-2, diagrama de flujo para la elección del sitio de vertido (Melorose et al., 2015)

Si no es posible utilizar el material dragado, ya sea por su naturaleza, volumen o contaminación; entonces se deberá buscar minimizar el impacto ambiental, para lo cual se analizará el tratamiento más efectivo y los lugares más convenientes.

CAPITULO 3

Planteamiento del problema y objetivos



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

03

CAPÍTULO TERCERO

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los avances tecnológicos y la necesidad de mejorar la rentabilidad del comercio naval han dado lugar al mejoramiento de los buques, cada vez más grandes y eficientes; esto conlleva a profundizar ríos y canales de navegación con el fin de proporcionar accesos adecuados a los puertos. Lo que hace necesario que los puertos recurran a obras de dragados. La paradoja a este respecto radica en que, un canal o área que se draga se convierte por definición en una trampa de sedimento y esto eventualmente disminuye dramáticamente la vida útil de los dragados, máxime cuando la planeación y/u operación de los mismos no es la deseable. El principal problema de acumulación de sedimentos en los puertos se presenta en sus accesos, ya que la colmatación de sedimento de los canales puede obligar a parar la operación del mismo. Por otro lado, los grandes inconvenientes potenciales del dragado son:

- Debido a la poca circulación, y al mal manejo de sustancias, por citar dos orígenes; normalmente los sedimentos que se acumulan en el fondo de los recintos portuarios están altamente contaminados y su movilización es muy compleja
- El costo de esta actividad es muy alto porque normalmente implica el desplazamiento de grandes equipos
- Afectación a zonas costeras que están en las inmediaciones de donde se realiza esta actividad

Además, la falta de monitoreo asociado a la extracción de sedimentos, y al gran interés de empresarios y autoridades ha generado una inadecuada y/o ausencia de legislación en el tema de impacto ambiental ocasionado por el dragado y el vertido de materiales (Roos, *et. alt.*, 2008).

Aunado a esto, en la República Mexicana existe carencia de información del clima marítimo en zonas costeras, muchas obras en la costa carecen de un diseño adecuado que considere las condiciones de la zona y son dañadas frecuentemente.

Estos problemas ocasionan la necesidad de obtener información y predecir el comportamiento morfológico después de un dragado. La respuesta oportuna puede mejorar la evaluación de las características del impacto que éste causará, así como predecir el destino final de los sedimentos transportados.

3.2 HIPÓTESIS

La predicción oportuna del destino de los sedimentos permitirá planificar adecuadamente los trabajos de dragado. Estas predicciones se pueden utilizar para ubicar el lugar final donde serán depositados los materiales, en especial los que están contaminados.

Con esta información se pueden implementar técnicas para reducir la tasa de transporte de sedimentos, y reducir sustancialmente los costos de mantenimiento portuario a largo plazo. Los beneficios también pueden usarse de una forma consciente y amigable en la alimentación de playas y creación de hábitat.

3.3 Objetivos

3.3.1 Objetivo general

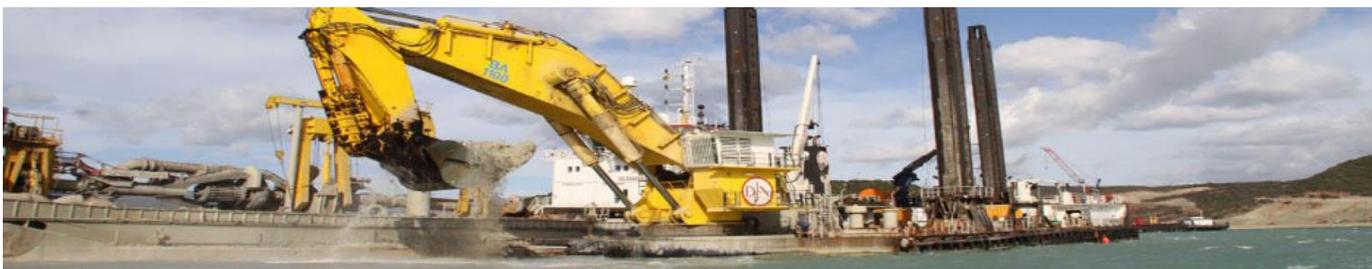
Evaluar como el transporte de sedimentos afecta la vida útil de un puerto y determinar una metodología que permita conocer las condiciones útiles del canal de navegación. Esto implica el desarrollo e implementación de herramientas que ayuden a pronosticar la evolución espacial y temporal de la morfología portuaria.

3.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar mediante revisión bibliográfica, los elementos que influyen en el detrimento de los accesos portuarios.
2. Elaborar temas sobre los principales equipos de dragado, el manejo que se debe de dar a los materiales contaminados, las técnicas más empleadas en esta área.
3. Buscar herramientas actuales y mecanismos empleados para solventar los problemas de asolvamiento en puertos.
4. Analizar como las condiciones climatológicas y eventos extrémas influyen en el transporte de sedimentos.
5. Codificar en lenguaje *FROTRAN*, un módulo que pronostique las condiciones del clima y del oleaje extremo a partir de un histórico de condiciones climatológicas.
6. Desarrollar un modelo numérico de transporte de sedimentos en canales de navegación para la optimización del dragado en puertos.

CAPÍTULO 4

Métodos y Procedimientos de Dragado



MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS DE DRAGADO

04

CAPÍTULO CUARTO

4 Métodos y procedimientos de dragado

Hablar del empleo de los diferentes equipos de dragado es referirse a una actividad artesanal que pasó de una generación a otra; pero debido a la continua búsqueda de eficiencia e innovación se transformó en una ciencia y tecnología como consecuencia del progreso industrial del siglo XIX.

El trabajo realizado por los equipos de dragado han dejado huella en la historia de los cinco continentes, son numerosos los lugares que emplearon estos equipos en áreas comunes como ríos, playas y mares. Ello ha contribuido en la infraestructura portuaria del mundo, y a la mejora de la calidad de vida de las personas.

Actualmente los equipos de dragado se basan en tres grandes logros técnicos obtenidos en el siglo XIX:

- El accionamiento mecánico con la aparición del motor a vapor, sustituido por el motor diésel.
- La aparición de la bomba centrífuga.
- La cabeza de corte giratorio.

Estos elementos se actualizaron y se hicieron nuevos diseños, a los cuales se les añadieron sistemas que permiten monitorear y cuidar el ambiente, así como la integración de equipos electrónicos, se implementaron sistemas informáticos, proyección de imágenes, posicionamiento y comunicación, además de hacer mejoras en el diseño

naval; adicionalmente se adecuaron sistemas de educación formal a la tripulación, lo que permite mantener un control de calidad y gestión de seguridad; todo esto ha convertido al negocio del dragado en una industria de alta tecnología.

Los cambios efectuados en los navíos permiten realizar proyectos audaces y atrevidos, éstos le otorgan la capacidad de cortar roca sólida, succionar, cargar, extraer, transportar, y expulsar materiales por proa. Las mejoras realizadas a los equipos de dragado, permiten alcanzar distancias considerables y realizar trabajos de limpieza en materiales contaminados en puertos y ríos.

Los equipos de dragado tienen la capacidad de transformar el mar en lugares habitables, y extender aguas navegables tierra adentro. Se podría afirmar que el dragado es sin duda uno de los instrumentos más poderosos para el beneficio de la humanidad, el cual ha permitido el desarrollo social, económico, y la restauración del medio ambiente.

La industria del dragado emplea equipos muy variados en cuanto a tamaño y métodos de operación; siendo usual clasificarlos en relación a su método de excavación: dragas mecánicas, hidráulicas, combinadas, hidrodinámicas y especiales. Por lo tanto, se darán a conocer los principales equipos y las diferentes formas de operación.

4.1 Procesos básicos en el dragado

Antes de examinar los diferentes tipos de dragas es útil conocer los mecanismos físicos involucrados en este proceso, los cuales pueden ser clasificados como tratamiento previo, extracción, transporte y eliminación.

1. **Tratamiento previo;** en determinadas ocasiones el material a extraer tiene una dureza superior a la que el equipo puede romper; por lo cual es necesario efectuar un quebrantamiento previo del material con un medio independiente a la

máquina que lo extraerá. Se emplean los medios mecánicos, químicos; como el uso de explosivos (Ilustración 4-1 e Ilustración 4-8).

2. **La extracción;** el material se extrae desde el fondo hasta la superficie por medio de la draga. Este proceso comprende las operaciones de arranque del material (de forma mecánica, hidráulica o una combinación de ambas), hasta su elevación al elemento de transporte.
3. **El transporte del material;** el producto del dragado se transporta a la zona de descarga por medio de la misma draga o con la ayuda de otras embarcaciones, los gánguiles (Ilustración 4-5) reciben el material y lo llevan al área de vertido, también se suelen emplearse tuberías para su transporte (Ilustración 4-3).
4. **La descarga del material transportado al lugar asignado,** éste puede ser descargado en el mar o en tierra firme. Se realiza por apertura del fondo de la cántara de una draga o de un gánguil (Ilustración 4-5). También mediante el empleo de almejas o cucharas que vacían el material y lo colocan en el área de vertido (Ilustración 4-6), finalmente por tuberías; utilizando bombas.

4.1.1 Tratamiento previo con explosivos

En los trabajos donde la estratigrafía está formada por gruesas capas de roca o afloramientos rocosos aislados, es necesario el uso de explosivos, ya que éstos son un método eficiente de fracturación de rocas, lo cual ayuda a la excavación del material. A la utilización de explosivos bajo el agua se le denomina voladuras submarinas, pudiendo ser de baja o alta potencia. Los métodos más comunes para la colocación de los dispositivos son tres: La primera consiste en colocar cartuchos en pozos verticales o barrenos, se efectúa al realizar una serie de agujeros espaciados en el fondo del mar, cargados de explosivos y disparos; a este procedimiento se le denomina carga confinada (Ilustración 4-1).



Ilustración 4-1, explosivos utilizando cargas huecas (derecha). (EXSA, 2009; Grimaldos).

La instalación de los explosivos se puede realizar en grupos convenientes y se realiza desde un pontón flotante o *Jack-up*, donde se montan los equipos de perforación y se realiza la colocación de los explosivos (Ilustración 4-2), también se puede realizar bajo el agua de manera manual con buzos.



Ilustración 4-2, Pontones (Jack-up), empleados en las obras de dragado (© 2017 BBC, Martrade, 2012).

La segunda forma es la detonación de cartuchos superficiales, estas cargas se apoyan sobre la superficie de los materiales a fracturar. Son eficaces en rocas fragmentadas, rocas débilmente sedimentadas y de fácil deformación, y en capas finas de roca o suelos cementados.

La tercera forma es la de placas o cargas huecas (Ilustración 4-1). Son explosivos especialmente preparados, las cargas utilizan el efecto Munroe que se centra en direccionar la onda de choque explosiva en puntos de interés.



*Ilustración 4-3, Transporte y descarga por tuberías.
(Marine Service Mediterranean, 1993).*



*Ilustración 4-4, Descarga por bombas, ©2007-
2017 The Construction Index.*

La utilización de cargas submarinas se encuentra fuertemente reglamentada y normada, su planeación e implementación requiere un diseño particularizado y detallado de la cantidad de cargas y tipos de explosivos. Se debe determinar la profundidad de perforación para colocar los explosivos, se considera la separación entre las cargas, los esquemas de distribución, se programa el tiempo de retardo, el tipo de fragmento deseado. Para lograr un trabajo correcto se requiere de una técnica especializada para cada condición de trabajo y tipo de roca. Se recomienda la lectura de ((EXSA), 1989; López Jimeno, 2006).

Debido a sus características y condiciones de trabajo los explosivos se ven sometidos a restricciones ambientales, y existe una percepción negativa en su uso. Los efectos ambientales son significativos en consecuencia del alcance de la onda de choque hidráulico, lo cual causa la pérdida indiscriminada de la vida marina e incremento del costo del dragado.



Ilustración 4-5, Gánguil de casco partido, descarga por gravedad. (Clara Lahiguera, 2015)



Ilustración 4-6, Descarga del gánguil con pala o dipper con retroexcavadora © Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz, 2008

4.1.2 Tratamiento previo con medios mecánicos o percusión

La implementación de medios mecánicos se aplica en los casos donde el uso de explosivos puede ser indeseable o ineficiente (Bray, Bates, y Land, 1997). Este tratamiento de fracturación es menos empleado que los explosivos. El procedimiento es similar al empleado en voladuras submarinas, consiste en el uso de percusores mecánico o hidráulicos del tipo pilones rompe rocas (Ilustración 4-7), martillos picadores y cabezales fresadores (Ilustración 4-10). Los equipos son montados en pontones o *Jack-up* y cuando es necesario realizar los trabajos bajo el agua de manera manual se emplean buzos. (Ilustración 4-2), la mayor parte de las excavaciones mecánicas se realizan con picas de fricción (*Chisel, Moil, Blunt points*) que consiste en un inserto metálico dentro de una matriz de acero de alta dureza y tenacidad.

En la fragmentación de rocas también se han implementado otras técnicas que tienen ventajas económicas y medioambientales; el minado continuo o excavación rápida, como el sistema de minado hidráulico, (*Jet Water Cutter*) y/o la utilización de taladro (minado por taladros), (Ortiz Sánchez y Giraldo Paredes, 2009). Un sistema innovador es el uso de microondas, éstas crean puntos de alta temperatura dentro de la roca, lo cual genera su fractura (Darling, 1992).

4.1.2.1 Percusores mecánico o hidráulicos

4.1.2.1.1 Pílon rompe roca

Es una pieza metálica de peso elevado en forma de aguja que se deja caer desde cierta altura de forma repetitiva. Va montada en una grúa sobre un pontón. El método es muy tradicional y está en desuso por su escaso rendimiento.



Ilustración 4-7, pílón instalado en grúa (Marine, 2015).

4.1.2.1.2 Martillo hidráulico

Los principios básicos de la actuación de un martillo hidráulico y la correspondiente herramienta residen en transformar la potencia hidráulica de la maquina en energía mecánica.

La retroexcavadora o la grúa descendente se habilitan con el martillo hidráulico o neumático, y por medio del pontón es trasladado al sitio de trabajo. El rendimiento que da esta herramienta es bajo y es empleado sólo en casos específicos. El método práctico varía según el fabricante (Hammers, 2007; NPK, 2012; RX, 2010).



Ilustración 4-8, "A, B, C, D" Martillos hidráulicos en operación, "E" diferentes tipos de picas, (Maquinaria, 2013).

4.1.2.1.3 Cabezal fresador

La fresadora giratoria consta de un tambor doble, ubicada en un eje transversal con dientes de carburo, conducido por un engranaje o bien directamente impulsado por un motor hidráulico de gran par completamente integrado, esta herramienta está controlada por el circuito hidráulico auxiliar de la excavadora (Ilustración 4-10). La fresadora sirve para retirar materiales de forma precisa, sin dañar estructuras adyacentes, también se utiliza en la demolición de muros y otras estructuras, en la excavación de zanjas en terreno duro, rocoso y para preparar superficies de asfalto o cemento para su reparación.



Ilustración 4-9, "A" Tambor estándar, "B" Tambor para perfilado de paredes, "C" Tambor para materiales blandos (© Aplec España, 2001).



Ilustración 4-10, fresadoras de rocas (CMM, 2015).

4.1.3 Extracción del material dragado

El proceso de extracción se realiza con equipos especializados denominados dragas, este trabajo consiste en remover los materiales en el orden inverso en el que se han formado, y elevarlos desde el fondo hasta los equipos de transporte, ya sea por medios mecánicos, hidráulicos o una combinación de ambos. El dragado se puede considerar una actividad destructiva, es decir, remueve y destruye la posición original de los depósitos, este proceso despoja al material de su lugar de origen.

4.1.3.1 Remoción del material

La remoción del material puede realizarse de tres maneras: **La primera es por medios mecánicos:** se utilizan cucharones, cangilones, cucharas o pala de empuje. Estos equipos separan una porción del material mediante la fuerza que aplica el brazo de arranque, el cual es contenido y elevado a través de cazos o cangilones, estos elementos cuentan con dientes o cuchillas dispuestas en el borde de corte, (Martínez Barrón y Salamanca Mora, 2008), la eficacia de las operaciones depende de la fuerza y velocidad aplicada en el brazo y el cucharón de ataque, así como la configuración del borde de corte que sirve para penetrar el suelo (Bray *et al.*, 1997). Los equipos más comunes son: la pala frontal (draga de cucharón), retroexcavadora, draga de rosario (cadena o cangilones), draga de agarre. Las menos comunes son la de arrastre.

Medios hidráulicos, estos equipos utilizan la fuerza de succión generada por una bomba centrífuga instalada en el casco del buque o por bombas submarinas instaladas en el cabezal de dragado, como: bombas centrífugas, bombas de chorro (Jets), inyección de aire (*Air lift*), bombas submarinas (*Seabed pump*). La tercera forma es la combinación de los métodos anteriores, mecánicos e hidráulicos.

4.1.4 Transporte de los materiales extraídos

El material es transportado desde el sitio de excavación, hasta el sitio de vertido. Esto puede hacerse por diversos medios como: en las tolvas de las dragas autopropulsadas, embarcaciones remolcadas, gánguiles de carga, barcazas, bombeado a través de tuberías como mezcla de agua y sedimento (*Slurry*), utilizando las fuerzas naturales como las olas y las corrientes; rara vez se emplean camiones y cinta transportadora. El medio de transporte está generalmente relacionado con el método de dragado; El empleo de barcazas es relacionado con las excavaciones mecánicas, mientras que el uso de tubería está vinculado con las extracciones hidráulicas.



Ilustración 4-11, Estaciones de rebombeo (© H2O Control Ingeniería, 2010; Gözüyılmaz, 2013).

La disposición del material dragado se puede efectuar en tierra y en zonas de aguas de mayor profundidad, en los casos que se requiere incrementar la distancia de transporte, pero la fuerza de la bomba de descarga no es suficiente, se utilizan estaciones de rebombeo o reimpulso (*Booster stations*) (Ilustración 4-11) para llevar el material al sitio de

depósito; la tubería puede ubicarse ya sea en el fondo o en la superficie mediante flotadores, cuando son instalados en el fondo se evita interferir con el tráfico del puerto.

Algunas compañías de dragado a menudo tratan de evitar el uso de estaciones de rebombeo por las dificultades de su instalación y transporte a lugares remotos. (Benites Domínguez, 2008)

4.1.5 Descarga del material dragado

La elección del sitio para la eliminación del material de dragado ha ido tomando fuerza conforme avanza la tecnología y las restricciones ambientales, en el pasado se le restaba importancia a este tema, y el interés se centraba en el proceso de excavación, sólo en casos muy específicos como la regeneración de playas, el sitio de vertido se convertía en la parte medular de la obra.

Los materiales eran depositados con frecuencia en las riberas de los ríos y gran parte de los actuales asentamientos costeros fueron vertederos, también se solía verter los sedimentos en el mar sin restricciones aparentes, únicamente se pedía que el sitio estuviera cercano a la costa y las corrientes no regresaran el material a la zona de dragado.

Las cuestiones medioambientales han llevado a realizar cambios en la forma que se manejan los materiales de dragado (Acuerdo de Londres, 1975). Los acuerdos internacionales los clasificaron en tres categorías: materiales limpios, ligeramente contaminados, y contaminados. La última de éstas se divide en dos subcategorías (aislamiento suave y aislamiento duro). Esto significa que no todos los materiales pueden ser vertidos libremente en el mar.

En la actualidad, el material dragado puede ser descargado en agua o en tierra firme, en áreas confinadas o sin confinamiento.

Las dragas con tolvas que transportan la mezcla de agua y sólidos al sitio de descarga, vierten el material por medio de la apertura de las puertas que se ubican en la parte inferior del casco de la nave, el contenido se vacía en cuestión de minutos, tras la liberación, el material cae a través de la columna de agua como un chorro bien definido de un fluido de alta densidad que puede contener bloques de material sólido, algunas partículas de sedimento son transportadas lejos del sitio de vertido hasta que la turbulencia se reduce lo suficiente para permitir su sedimentación (Ilustración 4-12).

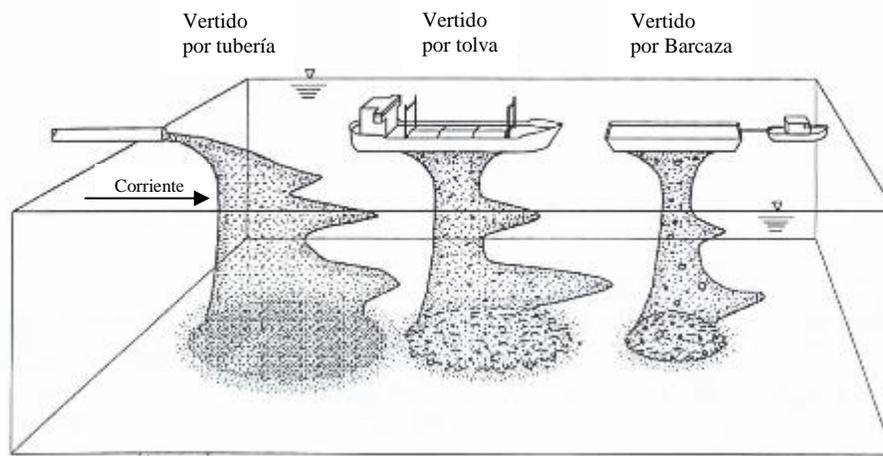


Ilustración 4-12, vertido del material (EPA, 2004)

Las barcasas tienen la ventaja de volver el dragado continuo, utilizando varios equipos para el transporte del material al sitio de vertido.

La descarga en tierra puede realizarse en áreas confinadas (*Confined Disposal Facility, CDF*), la cual es una de las técnicas más utilizadas para la gestión de los sedimentos contaminados, es el método más seguro a la hora de minimizar los impactos ambientales.

En cambio, la descarga del material en agua es siempre la opción más económica, pero con mayores restricciones ambientales. Es por ello que se utilizan áreas confinadas sumergidas (Bray et al., 1997).

El lugar de descarga es uno de los elementos que más influyen en el costo de dragado, ya que la selección del sitio define la distancia y el método de transporte, lo que puede ayudar a determinar el tipo de draga.

4.1.5.1 Impactos ambientales del dragado.

Las limitaciones ambientales están dadas por las condiciones de los materiales a dragar y por las características del medio acuático, hay una tendencia mundial muy fuerte a extremar precauciones para no producir impactos ambientales desfavorables. En algunos países se le ha dado mayor importancia a este tema que en otros, estos tratan de cumplir con la convención sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimientos de desechos y otras materias "Convenio de Londres". Los problemas que se presentan en este rubro son la obstrucción de la luz a los organismos que viven en el fondo y la toxicidad de los sedimentos que se asientan. La turbidez en la columna de agua depende de la velocidad de caída de las partículas de sedimento, que es una fuerte función del tamaño de grano, pero también influye de la velocidad de la corriente, que puede transportar el material lejos del lugar, y del nivel de turbulencia en la columna de agua que puede mantener el material en suspensión.

Los sedimentos finos (limos y arcillas) requieren un mayor control en la regulación ambiental, ya que ocasionan mayor turbidez por un tiempo prolongado, lo que afecta grandes áreas del fondo marino, a diferencia de las arenas, que por lo general cuentan con mayor aceptaciones ambientales, siempre que el sitio no tenga antecedentes de sustancias químicas tóxicas. La detección de agentes químicos en el material a dragar, se realiza para determinar dónde y cómo el material se dispondrá. La selección de los agentes químicos se basa en una investigación paso a paso de un número cualquiera de los siguientes parámetros:

- Pruebas químicas del material en las inmediaciones de la propuesta de dragado.
- Características geoquímicas de los sedimentos.
- Potenciales rutas por donde los contaminantes pudieron haber sido introducidos en el sedimento.
- Probabilidad de contaminación de escorrentía agrícola y urbana.
- Derrames de contaminantes en el área a dragar.
- Descargas industriales y municipales (pasado y presente.)
- El uso previo y la fuente de los sedimentos.

El método de extracción también tiene potencialmente muchos impactos negativos, por ello se requiere una cuidadosa planificación antes de movilizar los equipos.

- Una draga de corte y succión extrae el material de una manera muy rápida cuando la consolidación es frágil tal es el caso del coral, piedra caliza y las arcillas; pero el inconveniente es que se crea una nube de polvo (limo fino) que bloquea la luz del sol y las branquias de ciertas especies de bivalvos y peces acumulan polvo fino que les puede ocasionar la muerte por asfixia.
- La utilización de voladuras es un método rápido para la eliminación de obstáculos, pero también mata la vida marina de manera indiscriminada en las proximidades del proyecto.
- Las dragas de almeja no son recomendables en un entorno sensible (presencia de coral en agua clara), ya que presenta fuga de sedimento, ocasionando dispersión en la columna de agua.

Los impactos físicos y químicos provocados por los sedimentos también deben ser investigados. Como se ha mencionado, si el material es limpio se debe utilizar para la recuperación, cuando los materiales son arcillas o limos, éstos no son aptos en la

recuperación de playas, lo habitual es disponerlos en alta mar con una barcaza o en hábitats donde los materiales finos son necesarios para su buen funcionamiento, como manglares.

Respecto a Latinoamérica, se ve la tendencia a manejar con mayor cuidado el impacto ambiental que provoca el vertido de los sedimentos, pero la legislación hasta el momento es muy ambigua en el tema; por ende, es necesario conocer los procesos medioambientales con planes de gestión ambiental.

4.1.5.2 Selección de sitio de disposición

La selección del sitio de depósito del material dragado es una de las actividades críticas del proyecto, y es previa al inicio de las operaciones de dragado, esto es porque se analizan varias situaciones con respecto al sedimento que se va a dragar y del lugar de vertido.

Dependiendo de las condiciones del sedimento; si está contaminado o no, estos materiales pueden contener restos de metales pesados; es decir, residuos de combustibles o aceites; grandes cantidades de sedimentos contaminados son removidos en estuarios y puertos por las actuaciones del dragado.

Las condiciones ambientales son una de las principales características para la elección del sitio y el método de eliminación, antes de la elección del sitio se debe clasificar el material en función a sus características físicas, composición mineralógica y el grado de contaminación conforme a las normas nacionales e internacionales, por lo cual, desde el punto de vista ambiental se clasifican en tres clases (Darling, 1992):

Clase 1. Material limpio (concentraciones inferiores al nivel 1): Sus efectos químicos y/o bioquímicos sobre la flora y la fauna marina son nulos o prácticamente insignificantes.

Clase 2. Ligeramente contaminado (concentraciones superiores al nivel 1 e inferiores al 2): Permitida su disposición en ciertas aguas abiertas de forma controlada, el vertido se realiza dentro de pozos o depresiones en el fondo marino.

Clase 3. Materiales contaminados (concentraciones superiores al nivel 2): No son adecuados para su eliminación en aguas abiertas, estos materiales son colocados en sitios de eliminación controlada y de estrictos cuidados (islas artificiales) o sitios de contención tierra adentro, esta clase cuenta con dos subcategorías; la subcategoría III a, se considera de aislamiento blando (concentración superiores al nivel 2 e inferiores a ocho veces este nivel) y aislamiento duro o tratamiento para la III b (concentraciones superiores a ocho veces el nivel 1).

| Sustancia tóxica | mg/Kg | | |
|------------------|---------|---------|---------|
| | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| Mercurio | 0.35 | 0.71 | 2.84 |
| Cadmion | 1.2 | 2.4 | 9.6 |
| Plomo | 80 | 218 | 600 |
| Cobre | 70 | 168 | 675 |
| Zinc | 205 | 410 | 1640 |
| Cromo | 140 | 340 | 1000 |
| Arsénico | 35 | 70 | 280 |
| Níquel | 30 | 63 | 234 |
| PCB's | 0.05 | 0.18 | 0.54 |

Tabla 4-1, Niveles de acción de los materiales procedentes de dragado (Comisión nacional de estrategias de Marinas, 2015)

Los niveles de concentración de sustancias tóxicas que establecen estas tres categorías son los que se presentan en la Tabla 4-1. Estas concentraciones están referidas a la fracción fina del sedimento (diámetro inferior a 63 μm) y expresadas en mg/kg de materia seca.

No obstante, en el caso de dragados para cimentación de obras marítimas de volumen no superior a 20,000 metros cúbicos, se tomará como nivel de acción 1 el doble de los especificados en el cuadro anterior, manteniéndose los niveles de acción 2.

Los sedimentos son sometidos a varias pruebas para determinar su nivel de contaminación, esto exigido por las legislaciones internacionales, van desde simples pruebas de lixiviados a pruebas más complejas y controladas en laboratorios sobre los organismos marítimos seleccionados. Estas pruebas se utilizan desde 1973.

En la selección de la zona de vertido se debe de analizar las características del terreno, tanto físicas (geológicas, hidrológicas, batimétricas, condiciones hidrodinámicas, transporte de sedimentos y columna de agua, etc.), como químicas y biológicas para estimar el impacto del vertido.

Cuando en las proximidades del área de vertido existan zonas sensibles a la turbidez o donde los criterios de calidad de los sedimentos sean más estrictos, se deberá realizar un estudio de transporte y dispersión de la fracción que quede en suspensión, para lo cual será necesario disponer de información sobre:

- Otras fuentes de sólidos en suspensión.
- Estratificación estacional de la columna de agua.
- Velocidad media de las corrientes, tanto en superficie como en fondo.
- Clima marítimo (régimen de vientos y oleaje).
- Corriente de marea en estuarios.
- Corrientes de fondo y resuspensión inducidas por tormentas.

En algunos casos podrá ser conveniente la aplicación de modelos matemáticos de predicción a corto plazo (concentración de sólidos en la columna de agua y configuración inicial del material depositado sobre el fondo) o a medio plazo (aproximación del material a zonas sensibles).

4.1.5.3 Vertido o Disposición en aguas abiertas

Históricamente el vertido en aguas abiertas es la forma más tradicional, la cual consiste en verter el material dragado en una zona acuática (ríos, lagos, estuarios y océanos) alejadas del lugar de dragado. La principal ventaja es la economía, siempre y cuando la distancia al sitio de vertido no sea excesiva. La desventaja se presenta cuando el material extraído está contaminado, por lo cual esta técnica se limita a materiales limpios (clase 1 y 2) con concentraciones de contaminantes dentro de los estándares fijados, y con una alta velocidad de sedimentación, lo que puede garantizar que la turbidez generada en los sitios de depósito no provocará inconvenientes en los ecosistemas locales (Balderas Pérez, 2007).

En general, el vertido se realiza en la zona litoral (profundidades inferiores a 10 m) o entre 10 y 40 m de profundidad, y está en función de la dispersión que se puede aceptar para el material vertido. Las técnicas de tratamiento para los materiales contaminados vertidos en el mar se clasifican en aislamientos blandos y duros:

Aislamiento blando:

1. Vertido directo del material contaminado sobre el lecho marino y posterior cobertura con material limpio.
2. Excavación de una fosa, la cual se rellena con material contaminado y después es cubierta con material limpio.
3. Creación de un recinto submarino y posterior recubrimiento.

Técnica de aislamiento duro:

1. Vertido en recintos con elementos construidos para el almacenamiento de productos contaminados, cuentan con paredes impermeables y dispositivos que controlan la fuga de material (lixiviados).

2. Tratamiento previo, limpieza del material para posterior vertido en condiciones ambientalmente seguras en función del tipo de tratamiento.

El vertido del sedimento provoca cambios físicos, químicos y biológicos en el entorno de la zona de vertido. Los principales cambios físicos se manifiestan en la turbidez de la zona, la concentración de sólidos en suspensión y el radio de afectación de la sedimentación.

Vertederos en tierra

Esta técnica de aislamiento admite cualquier tipo de material incluso los de la categoría III b, si poseen un recubrimiento adecuado. El aislamiento puede ser blando o duro dependiendo del tipo de recinto, si los materiales dragados son de buena calidad se pueden usar para trasdosado de muelles o rellenos de zonas de explotación portuaria. Cuando el material es de mala calidad la consolidación será mucho más complicada, pero puede ser la única solución si el dragado se efectúa en zonas interiores.

4.1.6 Recintos de disposición

Es la construcción de un dique u otras estructuras de retención con materiales impermeables o revestidos, construidos como un lugar de tierra alta. Este tipo de estructuras se pueden construir de materiales cercanos al sitio de contención, con excepción de materiales con alto contenido de materia orgánica y arcillas de alta plasticidad; su ubicación puede ser tanto dentro como fuera de las zonas de los canales, lo que permite tanto la localización y las instalaciones (Hel, 1998).

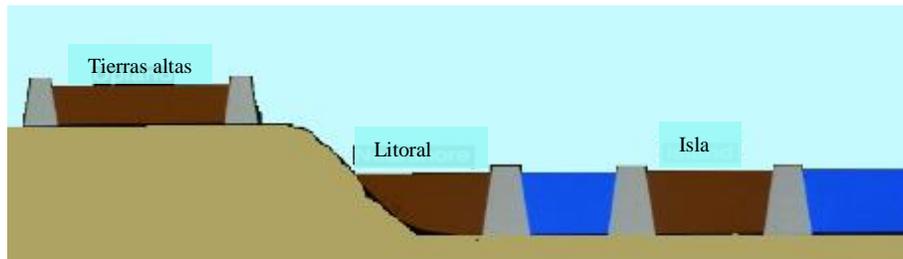


Ilustración 4-13, Configuración típica de los CDF, (Welp, 2008)

La configuración típica se ilustra en la (Ilustración 4-13), por sus siglas en inglés se les conoce también como *Confined Disposal Facilities (CDF)*, estos sitios se pueden utilizar para contener los sedimentos contaminados, los cuales son considerados materiales peligrosos o tóxicos.

CAPÍTULO 5

Equipos de Dragado



EQUIPOS DE DRAGADO

05

CAPÍTULO QUINTO

5 Equipos de dragado

La elección del equipo de dragado y el método a utilizar no es una tarea sencilla, en gran medida el éxito de un proyecto de dragado depende de una buena elección. La selección de un equipo está en función de diferentes factores entre los más comunes tenemos; el tipo de trabajo a realizar, la disponibilidad y ubicación del equipo, las dimensiones de la obra, la cantidad y naturaleza del material, la profundidad del dragado, los aspectos ambientales, y logística; estos y otros factores influyen en el costo del proyecto.

Actualmente se cuenta con diversos tipos de dragas, cada uno tiene su particular forma de trabajar, cabe destacar que no existe ninguna draga estructurada que pueda realizar todos los rangos de dragado, por lo cual la elección dependerá de los factores antes mencionados.

5.1 Clasificación de los equipos de dragado.

Una de las propuestas encontradas en la literatura para la clasificación de los equipos de dragado, es clasificarlas conforme su principio básico de realizar la excavación, pudiendo ser en forma mecánica, hidráulica o una combinación de estas. Por lo cual se tienen los siguientes tipos de dragas: **Dragas mecánicas**, **Dragas hidráulicas**, **Dragas combinadas**. Las operaciones de dragado deben cumplir con una doble función, extraer el material y conducirlo hasta el lugar de descarga (Guillermo, 1999).

El dragado también se puede clasificar en dos grandes rubros. Dragado de construcción y de conservación o mantenimiento. El primero se realiza cuando es necesario crear o aumentar profundidades, dimensiones en planta o ambos. El dragado de conservación puede ser de tipo periódico o discontinuo.

5.2 Técnicas de dragado

Utilizar una técnica apropiada de dragado ayuda a optimizar los beneficios de los proyectos, así como minimizar los impactos ambientales. Los factores que suelen considerarse para la selección de opciones apropiadas son: definición de tareas, acceso al lugar de los trabajos, vegetación de la zona, temporada del año, cantidades y características de los sedimentos, lugar y tipo de eliminación, seguridad durante el dragado, cuestiones ambientales.

Para definir una técnica de dragado se debe conocer el tipo de sedimento, lo cual hace probable que éste sea en sedimentos cohesivos y no cohesivos, los sedimentos cohesivos se transportan a través de la tubería como grumos y nódulos, mientras que los sedimentos no cohesivos se dispersan en forma de suspensión, haciendo más fácil bombearlos a través de la tubería.

5.3 Tipos de dragas

Dada la gran diferencia de condiciones respecto a las obras terrestres, se necesita una maquinaria especializada para realizar las obras de dragado, estos equipos han evolucionado mucho en los últimos años.

La variedad de equipos y métodos de dragado es muy extensa, lo más usual es clasificarlos según el método utilizado para la excavación del material, siendo esto en dragas mecánicas o hidráulicas Tabla 5-1.

| DRAGAS | TIPO. |
|-------------|----------------------------------|
| MECÁNICA | Rosarios de cangilones. |
| | De cuchara de almejas |
| | Tipo retroexcavadora |
| | Tipo pala (Dipper) |
| HIDRÁULICAS | Succión (Dupstpan) |
| | De inyección de agua |
| | De succión simple |
| | De succión por arrastre |
| | De succión en marcha |
| COMBINADAS | De succión con cortador |
| | De succión con cortador vertical |
| OTRAS | Rastra de fondo (Bed leveller) |
| | Arado (Plough) |

Tabla 5-1, Clasificación de dragas.

Dentro de la gran variedad de equipos de dragado, algunos se especializan en una de las tres fases de operación (excavación, transporte o vertido), pero otros son capaces de realizar todo el conjunto de la operación sin necesitar equipos o instalaciones auxiliares. La Tabla 5-1 muestra los principales equipos de dragado existentes. Con estos equipos es posible realizar las excavaciones necesarias en una obra portuaria, empleando un tipo u otro en función de la naturaleza del terreno, las características del entorno de la obra y destino final de los materiales a excavar.

5.3.1 Dragas mecánicas e hidráulicas.

Dragas mecánicas: utilizan un elemento mecánico de corte (cuchara, cazo, cangilón, cubos, etc.) para penetrar el suelo, al material se le imprime una fuerza y éste genera la extracción, el cual sale con poca perturbación y mínima dilución. A este grupo pertenecen las dragas de cangilones o de rosario, la de cuchara ó almejas, la tipo pala (Dipper) de empuje frontal o retroexcavadora.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se especifican de una manera muy general las diferentes dragas que existen, se indica los métodos más habituales de extracción de material, transporte y vertido.

| CLASE | TIPO | MEDIO | MÉTODO DE TRANPORTE | MÉTODO DE VERTIDO |
|---------------------------|---|---|---------------------|--|
| Dragas Mecánicas | Rosario de cangilones (Bucket) | Cadena de cangilones | Gánguil | Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | De cucharas de almejas (Grab/Clamsheli) | Pala de empuje frontal | Gánguil | Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | Tipo retroexcavadora (Backhoe) | Cazo de retro excavadora | Gánguil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | Tipo pala (Dipper) | Cuchara de valvas | Gánguil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| Dragas Hidráulicas | Recogedora de fango Dupstan | Bombas centrifugas | Tubería o Gángil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | De succión simple | Tubo y bomba centrifuga | Tubería o Gángil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | De succión por arrastre | Tubo y bomba centrifuga | Tubería o Gángil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | Inyección de agua | Bomba centrifuga, Chorros de agua a presión | | |
| | Draga de succión en marcha | Bombas centrifugas | Tubería o Gángil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| Dragas combinadas | Draga de succión con cortador | Bombas centrifugas, escalera, cortador | Tubería o Gángil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | Draga de succión con cortador vertical | Bombas centrifugas, escalera, cortador | Tubería o Gángil | Tubería. Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| Otras Dragas | Rastra de fondo (Bed leveller) | Pala de empuje frontal | Propia cántara | Descarga de fondo, bivalva o elevador |
| | Arado (Plough) | | Propia cántara | Descarga de fondo, bivalva o elevador |

Tabla 5-2, clasificación de las diferentes tipos de dragas (año y autor).

Dragas hidráulicas: utilizan bombas centrifugas para producir la succión de agua que transporta el material dragado. Estas dragas combinan el arranque hidráulico con algún dispositivo mecánico, como un cortador, que en su acción giratoria disgrega el terreno para ser succionado posteriormente (Ilustración 5-1). Estas dragas resultan más versátiles,

económicas y eficientes que las mecánicas ya que realizan las operaciones de extracción y transporte por medio de una unidad integral.



Ilustración 5-1, cortador de acción giratoria © 2014APT Global Marine Services L.L.C

Los tipos básicos de este grupo son las dragas estacionarias y las de autopropulsión con tolva, a las dragas estacionarias corresponden las dragas de succión simple y las de succión con cortador.

5.4 Dragas mecánicas:

Las dragas mecánicas utilizan un mecanismo de corte para penetrar el suelo. Emplean equipos similares a los utilizados para los movimientos de suelos en tierra firme, poseen entre ellas una serie de aspectos en común; por ejemplo que el material se saca con poca perturbación y mínima dilución por ello la eficiencia de las dragas mecánicas es alta desde ese punto de vista. La separación del material se genera al aplicar una fuerza con un elemento mecánico (cuchara, cazo, cangilón, cubos, etc.)

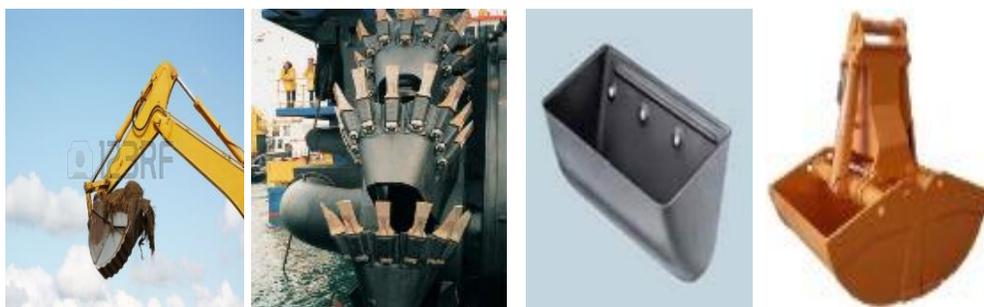


Ilustración 5-2, Tipos de cubos (Brokers, 2016)

5.4.1 Dragas de rosario

El dragado se realiza mediante un rosario continuo de cangilones, estos últimos levantan el material desde el fondo y lo elevan por encima del nivel de agua. Los cangilones por la acción de la gravedad, al pasar por el extremo superior del rosario, vierten el material sobre los planos de descarga que conducen el material dragado a las barcasas que se colocan en un costado de la draga. (Ilustración 5-4).



Ilustración 5-3, *Draga de Cangilones* (Sánchez, 2017)



Ilustración 5-4, © 1999-2017, Alibaba.

Cuando se utilizan para dragar materiales duros como arcillas consolidadas o rocas blandas, el rosario se modifica, se reduce la velocidad de la cadena, y se colocan cangilones más pequeños y pesados. (Martinez Barron y Slamanka Mora, 2008)

5.4.2 Dragas tipo pala o dipper

Estas dragas tradicionalmente operaban con cables. Las actuales son de tipo hidráulico, tienen la capacidad de dragar un amplio rango de materiales difíciles; incluyendo rocas blandas, arcillas duras y materiales muy compactados, esto la hace muy versátil. Dependiendo del material a extraer serán el tipo de dientes que se coloquen para disgregar el material, y hacerla más eficiente al dragar materiales duros.

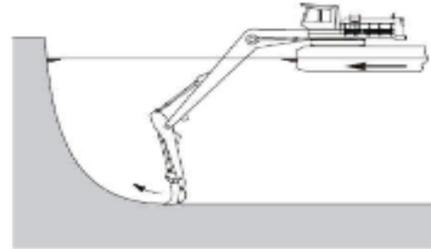


Ilustración 5-5, Draga de pala tipo Dipper (Brokers, 2005).

5.4.3 Dragas tipo pala o Dipper de retroexcavación

Desempeñan un papel importante en proyectos marítimos, particularmente cuando se encuentran materiales difíciles de remover como roca o arcillas duras. Estos equipos han evolucionado a partir de la retroexcavadora terrestre con las ventajas y desventajas que ello implica. Su operación requiere una sola persona en la cabina, emplean una tripulación total de 2 o 3 personas que colaboran en el movimiento del pontón y su mantenimiento (OOrd, 2015). El movimiento de avance del pontón se realiza habitualmente con la ayuda del brazo de la retroexcavadora.



Ilustración 5-6, Draga tipo dripper de retroexcavadora (Promares, 2015).

Este tipo de dragas requiere poco equipo auxiliar, la forma de transportar el material es por medio de barcazas que se colocan al lado de la draga, pueden utilizar diferentes baldes de distintos tamaños, y escoplo de percusión para romper rocas.

5.4.4 Dragas de cuchara

Estas dragas consisten en un pontón sobre el que se encuentra montada una grúa que sostiene una cuchara. El material se eleva con la cuchara y es descargado en una barcaza que se encuentra situada al lado del pontón (Escalante, 2007).

Este tipo de draga se clasifica en función de la capacidad volumétrica de la cuchara. La cual varía entre 0.75 y 20 m³, lo habitual son las cucharas del orden de los 2 a 3 m³, pero también hay de mayor de 20 m³.



Ilustración 5-7 , Draga de cuchara, removiendo piedras en el canal de Tunkey

5.5 Dragas hidráulicas

Este tipo de dragas utilizan bombas centrífugas que generan una succión que le permite transportar la mezcla agua - sedimento, a continuación se tiene una descripción general sobre la manera en que operan los equipos de dragado hidráulico.

5.5.1 Dragas Dustpan (Recogedora de fango).

La operación de dragado se realiza desde una barcaza y mediante un cabezal que se baja desde la proa y que tiene forma de cabeza de una aspiradora (de ahí su nombre en inglés). La succión de la mezcla agua y sedimento se produce mediante la acción de las

bombas centrífugas. En los ríos el material se deja en suspensión para que el movimiento de las corrientes transporte el material lejos de ahí.

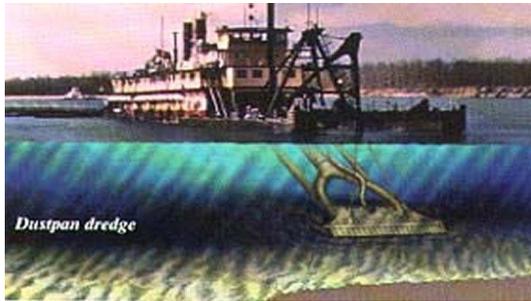


Ilustración 5-8, Draga Dustpan (© 2000-2017 GlobalSecurity.org).

5.5.2 Draga por inyección de agua

La draga utiliza chorros de agua a presión para fluidificar el material de fondo a remover, de esta manera se crea una corriente de turbidez, la mezcla creada se desplaza por medio de las corrientes existentes en el lugar. Este tipo de draga se utiliza fundamentalmente para dragados de mantenimiento en puertos con equipos de pequeñas dimensiones y para proyectos ambientalmente sensibles. Este tipo de procedimiento es de bajo costo, pero se limita al dragado de limos, arcillas no consolidadas y arenas finas (Raúl, 2007, n.d.)

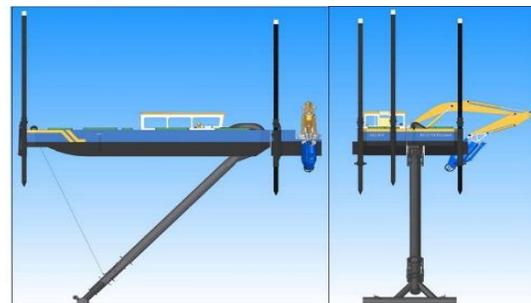


Ilustración 5-9, Draga por inyección de agua. (DRAVOSA, 2016)

5.5.3 Dragas de succión por arrastre

Las dragas de succión por arrastre, denominada en inglés *Trailing Suction Hopper Dredge* (TSHD), son uno de los tipos de dragas más importantes y populares de la industria del dragado por su versatilidad. Son barcos autopropulsados que tienen tolvas en las que se coloca el material, la extracción se efectúa mediante tubos de succión ubicados a los costados de la draga que se bajan hasta ponerlos en contacto con el fondo.

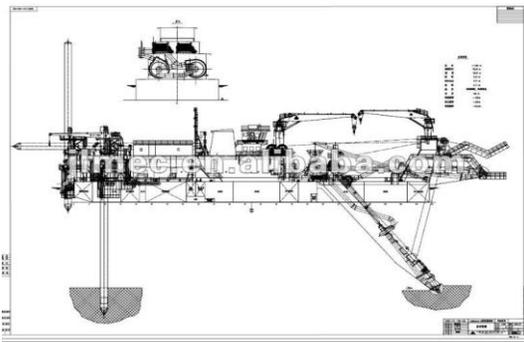


Ilustración 5-10, Dragas de succión por arrastre (DRAVOSA, 2016).

El dragado se realiza con la draga navegando a bajas velocidades, la succión de la mezcla de agua y sedimento se efectúa con bombas centrífugas que pueden estar ubicadas en la bodega del buque o en el tubo de succión para aumentar la profundidad de dragado. Este tipo de draga es muy flexible en lo que se refiere a los tipos de material que pueden dragar.

5.6 Dragas mixtas

Son dragas que combinan acciones mecánicas e hidráulicas para efectuar las tareas de dragado, tienen la ventaja de ser útiles en un amplio rango de materiales.

5.6.1 Draga de succión con cortador (CSD)

La draga de succión con cortador o draga de cortador, es una draga que combina las ventajas de las dragas mecánicas y de las dragas hidráulicas, la disgregación del material se efectúa mediante el giro de un cabezal mecánico denominado cortador, éste gira y disgrega el material que es aspirado por succión a través de tuberías; la elevación y transporte se realiza por la succión generada en las bombas centrifugas.



Ilustración 5-11, Draga de succión con cortador (DRAVOSA, 2015)

5.6.2 Draga de succión con cortador vertical

En inglés se denomina “*Wheel Suction Dredger*”, es una draga similar a la draga de succión con cortador, la única diferencia, que el cortador gira en el sentido del eje del tubo de succión. Esta draga representa una tecnología relativamente moderna y se utiliza con frecuencia en trabajos mineros.

5.7 Otras dragas

Existen algunas dragas que no responden exactamente a las características mencionadas. Entre ellas se pueden indicar las que se mencionan en los párrafos siguientes (Escalante, 2007; Raúl, 2008).

5.7.1 Rastra de fondo (Bed leveller)

Este equipo consiste en una plancha de metal con dientes en su parte frontal que se arrastra por el fondo tirada por un remolcador, puede usarse como equipo de dragado independiente para desplazar material de un sitio a otro en distancias cortas, o puede utilizarse como un equipo complementario (draga de succión por arrastre). En este último caso, este dispositivo permite nivelar las imperfecciones de fondo generadas después de efectuar la operación de dragado y que son muy difíciles de eliminar con la draga de succión por arrastre.



Ilustración 5-12, Rastra de fondo (Bed leveller) © 2014 DEME.

5.7.2 Arado (Plough)

Tiene el mismo principio que la rastra, pero con una diferente conformación que permite cavar un surco en el fondo para generar trincheras, por ejemplo, para la instalación de tuberías.

5.7.3 Seafloor Production System

Es un sistemas donde se utilizan equipos denominados cortadores Hiperbáricos, mismo que son utilizados en la industria de la minería, los equipos son instalados en el fondo del océano, para la extracción de materias primas de gran valor, los cuales son encontrados en nódulos polimetálicos y fósforo, estos depósitos se encuentran en profundidades que van desde varios a miles de metros.

CAPÍTULO 6

Modelos Numéricos de Evolución Costera



MODELOS NUMÉRICOS DE EVOLUCIÓN COSTERA

06

CAPÍTULO SEXTO

6 Modelos numéricos de evolución costera

6.1 Modelos de evolución morfológica en el dragado

Los modelos de evolución morfológica enfocados al dragado, tratan de determinar las modificaciones que sufren los depósitos sedimentarios del fondo marino en el canal de navegación y en las inmediaciones de vertido, al ser alterados por las operaciones de dragado y descarga de materiales; la alteración de las condiciones físicas, químicas y biológicas del ecosistema, generan cambios en la dinámica marina. Éstos dependerán de las condiciones del clima marítimo: oleaje, corrientes, viento, precipitación, etc., así como de las propiedades intrínsecas de las arenas de la playa: tamaño, distribución granulométrica y espacial del sedimento, densidad y composición de los granos, etc.

Actualmente existen diversos modelos numéricos para predecir la evolución morfológica y el impacto ocasionado en el medio ambiente provocado por los efectos del dragado, *SMC* (González, M., Medina, R., González-Ondina, J., Osorio, A., Méndez, F. J., y García, 2007), *STFATE* (Ousley et al., 2016), *DHI* (Peeck, Proctor, y Brockmann, 1982), *MIKI21* (Sutton, A. P., Finnis, M. W., Pettifor, D. G., y Ohta, 1988), algunos de éstos son más potentes que otros, los cuales se basan en el conocimiento de la interacción entre la dinámica marítima y los sedimentos (Losada, Medina, y Losada, 1995). Este conocimiento se plasma en una serie de modelos altamente empíricos de planta y de perfil que predicen el transporte de sedimentos, la geometría media y extrema de la zona en estudio, así como su evolución a mediano y largo plazo.

Los modelos utilizados se pueden dividir en dos rangos; evolutivos y de equilibrio (Losada, Medina *et al.*, 1995). Sin embargo, no todos se apegan a las escalas espaciales y temporales

requeridas, por ello se desarrollaron un gran número de modelos simplificados enfocados en determinadas escalas que permite determinar esos cambios morfológicos (Van Rijn, 1993) así como las plumas de concentración de sedimento.

En la literatura no se han encontrado modelos que relacionen el transporte de sedimento con la vida útil del dragado, los actuales tienen un enfoque sobre el impacto ambiental que provocan los proyectos de dragado, por medio de la pluma de sedimentos, también permiten una mejor visualización de los resultados, como es el caso de ADCIRC desarrollado por el U.S. Army Corp of Engineers, el modelo PTM (Rastreador de partículas Langragianas) (Lackey and Macdonald, 2007) y *STFATE* (Ousley et al., 2016).

6.2 Modelos de evolución

Conocer los procesos morfológicos ocasionados por el oleaje y las corrientes es de gran importancia para el manejo costero y el transporte de sedimento, ya que sirve para estimar los cambios morfológicos que a su vez resultan en modificaciones de las condiciones hidrodinámicas de la zona. Los cambios ocurren todo el tiempo, y dependen de condiciones normales y extremas y sus modificaciones espaciales están limitadas desde la profundidad de cierre hasta la duna. Este cambio en la morfodinámica de playas involucra una gran cantidad de efectos y procesos físicos. En la actualidad los equipos de cómputo cuentan con grandes procesadores que permiten implementar técnicas numéricas para simular procesos costeros y mejorar por mucho la predicción de los cambios en el sistema analizado.

Los modelos de evolución también se pueden dividir por el orden de complejidad; por el tipo de solución: modelos de perfil o de planta, modelos de evolución de la línea de costa, y modelos de evolución morfodinámica; en general se busca cumplir una condición particular para un tipo de solución o escala temporal. Una de las maneras de clasificar los modelos es la presentada por Hanson *et al.* (2003).

- Se clasifican en modelos numéricos y analíticos en función del método de solución.
- En relación al efecto de los procesos dinámicos se establecen dos direcciones, las establecidas con el perfil, y las de planta de la playa.
- La escala temporal de los modelos también permite clasificarlos por horas-días (corto plazo), días-años (mediano plazo) y años-décadas (largo plazo).
- Con relación al tipo de modelo; los modelos que tienden al equilibrio se denominan de ciclo cerrado, y los modelos que reproducen los procesos físicos de pequeña escala son modelos de ciclo abierto. Se pueden dividir en Modelos de evolución y Modelos de equilibrio.

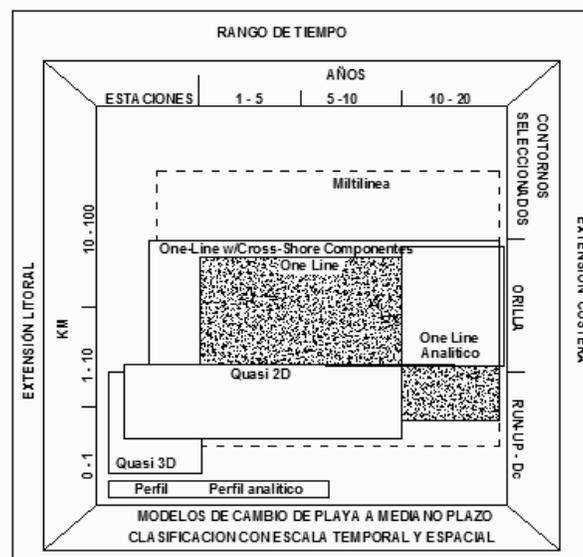


Ilustración 6-1; Clasificación de los diferentes modelos de evolución de playas (Hanson et al., 2003)

Otra forma de visualizar la clasificación de Hanson es la que se representa en la Ilustración 6-1; en ella se aprecia los diversos modelos. Básicamente los modelos de evolución de perfil se pueden diferenciar en: los modelos de bucle cerrado o basados en una formulación de equilibrio, y los modelos de bucle abierto que tratan de modelar los procesos físicos en pequeña escala. Dentro de este grupo se encuentran *SBEACH* (Larson and Kraus, 1989), *CROSS* (Zheng and Dean, 1997).

6.2.1 Modelo de área costera 3D y 2D

También se les conoce como modelos de áreas costeras. Los modelos de transporte ola/corriente 3D son capaces de describir la morfodinámica en escalas de tiempo desde el orden de segundos hasta horas, pero tiene un inconveniente en la aplicación práctica, debido a que se requiere de gran tiempo en el cálculo, o en ocasiones los análisis resultan tan inestables que sus resultados difieren de las condiciones reales. En general, son modelos que acoplan un modelo hidrodinámico tridimensional con un modelo de transporte. Su resolución espacial se encuentra en el orden de metros, por lo que no simulan las formas de microescala como ripples, dunas o antidunas. En la actualidad, y dada su complejidad numérica se emplea para determinar la evolución de fondos en zonas singulares como es el caso de la socavación en las proximidades de estructuras costeras.

Una variante de los modelos 3D son los modelos Quasi-3D, se acopla un modelo vertical de dos dimensiones con un modelo horizontal de dos dimensiones. Así el modelo horizontal calcula los perfiles de velocidad y el segundo analiza la circulación costera, el transporte de sedimentos y los cambios en la batimetría. Estos modelos requieren de gran tiempo de trabajo, además de ser inestables al largo plazo.

Los modelos de transporte ola/corriente 2DH también conocidos como modelos de área costera: describen la morfodinámica de las playas en escalas de tiempo similares a los modelos 3D. Los modelos acoplan un modelo hidrodinámico integrado vertical (2DH) con un modelo de transporte de sedimento. Los 2DH buscan determinar las corrientes costeras en función de la profundidad, calculando así el transporte de sedimento y los cambios batimétricos. Su resolución espacial es como los modelos 3D, comienzan en escala de m. La desventaja es que no son capaces de definir formas de microescala. Prácticamente todas las universidades avocadas a la ingeniería de costas han desarrollado este tipo de modelo 2DH, como es el caso del modelo *SETRAD*, este modelo integra un modelo de propagación y rotura de oleaje basado en la ecuación de la pendiente suave (*WAPO*) (Silva Casarín, 2008) con un modelo de corrientes debidas al oleaje (*COCO*) (Silva, Baquerizo, Losada, y Mendoza, 2010) y un modelo de transporte y cambio de la batimetría (*SETRAD*). Así como: *LITPACK* (Thach *et al.*, 2007), *3D-SHORE* (Shimizu *et al.*, 1996), *TELEMAC* (Pechon and Teisson, 1996).

Los modelos de evolución del perfil 2DV: son similares a los modelos de evolución 2DH, se acoplan a un modelo hidrodinámico 2DV con un modelo de transporte. Se pueden formar por un modelo externo de oleaje (en este caso sólo incluirá asomeramiento) y un modelo de corrientes promediado en el periodo del oleaje, por lo que su resolución temporal será superior al periodo del oleaje. En el caso de que el modelo de propagación sea de Boussinesq, la hidrodinámica resolverá simultáneamente el oleaje y los movimientos medios, así como las interacciones no lineales entre ondas. Estos modelos no resuelven las formas de microescala como ripples, dunas y antidunas. En este tipo de modelos se encuentra el modelo *PETRA* (PErfil TRAnsversal) del GIOC (Costas, 2015)

6.2.2 Modelos de perfil Transversal

Estos modelos son de carácter empírico o semiempírico, basado en las observaciones sobre el perfil de playa y medianamente apoyado por alguna condición teórica de equilibrio entre la hidrodinámica y el transporte a través del perfil. El modelo de perfil de equilibrio más conocido es el de Dean; el cual en un inicio era prácticamente independiente de la dinámica marina. En los últimos años se ha logrado definirlo en función de las condiciones medias de la dinámica, por ello, estos modelos pueden ser utilizados como evolutivos de largo plazo.

El perfil se define mediante una o varias condiciones de equilibrio, basados en la dinámica del oleaje y mareas. Los parámetros se determinan por la relación con las condiciones de oleaje, marea y características de los sedimentos. Asumiendo que las condiciones de oleaje permiten al perfil alcanzar un equilibrio. Una vez conocido el clima marítimo se puede establecer una estadística de evolución del perfil de una determinada playa. Estos modelos son de macroescala, no pueden definir formas menores en el perfil como son barras, escalones, escarpes, barras crecientes, etcétera. La escala de tiempo es de largo plazo, varios días o semanas, al estar basados en condiciones de equilibrio.

6.2.2.1 Modelos de evolución de la línea de costa de una o varias líneas

Son modelos muy utilizados en la ingeniería de playas, su orden es de macroescala, suelen tener un módulo de propagación de oleaje medianamente complejo, pueden determinar el transporte longitudinal y el cambio de la línea de costa, se basan en la ecuación de conservación del

sedimento. Entre las limitantes que presenta, es que no resuelven las formas de lecho como ripples o antidunas, así como las formas de media escala o macroescala como beach cusps o megacusps (salvo que estos sean el resultado de una variación rítmica del oleaje incidente). Asimismo la escala de tiempos comienza en estados de mar; es decir desde las horas y pueden extenderse durante toda la vida útil de la playa si es preciso, por lo que convergen con los modelos de equilibrio.

6.2.3 Modelos de equilibrio de playas

Los modelos de equilibrio de playas tratan de predecir la forma media o de equilibrio de una playa sometida a un determinado clima marítimo. Los modelos empíricos de evolución del perfil y los de morfodinámica pueden considerarse como una extensión de estos modelos a condiciones medias variables a lo largo del año. En general son modelos semiempíricos sencillos de uso en la ingeniería, que simplifica la forma de la playa en una línea de costa y en un perfil equilibrio. Todos estos modelos son de macroescala y largo plazo (superior a las semanas o meses). Dentro de este grupo se encuentran *SBEACH* (Larson and Kraus, 1989), *CROSS* (Zheng and Dean, 1997)

6.2.3.1 Modelos de evolución morfodinámica

Los modelos de evolución morfodinámica son modelos empíricos que tratan de explicar y predecir la evolución de la forma de las playas en función a las condiciones del oleaje, marea y tipo de sedimentos. La forma de las playas se simplifica mediante la definición de una serie de “estados de playa” y las condiciones hidrodinámicas y del sedimento se implementan mediante parámetros adimensionales. A pesar de su sencillez son modelos muy utilizados en la ingeniería, pues permiten determinar de forma estadística la calidad de la playa y la formación de formas rítmicas de media y gran escala, que no pueden ser determinados con los modelos anteriores. En este grupo de modelos destacan (L. Wright, Short, y Nielsen, 1982) y de (Masselink y Short, 2016), lo cual consiste en constituir los estados de playa una especie de situaciones de equilibrio de la playa con la dinámica, estos modelos son de media escala espacial y de largo plazo, superior a días.

6.3 Aplicación de modelos numéricos

El modelo TELEMAC (Pechon and Teisson, 1996), se desarrolló para simular la evolución morfológica debido a las rompientes, considera para su cálculo; el oleaje, las corrientes, el sedimento, el transporte y evolución del lecho marino.

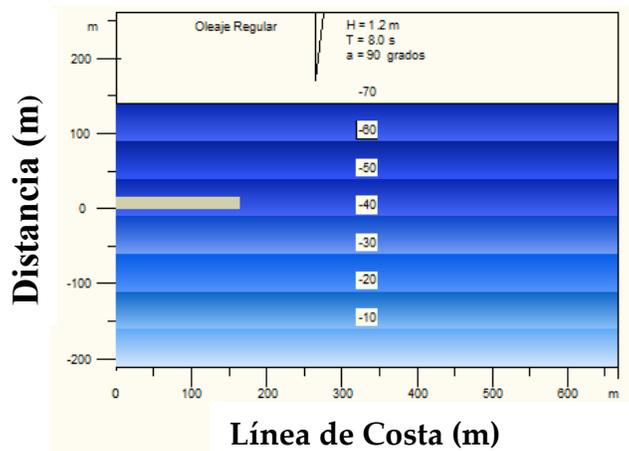


Ilustración 6-2, Batimetría inicial.

En la Ilustración 6-2 se muestra un caso de aplicación, se analiza el impacto que ejerce en la playa la presencia de un rompeolas. En la solución se puede visualizar la formación de una saliente. Las condiciones iniciales del dominio son; pendiente inicial de 1:50 cerca de la costa, con una profundidad máxima de -7.4 m, H= 1.2m, T = 8.0 s, a = 90 grados., El tamaño de grano medio es de 250 μ

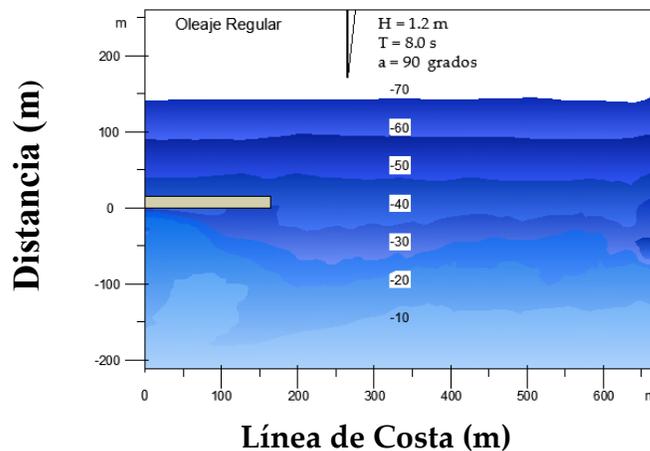


Ilustración 6-3, Batimetría a los siete días.

Como se aprecia en la Ilustración 6-3, la modelación numérica llevó a la formación de una saliente, también se aprecia poca movilidad de sedimento detrás del rompeolas.

El modelo 3D-SHORE, se basa en las corrientes cercanas a la profundidad de cierre, es un modelo de mediano plazo, Los 3D convencionales han alcanzado la etapa de aplicación en la ingeniería, ayudan a estimar el volumen de dragado del puerto y de la investigación de una efectiva contramedida contra los bancos de arena del puerto; sin embargo, no estiman la modificación litoral porque se utiliza la línea de costa como un límite fijo.

En la Ilustración 6-4 se presentan los resultados obtenidos con el modelo 3D.SHORE, en el caso experimental se utilizó una malla de 14 metros de longitud y de 7.5 metros de ancho, el diámetro del grano fue de 0.2 mm, la pendiente del fondo 1:20, y el tiempo de modelado fue aproximadamente de 12 horas, se cuenta con la presencia de un rompeolas de 1.5 metros de largo, la $H = 5.7$ cm y el periodo de 0.9 segundos. El análisis morfológico se realizó para un total de 6 horas.

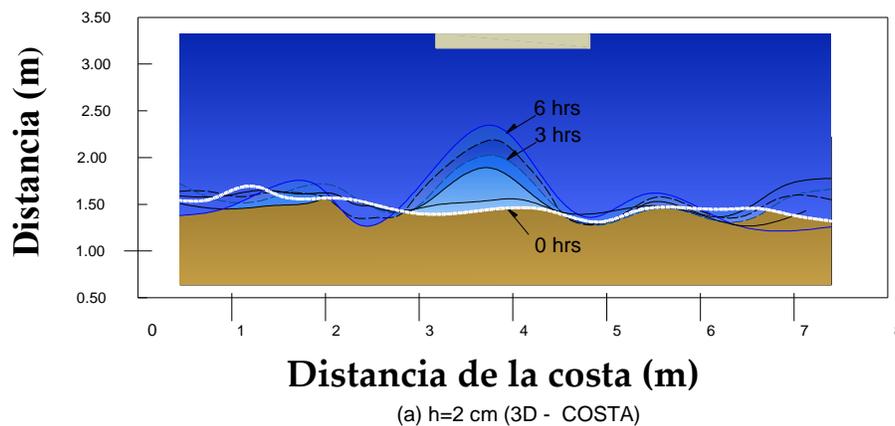


Ilustración 6-4, evolución morfológica.

El modelo describe la evolución de la batimetría, en los resultados se aprecia la creación de una saliente en el área protegida, también se observa la evolución en el transcurso del tiempo.

El modelo *GENESIS*, ha sido el más utilizado entre los de una línea por su generalidad, existen diferentes casos de aplicación, incluyen una simulación de la evolución de la línea de costa en

Homer Spit (Alaska, Estados Unidos), el caso de la erosión generada por un muro en Sandy Hook (New Jersey, Estados Unidos) y el caso de tres diques exentos en Lakeview Park, Lorain, en el Lago Erie (Ohio, Estados Unidos).

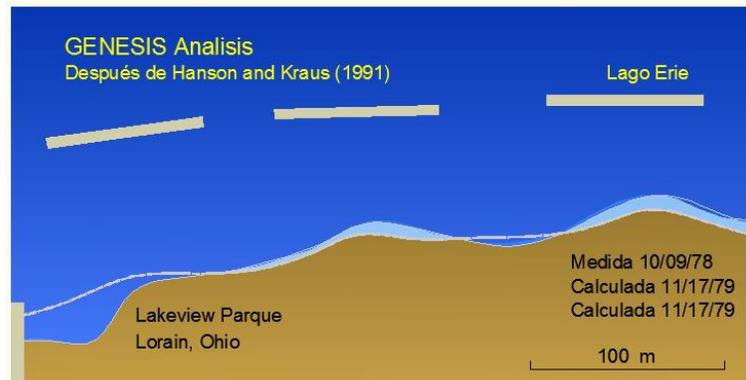


Ilustración 6-5, Comparación de la evolución de la línea de costa determinada con el modelo GENESIS frente a la magnitud medida en Lakeview Park, Lorain (Ohio, Estados Unidos), (tomada de Komar, 1998).

Como resultado de los estudios del modelo en relación a sus predicciones en las correspondientes medidas determinadas en un modelo físico, tanto para casos de diques exentos como para espigones, se puede concluir que el grado de similitud entre los diferentes resultados fue bastante bueno, una vez que los diferentes parámetros del modelo numérico *GENESIS* habían sido calibrados con tal fin. Sin embargo, a pesar de que el modelo sea calibrado, existen una serie de procesos que representa de una manera demasiado simple, reflejando una predicción de la línea de costa no del todo acertada. Así por ejemplo el oleaje en las zonas donde los procesos de refracción-difracción son importantes (diques exentos, salientes, cabos) se representa de una manera simplificada. El modelo no proporciona información de la variabilidad experimentada por el perfil de playa, pudiendo ser solamente aplicado en el largo plazo (años a décadas).

6.4 Efecto de diques rebasables y sumergidos en las formas en planta

Las obras de protección costeras se inspiran en la propia naturaleza (arrecifes, barras, islas próximas a la costa), en el caso específico de los diques, normalmente se construyen de forma rectilínea, paralela a la línea de costa y ubicadas a una distancia de ésta con el objeto de proteger de la acción del oleaje una determinada zona del litoral. Este tipo de estructuras disipa la energía del

oleaje en el área protegida, provoca importantes alteraciones en el transporte de sedimentos y genera sedimentación en la zona de resguardo.

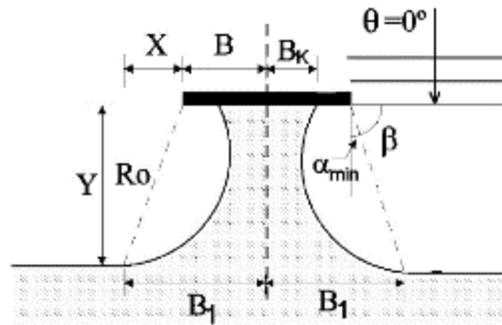


Ilustración 6-6, esquema de tómbolo.

Cuando la cantidad de material depositado en el área de resguardo es vasta se forma una saliente o punta de arena, si el proceso de acumulación continúa hasta alcanzar la obra, se forma un tómbolo. En el caso de los diques sumergidos, también llamados diques arrecife, éstos al tener un francobordo negativo (sumergido) tienen la ventaja de no afectar el paisaje, pero difícilmente generan tómbolos, en contraste con los diques rebasables que ofrecen un mayor grado de protección y dependiendo de sus características geométricas pueden generar un impacto en el paisaje. En algunos casos los diques sumergidos no siempre generan cambios morfológicos acumulativos, sino que su tendencia suele ser erosiva. Esto está en función de la distancia del dique a la orilla y en consecuencia por efecto de la energía del oleaje.

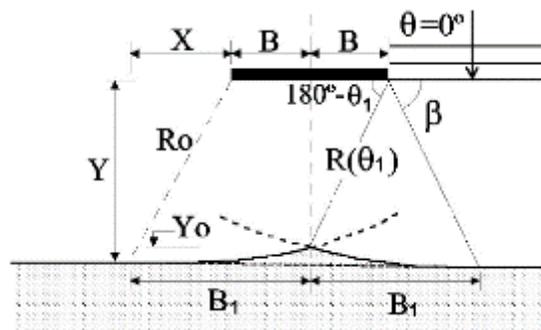


Ilustración 6-7, esquema de saliente.

Donde B_1 es la distancia medida desde el centro de la estructura a la base.

Y es la distancia de la línea de costa a la estructura.

R_0 indica el inicio de las radiaciones que determinan el inicio de la parábola

Dependiendo de la cantidad de sedimento captado y depositado en la zona de protección será el tipo de modificación que sufra la playa, éstas pueden ser clasificadas: tómbolo, saliente y doble saliente; el tipo de formación depende de la cantidad de energía que entre en la zona de sombras. (Hans Hanson y Kraus, 1990) clasifican la respuesta de la costa en el caso de la presencia de un dique con las siguientes características:

1. Limitada: la acumulación máxima es inferior a 4 m con respecto a la posición inicial de la línea de costa.
2. Saliente: Si la acumulación máxima es superior a 4 m con respecto a la posición inicial de la línea de costa, pero la saliente no alcanza el dique o es inferior a su dimensión un 90% de la distancia existente entre la línea inicial y el dique.
3. Tómbolo: Si la saliente alcanza el dique, sobrepasando por tanto la acumulación de material sedimentario 90% de la distancia entre la línea inicial de la costa y el dique.

La influencia de la posición relativa de un dique sumergido con respecto a la zona donde se produce el transporte, determina si existirá acumulación o erosión; en el caso de que la estructura se encuentre dentro de la zona de transformación del oleaje, al aumentar la relación entre la distancia del dique a la costa y el ancho de la zona de transformación, aumenta los flujos de agua que pasan sobre la coronación y que salen hacia el exterior del área protegida por ambos lados, esto genera una mayor turbulencia en el área de sombras y un incremento en el transporte de sedimentos hacia el interior, lo que genera una situación predominantemente erosiva. En caso contrario, si el dique sumergido se localiza fuera de la zona de transformación del oleaje, al aproximar la estructura a la línea de rompientes, gana importancia el efecto de la difracción; lo que produce un incremento de los gradientes de altura de ola, resultando un aumento de las tasas de transporte hacia el interior del área protegida.

El tiempo necesario para que la costa alcance de nuevo el estado de equilibrio después de la construcción de un dique, depende de las características de la obra y de las condiciones locales (clima marítimo y disponibilidad de sedimentos) (Yaacov Nir, 1982), los tómbolos acumulan la

mitad de su volumen final en un período de uno a dos años, mientras que el estado final de equilibrio se alcanza en cinco o seis años posterior a la construcción del dique, la saliente o tómbolo formado puede ocupar de 25% a 75% del área protegida.

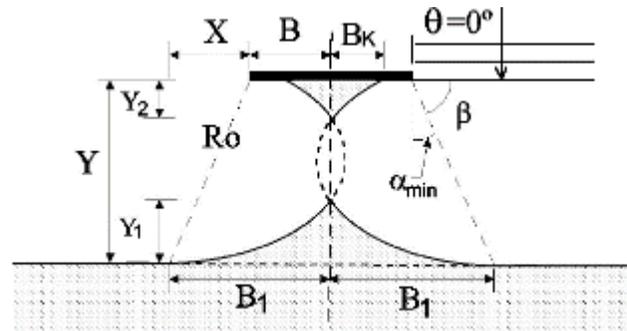


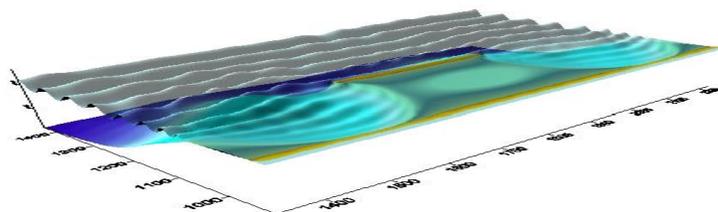
Ilustración 6-8, esquema doble saliente

En la construcción de diques paralelos a la costa, es deseable la generación de una saliente, debido a que se permite el transporte longitudinal de sedimentos entre la estructura y la orilla, así como la circulación y renovación del agua en la zona de sombras. Los tómbolos se forman cuando el dique se sitúa muy próximo a la costa, es más largo con respecto a la longitud de onda del oleaje incidente y cuando existe poca transmisión de energía a través y por encima de él. Podría indicarse como regla general: si el dique se ubica a una distancia de la línea de costa inferior a 80% de su longitud, la saliente que se formará por la acumulación de arena crecerá hasta dar lugar a la formación de un tómbolo estable en un plazo de tres a cinco años, lo cual dependerá del diseño del dique y de su emplazamiento, así como de las condiciones ambientales.

Una vez formado el tómbolo, el sistema dique-tómbolo funciona como un espigón en "T", esto obstruye el transporte de sedimentos, lo que implica una situación erosiva en las playas situadas en los tramos de costa aguas abajo de los diques, además de su efecto sobre las playas adyacentes. Por otro lado los tómbolos presentan el inconveniente de permitir a los usuarios de la playa el fácil acceso a la estructura, convirtiéndola en obras potencialmente peligrosa para ellos.

CAPÍTULO 7

Herramienta de Apoyo al Dragado Marítimo Portuario



HERRAMIENTA DE APOYO AL DRAGADO MARÍTIMO PORTUARIO

07

CAPÍTULO SÉPTIMO

7 Herramienta de apoyo al dragado marítimo portuario, SETRAD

En este capítulo se presenta la estructura y arquitectura del programa *SETRAD* (Sediment TRANsport for Dredging), el modelo está codificado en el lenguaje FORTRAN, se desarrolló como un instrumento auxiliar en la planificación del dragado, y evaluación de los sistemas costeros, al predecir la variación morfológica en los recintos portuarios y playas. La trayectoria de los sedimentos se predice a partir de los campos de oleaje, la velocidad y tasa del transporte de los sedimentos. Se incluye un criterio para determinar las zonas de erosión y colmatación.

En los apartados siguientes se expondrán la validación del modelo, las ecuaciones de gobierno, condiciones físicas y consideraciones que utiliza el programa para calcular el transporte de sedimentos y un ejemplo de aplicación. *SETRAD* incluye procesos de erosión y depósito de sedimentos. La herramienta está integrada por un módulo de dragado; topográfico que simula la evolución espacial y temporal, además de un módulo estadístico predictivo de mareas de tormenta que permite simular las condiciones climatológicas.

La predicción exacta del destino de los sedimentos es un elemento clave en la ingeniería costera y en los trabajos de dragado. Estas predicciones se utilizan para evaluar el impacto del dragado, y ubicar el destino final de los materiales, en especial los que están contaminados.

En la práctica, abordar una solución de forma detallada del sistema en estudio suele ser a veces impráctico por existir restricciones en la calidad y detalle de la información base (datos de oleaje, perfiles, etc.) (Elena y Valladares, 2009). Una solución a este inconveniente es la implementación de herramientas que simplifiquen los procesos costeros, y de forma determinista obtener resultados validos desde el punto de vista ingenieril.

Como se mencionó, uno de los principales problemas relacionados con el sedimento es la colmatación en los accesos portuarios, la contaminación y perturbación de ambientes costeros asociados al dragado, por otro lado utilizar al dragado de manera desmedida puede afectar la hidrodinámica, y ésta promover a la agitación dentro del recinto portuario, por lo que una correcta planeación y previsión previa a la ejecución de un dragado se hacen imprescindibles.

La incertidumbre que priva respecto a los efectos asociados al dragado motiva a la búsqueda y desarrollo de herramientas que permitan predecir el comportamiento morfológico después de un dragado, lo cual, en este trabajo se propone realizar con el uso de modelos numéricos capaces de representar los fenómenos más relevantes asociados con la hidrodinámica marina, el transporte de sedimentos y la erosión o colmatación del sedimento en el lecho marino con el fin de predecir el comportamiento de una obra de dragado, y con esta información implementar técnicas para reducir la acumulación de sedimentos en zonas no deseadas; y así reducir sustancialmente los costos de mantenimiento portuario a largo plazo. Los beneficios también pueden implementarse de una forma consciente y amigable en la alimentación de playas, y adecuación de hábitats que se han hecho frecuentes.

7.1 Aplicación de los modelos de evolución morfológica en el dragado

Los modelos de evolución morfológica permiten determinar la relación existente entre la morfología costera, la dinámica del oleaje y el tipo de sedimento. En el intento de predecir los cambios del fondo marino mediante formulaciones obtenidas de manera empírica, se han desarrollado varias teorías que permiten representar la realidad de la evolución morfológica presentada en la costa; la arena de mar es movida por las corrientes y el oleaje, este transporte de materiales modifica la morfología costera (Bailard y Inman, 1981; Van Rijn, 1993), *Genesis* (Hans Hanson, 1989), *OneLine* (Dabees y Kamphuis, 1998; Kamphuis, Davies, Nairn, y Sayao, 1986), *GenCade* (Hanson *et al.*, 1920),. Actualmente existen diversos programas de cómputo para predecir la evolución morfológica y el avance de la línea de costa *SMC* (González, M., Medina, R., González-Ondina, J., Osorio, A., Méndez, F. J., y García, 2007), *DHI* (Peeck, Proctor, y Brockmann, 1982), *MIKI21* (Sutton, A. P., Finnis, M. W., Pettifor, D. G., y Ohta, 1988), éstos se basan en el conocimiento de la interacción entre la dinámica marítima y los sedimentos (Losada *et al.*, 1995). Este conocimiento se plasma en una serie de modelos altamente empíricos de planta y de perfil que modelan el transporte de sedimentos, y facilitan la predicción sobre las geometrías medias y extremas de la zona de estudio, así como su evolución a mediano y largo plazo. Sin embargo, ninguno de estos modelos ha sido diseñado con la capacidad de seleccionar un dragado y una disposición en el área, y la respuesta del área marítima que puede genera perturbación del dragado.

En la literatura no se han encontrado modelos que relacionen los problemas de erosión en playas con la extracción de material producto del dragado en puertos, así como el transporte de sedimentos con la vida útil del dragado. Existen modelos que se enfocan en predecir el destino del material de dragado y la perturbación causada por el sedimento en el medio costero, (Lackey *et al.*, 2007b; Rijn, 1987; Roos *et al.*, 2008; Sunamura *et al.*, 1984). Así como modelos que permiten conocer la dispersión de la pluma de sedimentos

con el fin de conocer el impacto ambiental que puede ocasionar los proyectos de dragado, tal es el caso de *STFATE* (Ousley et al., 2016)

El objetivo del modelo *SETRAD* es determinar el tiempo de servicio de un dragado e identificar los posibles efectos que estos pudieran generar en las playas cercanas al puerto, éstos resultados, permiten a los tomadores de decisión tener un panorama más amplio de lo que puede ocurrir en un desarrollo portuario.

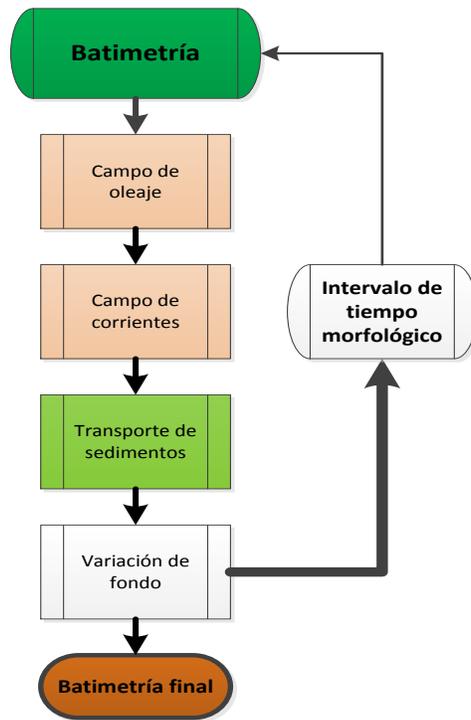
7.2 Descripción del modelo *SETRAD*

SETRAD es un modelo bidimensional de evolución morfológica, que se compone de módulos de propagación de oleaje, corrientes inducido por el oleaje y uno de transporte de sedimentos y evolución morfológica; el modelo de propagación de oleaje, *WAPO* (Silva, 2008), resuelve la ecuación de la pendiente suave, y entrega la dirección y altura del oleaje en todo el dominio; el modelo de corrientes inducido por el oleaje, *COCO* (Silva et al., 2010), resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras NLSW, y entrega el campo de las corrientes cercanas a la costa. La información del campo de corrientes es entregada al modelo *SETRAD*, el cual calcula mediante las formulaciones de Soulsby-Van Rijn (1997) la tasa del transporte de sedimentos, y la predicción de la morfología en un ciclo cerrado.

El modelo consta de ecuaciones que resuelven el flujo de sedimento dentro de la zona de rompientes, así como los cambios morfológicos asociados a las variaciones espaciales del transporte de sedimento; también se integra un módulo de dragado que permite simular la profundidad de diseño, y el cálculo del volumen promedio del material a dragar.

La aplicación de *SETRAD* requiere tres componentes principales como datos de entrada: las características del sedimento, la batimetría y las condiciones hidrodinámicas iniciales. El modelo con la información del área en estudio construye una base de datos con todas las condiciones iniciales necesarias para su funcionamiento.

La Ilustración 7-1 es un esquema que describe el procedimiento general de los modelos, se aprecia que éstos toman en consideración la influencia de la variación batimétrica para el cálculo del comportamiento hidrodinámico.



*Ilustración 7-1, Diagrama de flujo de modelos de transporte de sedimentos.
 Modificado (Nam et al., 2011)*

En cada ciclo se obtienen nuevos valores de flujos de transporte, y finalmente los de variación de fondo. Este ciclo cerrado se realiza hasta finalizar el tiempo de simulación. La bondad de implementar una simulación en un ciclo cerrado es que permite evaluar la respuesta de la costa a diversos cambios inducidos por el dragado, este programa tiene una rutina principal y nueve subrutinas (Ldatos, LolasWapo, LvelCoco, Vorbital, Vcritica, CorrDifN, Pasotiempo, HmodiF, EscrituraBatime). La rutina principal está diseñada para leer la información ingresada en los ficheros.

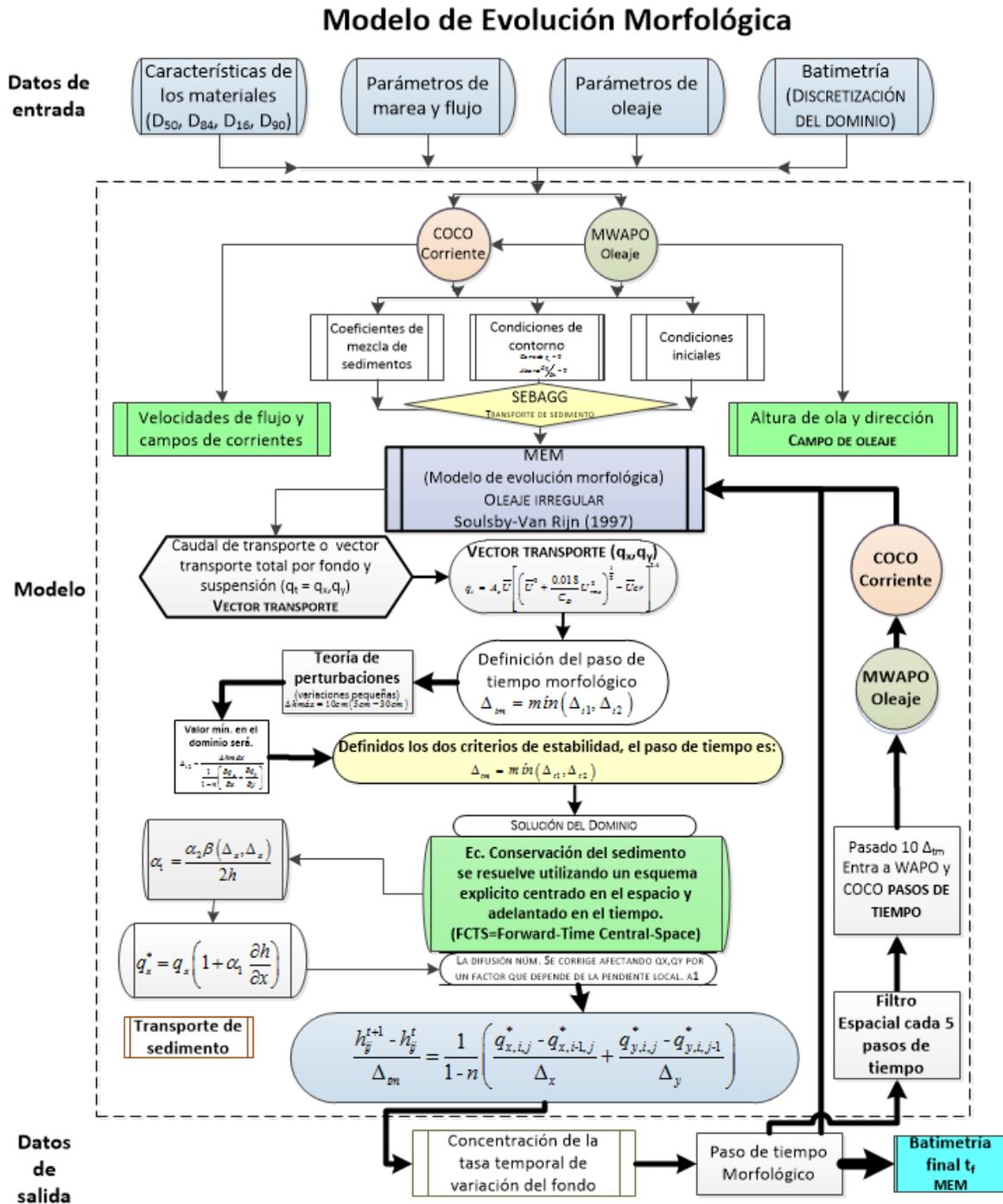


Ilustración 7-2, Diagrama de flujo del modelo.

La Ilustración 7-2 representa el diagrama de flujo del modelo SETRAD, se aprecia la interacción y estructura entre los modelos WAPO, COCO y SETRAD. En los datos de entrada se establecen los parámetros del flujo, oleaje, características del material (en

particular el importante es el D_{50}); esta información debe ser la misma para los tres modelos, debido a la dependencia generada entre ellos, si unos de los datos es diferente, la solución será errónea.

Uno de los puntos claves a destacar en el modelo de evolución costera, es la determinación del paso del tiempo, y la máxima variación de fondo. El cálculo del paso del tiempo puede generar ruido numérico importante; un paso de tiempo grande genera inestabilidad en los cálculos. En el modelo *SETRAD* el paso del tiempo es definido por dos criterios de estabilidad: criterio de estabilidad del numérico de Courant de migración de formas de lecho, y la máxima variación del fondo admitida. Otro de los puntos en el diagrama es el empleo de un filtro espacial, el cual permite reducir la inestabilidad en todas las variaciones morfológicas.

7.3 Cálculo del transporte

Las playas sufren cambios topobatimétricos debido a la acción de la dinámica que actúa sobre ellas; esto es: la acción del oleaje, corrientes y viento. En la actualidad los modelos teóricos tratan de integrar la dinámica costera con el objeto de predecir la evolución de las playas, pero esto no es posible por los motivos de escala espacial y temporal que ya se han comentado, aún con estas limitaciones se establecen secuencias e intensidad de variaciones de los factores que controlan la dinámica costera, con lo cual se han obtenido resultados que son aplicables a la ingeniería costera.

La arena en el mar puede ser movida por las corrientes, las cuales son generadas ya sea por la acción de las mareas, el oleaje o el viento (Bailard y Inman, 1981; Van Rijn, 1993). El efecto del transporte se ve intensificado por la acción conjunta del oleaje y las corrientes. La arena es transportada por tres procesos básicos; Incorporación, Transporte y Depósito de sedimentos. Cuando la arena se encuentra en movimiento, su recorrido estará gobernado por su masa y la intensidad de la corriente. Los modos de transporte

dominantes son el Transporte por fondo q_b y el transporte por suspensión q_s ; se considera el transporte de lecho plano, por cambio de pendiente, y transporte en suspensión, en este sentido el transporte total queda definido por la ecuación (7.1)

$$q_t = q_b + q_s \tag{7.1}$$

7.3.1 Ecuaciones de gobierno y condiciones iniciales

Existen diferentes ecuaciones que permiten evaluar la concentración de sedimentos en el lecho marino, la gran mayoría de éstas se han desarrollado considerando el concepto de umbral del esfuerzo cortante o velocidad crítica para el inicio de movimiento (Shields, 1936), en SETRAD la ecuación utilizada para calcular el transporte total de sedimentos es la propuesta por Soulsby – Van Rijn

$$q_t = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2.4} \tag{7.2}$$

Esta ecuación permite evaluar el transporte de fondo y suspensión sobre un fondo horizontal, a partir de consideraciones teóricas, asumiendo que el movimiento del material de fondo es dominado por los saltos de las partículas bajo la influencia de las fuerzas hidrodinámicas del flujo y de las fuerzas gravitatorias.

Donde:

\bar{U} = la velocidad promediada en la vertical C_D = coeficiente de fricción debido a corrientes
 U_{rms} = velocidad orbital cuadrática media \bar{U}_{cr} = velocidad crítica de inicio de movimiento

$$A_s = A_{sb} + A_{ss} \tag{7.3}$$

$$A_s = \frac{0.005h \left(\frac{D_{50}}{h} \right)}{\left[(s-1)gD_{50} \right]^{1.2}} \quad (7.4)$$

$$A_{ss} = \frac{0.012D_{50}D_*^{-0.6}}{\left[(s-1)gD_{50} \right]^{1.2}} \quad (7.5)$$

La ecuación (7.3) integra la viscosidad cinemática del agua con la densidad y el diámetro del sedimento D_{50} , los elementos de A_s se resuelve con (7.4) y (7.5) donde D^* es el tamaño de grano adimensional que relaciona la acción de la gravedad, la densidad y viscosidad cinemática del agua. El coeficiente de fricción está relacionado con la rugosidad del grano, el cual se obtiene con la ecuación (7.6)

$$C_D = \left[\frac{0.40}{\ln \left(\frac{h}{z_o} - 1 \right)} \right]^2 \quad (7.6)$$

$$\bar{U}_{cr} = 0.19 \left(D_{50} \right)^{0.1} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.1 \leq D_{50} \leq 0.5mm \quad (7.7)$$

$$\bar{U}_{cr} = 8.5 \left(D_{50} \right)^{0.6} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.5 \leq D_{50} \leq 2.0mm$$

Las formas en fondo no se desarrollan para materiales muy finos donde el $D_{50} < 0.05$ mm, en SETRAD, el modelo asume que si $D_{50} < 0.05$ mm, la fricción en el fondo se define \bar{U}_{cr} = Velocidad Crítica de inicio de movimiento, considerando una rugosidad efectiva $k_s = 3D_{90}$, $D_{90} = 2 D_{50}$, la velocidad de evolución morfológica se relaciona con la velocidad del transporte de sedimento (Nielsen, 1992; Van Rijn, 1985, 1984) .

7.3.1.1 Inicio de movimiento

El inicio del transporte de sedimento se relaciona con la velocidad horizontal del flujo, lo cual considera a la capa límite (Meyer-Peter and Müller, 1948). La fórmula (7.2) integra el concepto de umbral esfuerzo cortante o velocidad crítica de inicio de movimiento (Soulsby, 1997), el cual estima el transporte de sedimento correspondiente, pero para poder incluir diferentes condiciones experimentales con un flujo oscilatorio o uniforme se emplea el parámetro adimensional de Shields (7.8).

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_c}{gD(\rho_s - \rho)} \quad (7.8)$$

En la ecuación (7.8), Soulsby, integró el tamaño del grano D , el cual lo caracterizó con el tamaño del grano adimensional, esta ecuación incluye ρ_s es la densidad del sedimento (ton/m³), ρ es la densidad de agua (ton/m³), g es la aceleración de la gravedad (m/s²), y τ_{cr} es el esfuerzo crítico de inicio de movimiento en el fondo plano. (Soulsby, 1997), compiló datos de estudios bajo condiciones de flujo unidimensional y oscilatorio, utilizó además el tamaño de grano adimensional, debido a que en las playas la distribución granulométrica es muy diferente a una distribución homogénea, por ello se emplea el tamaño de grano adimensional (7.9).

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} D_{50} \quad (7.9)$$

El modelo utiliza una representación analítica basada en la compilación y ajuste a la ecuación (7.8) según Soulsby y Whitehouse (1997), quedando (7.10) como el parámetro adimensional de Shields requerido para el inicio de movimiento.

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1+1.2D_*} + 0.055 \left[1 - \exp(-0.02D_*) \right] \quad (7.10)$$

De lo anterior se considera que las velocidades orbitales del oleaje son lo suficientemente fuertes para mover el sedimento, pero su naturaleza oscilatoria reduce su capacidad para generar transporte neto en algunas direcciones. Existen tres factores que contribuyen significativamente al transporte de sedimentos: la interacción del oleaje y las corrientes, la asimetría del oleaje, y la morfología del fondo. Los esfuerzos cortantes ejercidos por el oleaje proveen la energía necesaria para suspender al sedimento por encima del fondo, y las corrientes generan el transporte en su dirección; considerando lo anterior se desarrolló la herramienta *SETRAD*.

7.3.1.2 Efecto de la pendiente

La acción de la gravedad y la pendiente son condiciones importantes en el transporte de sedimentos, esta forma de transporte se definió como el transporte de fondo. El modelo considera la configuración de la batimetría para calcular la pendiente de cada celda y así determinar el inicio de transporte de sedimento y el cálculo de su tensión crítica (7.11)

$$\frac{\tau_{acr}}{\tau_{cr}} = K_{\alpha} = \frac{\text{sen}(\phi - \alpha)}{\text{sen}\phi} \text{ flujo den dirección a la pendiente } (K_{\alpha} < 1) \quad (7.11)$$

$$\frac{\tau_{acr}}{\tau_{cr}} = K_{\alpha} = \frac{\text{sen}(\phi + \alpha)}{\text{sen}\phi} \text{ flujo den dirección a la pendiente } (K_{\alpha} > 1)$$

La pendiente longitudinal de fondo se representa por α , el ángulo de rozamiento interno está dado por ϕ , τ_{acr} es el esfuerzo crítico de inicio de movimiento en pendiente longitudinal, el esfuerzo crítico de inicio de movimiento de Shields τ_{cr} se puede determinar con (7.12)

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} (\rho_s - \rho) g D_{50} \quad (7.12)$$

En el cálculo se contempla el efecto que tiene la tensión crítica en una pendiente transversal

$$\frac{\tau_{\beta cr}}{\tau_{cr}} = K_{\beta} = \left[1 - \frac{\tan^2 \beta}{\tan^2 \phi} \right]^{1/2} \cos \beta \quad (7.13)$$

Donde β es la pendiente transversal al flujo, $\tau_{\beta cr}$ es el esfuerzo crítico de inicio de movimiento en fondo con pendiente transversal.

La tensión crítica de inicio de movimiento depende de los factores K_{β} y K_{α} cada uno de los cuales evalúa el efecto que tiene la pendiente del fondo sobre un flujo longitudinal y transversal.

Estas ecuaciones permiten conocer la distribución del sedimento y las condiciones del flujo en la zona del dominio, y determinar la evolución morfológica.

7.3.1.3 Evolución morfológica

Para calcular la evolución morfológica es necesario determinar la tasa de transporte de sedimentos, el transporte varía dependiendo de algunas propiedades intrínsecas del sedimento y el flujo (Brea y Balocchi, 2010; Pedrozo Acuña, 2011), para ello es importante calcular el paso de tiempo morfodinámico Δt_m , el cual depende de dos criterios de estabilidad: Criterio de estabilidad del numérico de Courant de migración de formas de lecho, y máxima variación del fondo admitida. Por lo cual para un número de Courant dado el máximo paso del tiempo se expresa (7.14)

$$\Delta_t = \frac{\sigma \Delta_x}{C_b} \quad (7.14)$$

Para la ecuación anterior, el número de Courant σ debe ser negativo y menor a 1, Δ_x representa el tamaño de la celda, ésta debe ser rectangular, C_b es la celeridad de propagación de las variaciones del lecho (7.15)

$$C_b = \frac{\beta q_t}{(1-n)h} \quad (7.15)$$

Definido el paso de tiempo y calculado el vector transporte de sedimentos $\vec{q}_t = (q_x, q_y)$, se resuelve la ecuación de conservación del sedimento (7.16).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-n} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (7.16)$$

El resultado de la ecuación de conservación del sedimento indica la nueva altura del fondo, en cada celda de la malla, en cada ciclo se obtiene una nueva batimetría diferente a la original con nuevas características hidrodinámicas del sistema (Oleaje y las corrientes). Este ciclo cerrado se realiza hasta finalizar el tiempo de simulación.

La ecuación (7.16) se resuelve utilizando un esquema explícito centrado en el espacio y adelantado en el tiempo, (FCTS=Forward – Time Central – Space). Este tipo de esquema suele generar difusión numérica. La cual se corrige al afectar las tasas de transporte, ecuación q_x y q_y (7.17), con un factor que depende de la pendiente local.

$$q_x^* = q_x \left(1 + \alpha_1 \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad q_y^* = q_y \left(1 + \alpha_1 \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (7.17)$$

El vector de transporte (q_x^*, q_y^*) m/s., se introduce en la ecuación de conservación del sedimento (7.16), donde α_1 es un coeficiente que se puede aproximar con la ecuación (7.18)

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_2 \beta (\Delta_x, \Delta_y)}{2h} \quad (7.18)$$

Donde α_2 debe tomar valores de 1 – 5, el potencial de la fórmula β , debe estar entre 3 – 4, h es el calado, Δ_x, Δ_y son las dimensiones de la celda.

Finalmente la ecuación (7.20) resuelve en cada celda la variación del fondo y considera el respectivo vector transporte para cada paso de tiempo. Los cambios en la altura de la morfología se relacionan con la tasa de transporte.

La variación morfológica h_{ij}^t , depende también del tiempo de simulación y del paso de tiempo Δ_m . Para determinar la cota batimétrica se compara la profundidad del lecho contra su predicción h_{ij}^{t+1} ; si h_{ij}^t tiene una profundidad mayor que h_{ij}^{t+1} entonces hay acumulación, pero si h_{ij}^t es menor que h_{ij}^{t+1} entonces hay erosión.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} &= -q_{x,y} & h_{ij}^t > h_{ij}^{t+1} \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= q_{x,y} & h_{ij}^t < h_{ij}^{t+1} \end{aligned} \quad (7.19)$$

La distribución longitudinal del sedimento responde a la dirección y a los cambios de las corrientes.

$$\frac{h_{ij}^{t+1} - h_{ij}^t}{\Delta_m} = \frac{1}{1-n} \left(\frac{q_{x,i,j}^* - q_{x,i-1,j}^*}{\Delta_x} + \frac{q_{y,i,j}^* - q_{y,i,j-1}^*}{\Delta_y} \right) \quad (7.20)$$

7.4 Condiciones de frontera

El flujo de transporte permite determinar la tasa de variación de fondo, para aplicar este método es necesario que las variaciones del fondo sean lo suficientemente pequeñas como para admitir la teoría de las perturbaciones. La perturbación admisible fluctúa entre $\Delta_{h_{\max}} = 10 \text{ cm}$.

El modelo considera que el transporte de sedimento en la línea de costa deja de ejercerse a una profundidad de 0.30 metros pues se considera que está tocando tierra.

Las celdas que se encuentran fuera del dominio, no son tratadas directamente por las ecuaciones de gobierno; para determinar la nueva altura, se utiliza información de las celdas colindantes, en el caso de las celdas ubicadas en el lado norte (7.21), lado este (7.22), lado oeste (7.23), lado sur (7.24)

$$ht_{i,j} = \frac{(ht_{i,j-1} + ht_{i,j-2} + ht_{i,j-3})}{3} \quad (7.21)$$

$$ht_{i,j} = \frac{(ht_{i-1,j} + ht_{i-2,j} + ht_{i-3,j})}{3} \quad (7.22)$$

$$ht_{i,j} = \frac{(ht_{i+1,j} + ht_{i+2,j} + ht_{i+3,j})}{3} \quad (7.23)$$

$$ht_{i,j} = \frac{(ht_{i,j+1} + ht_{i,j+2} + ht_{i,j+3})}{3} \quad (7.24)$$

7.5 Datos de entrada

Los datos de entrada se dividen en dos tipos: físicos e hidrodinámicos; las variaciones físicas del modelo permiten determinar las características geomorfológicas de la zona de estudio, tales como la pendiente y los relieves del fondo. El modelo de transporte de sedimentos y evolución de fondo se compone de la integración de tres modelos numéricos *WAPO*, *COCO* Y *SETRAD*; en los siguientes párrafos se describirán los datos de entrada y la forma de operar de cada uno.

7.5.1 WAPO (WAVE Propagation On the coast)

Es un modelo matemático de oleaje empleado en la ingeniería costera para predecir las transformaciones que sufre el oleaje al acercarse a la costa, representa el someramiento, la refracción, difracción, reflexión y la disipación por rotura.

WAPO se basa en la ecuación modificada de la pendiente suave de la teoría lineal o de Stokes (7.25), por lo que es restringido a condiciones en las que la teoría lineal es válida.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (7.25)$$

Su estructura está conformada por tres módulos principales: *BWAPO* está diseñado para que a partir de ciertas condiciones iniciales e información batimétrica del área de estudio, se construya una base de datos.

WAPO3: lo forman una rutina principal y ocho subrutinas (*LEODATA*, *WVNUM*, *ZKC*, *LATERAP*, *COEFF*, *SOLVER*, *ANGU* Y *GRD*). Capaz de resolver las ecuaciones y la lectura de los datos iniciales. Tiene la función de generar y resolver el sistema de ecuaciones para estimar los potenciales de velocidades locales a lo largo y ancho de una malla computacional.

MWAPO3: Es el programa que controla a los anteriores y genera los archivos de entrada necesarios para que el programa *OLUCA-UNAM*, este último resuelve a través de una aproximación parabólica la ecuación modificada de la pendiente suave.

7.5.2 COCO

Estima las corrientes inducidas por el oleaje. El sistema se resuelve en un esquema 2-D, se basado en las Non Linear Shallow Water Equations que en su forma integral se pueden escribir como (7.26), donde: Ω es el dominio, S es el perímetro de Ω y f es la función vectorial del flujo y h es el vector de términos independientes. Ésta se discretiza espacialmente usando volúmenes finitos sobre una malla rectangular. Se recomienda leer (Silva *et al.*, 2010). Este modelo resuelve las ecuaciones de promediadas de Navier-Stokes integradas en la vertical y promediadas en el período del oleaje, las cuales describen el flujo para cuerpos de agua donde la velocidad vertical es casi nula y la presión es considerada hidrostática. Las ecuaciones de movimiento integradas en la vertical, considerando el efecto de Coriolis

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} q d\Omega + \int_S \hat{f} dS = \int_{\Omega} h d\Omega \quad (7.26)$$

La solución emplea una aproximación de segundo orden tipo Godonov y los flujos en las interfaces de las celdas se calculan mediante la aproximación de Roe al problema de Riemman. La integración temporal se realiza en un esquema Adams-Bashford de segundo orden.

El modelo matemático *COCO* permite ligar los resultados arrojados por el modelo numérico *WAPO*, con el modelo *SETRAD*. Esta última entrega la tasa del transporte de sedimento y la evolución morfológica e hidrodinámica. Los resultados se pueden emplear en proyectos de ingeniería costera.

7.6 Validación del modelo numérico

La validación del modelo numérico consistió en adecuar los datos de entrada del modelo SETRAD de modo que sus resultados permitan reproducir la solución numérica en planta del comportamiento morfológico que sufre una playa ante la presencia de un rompeolas paralelo a la costa.

Los parámetros de calibración establecen las condiciones que influyen en los resultados del análisis, estos valores corresponden a los coeficientes de difusión numérica, coeficiente fricción en el fondo, y las condiciones de contorno. Estas últimas pueden tener gran influencia en los resultados.

| Parámetro | Valores |
|-------------------------------|---------|
| Coficiente Alfa, α_2 | 1 – 5 |
| Número de Courant | < 1 |
| Potencia de la formula, Betha | 3 – 4 |

Tabla 7-1, Parámetros de calibración del modelo

Como proceso inicial para la validación se buscó reproducir la solución numérica propuesta por González y Medina (2001), la cual ofrece una predicción de la forma de equilibrio en planta, debido a la presencia de un dique no ligado a la costa, está utiliza la ecuación de la parábola de Hsu y Evans (1989) y Moreno y Kraus (1999).

Tres parámetros de calibración Tabla 7-1, fueron seleccionados para reproducir el experimento de Nicholson et al., 1997.

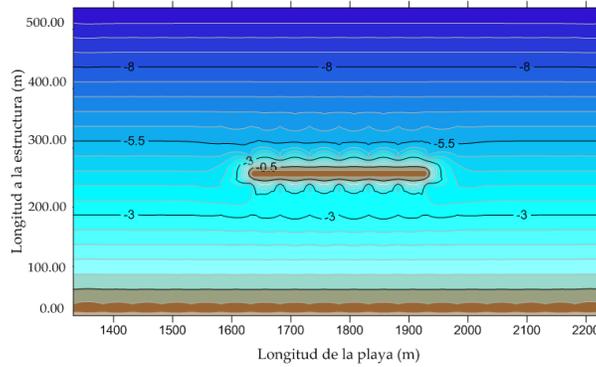


Ilustración 7-3, batimetría del caso teórico.

Para la calibración se hicieron diferentes modelaciones con parámetros distintos, esto permite apreciar la sensibilidad del modelo, y obtener los resultados de Nicholson *et al.*, (1997). Este experimento numérico consiste en la presencia de una playa con pendiente uniforme de 1/50, tamaño del sedimento 0.25 m, altura de ola incidente 2 m, periodo 8 s, ángulo de incidencia del oleaje $\theta = 0$; y la presencia de un rompeolas paralelo a la costa de 300 m de longitud, ubicado 220 m de la línea de costa Ilustración 7-3. Las modelaciones de la evolución morfológica, fueron realizadas para un intervalo de tiempo de 72 horas de acción ininterrumpida de las condiciones hidrodinámicas. Además se hizo la comparación del mismo experimento con diferentes modelos.

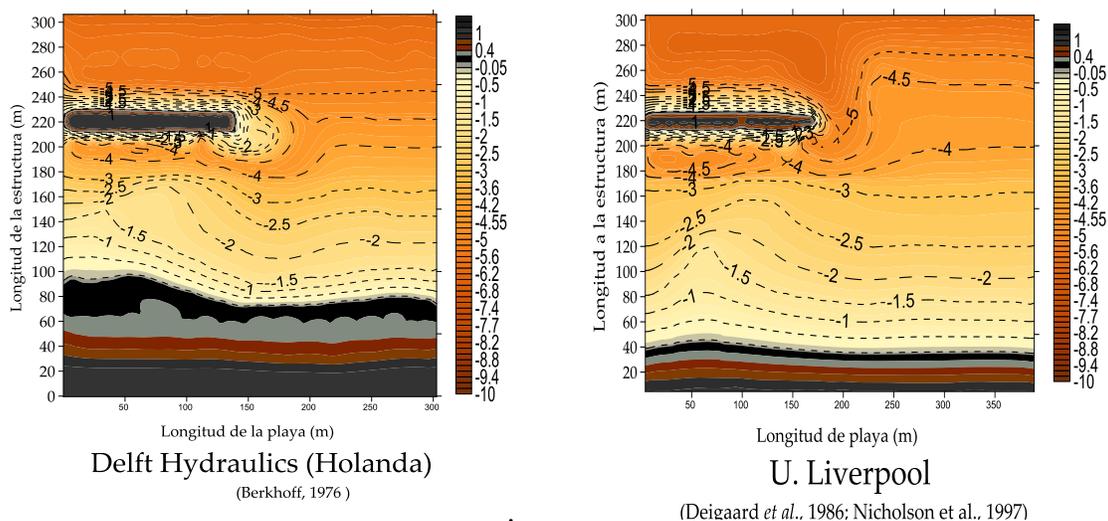


Ilustración 7-4, resultados de 72 horas

En la Ilustración 7-4 se muestran los resultados de los modelos Delf Hydraulis, y de la Universidad de Liverpool (Nicholson *et al.*, 1997), en sus resultados se observa la acumulación de sedimento en la zona de sombra. En la Ilustración 7-5, HR Wallingford (Reino Unido y Danish Hydraulic Institute (Dinamarca) se aprecia el mismo comportamiento: la acumulación del sedimento se realiza en la zona de sombra.

Los resultados obtenidos por el modelo SETRAD, exponen la misma tendencia acumulativa que en todos los casos anteriores; sin embargo la difracción mostrada en la Ilustración 7-6 es más marcada que en los modelos anteriores, lo que genera una mayor cantidad de energía y una mayor acumulación de sedimentos en la zona de sombras, pero el desplazamiento de la línea de costa es conservador.

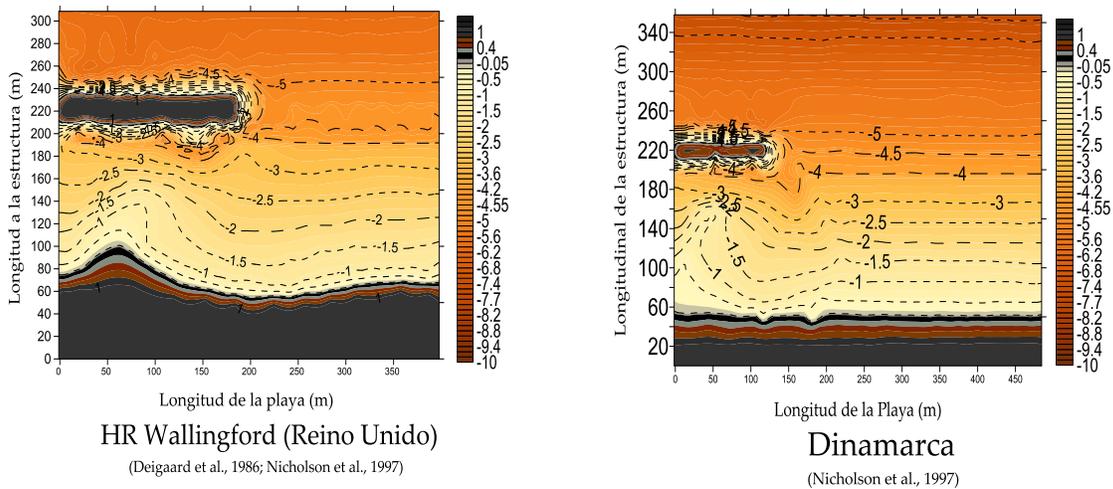


Ilustración 7-5, Resultados de modelos presentados.

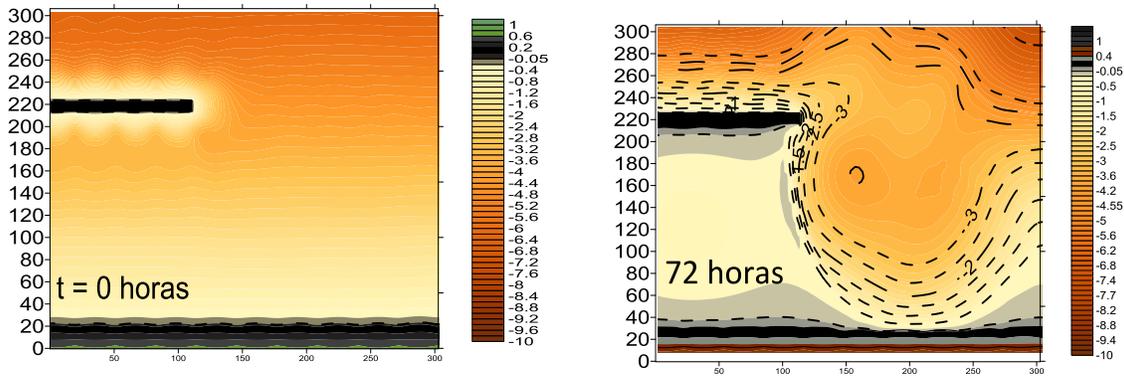


Ilustración 7-6, resultados modelo SETRAD

En algunos como el de la Universidad de Liverpool, la acumulación en la zona de sombras es mayor que en los demás. El modelo Delfy HR Wallingfort presentan un comportamiento muy similar, poca movilidad en la línea de costa, pero las líneas batimétricas demuestran que la curva de 2 – 2.5 metros tiene las misma tendencia de crecimiento que los otros modelos.

7.6.1 Comparación de la herramienta con un caso teórico

Se realizó la comprobación con el caso experimental propuesto por Nicholson *et al.*, (1997). Ilustración 7-7, para ello se realizó la modelación numérica del caso con el modelo SETRAD, y se analizó el comportamiento del transporte de sedimentos.

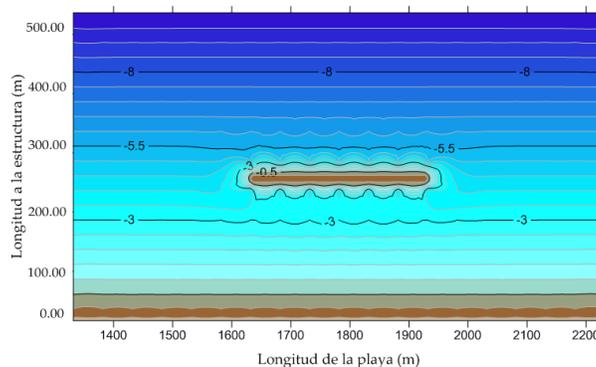
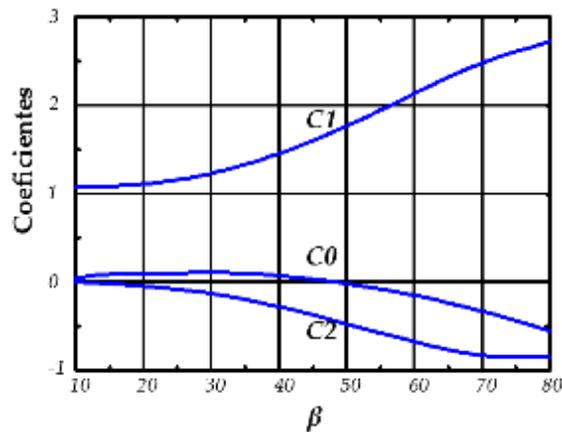


Ilustración 7-7, batimetría del caso teórico.

Este experimento se resuelve con las formulaciones propuestas por González y Medina, (2001), que es una ecuación de ajuste parabólico, la cual permite describir una bahía en equilibrio, y la forma en planta debido a un dique no ligado a la costa mediante un sistema de coordenadas polares (R, β) , donde β , es el ángulo de incidencia de las crestas del oleaje y la línea de control, los coeficientes C_0 , C_1 Y C_2 son funciones del ángulo de incidencia del oleaje, la ecuación (Hsu y Evans, 1989), Ec.(7.27), se puede proyectar la evaluación analítica:

$$R \approx R_0 \left(C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta} + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \right) \quad (7.27)$$

Esta ecuación permite determinar la forma de equilibrio en planta de una playa afectada por la difracción – refracción. Los coeficientes C_i fueron dados por Silvestre y Hsu, 1993, los cuales se obtienen de la Gráfica 6-1, en el caso de R , $\beta = 90 - \alpha_{\min}$ y θ , se identifican en la Ilustración 7-8.



Gráfica 7-1, Coeficiente C1, C2, C3 en función del ángulo

La metodología propuesta por González para definir la forma en planta Ilustración 7-8 es la siguiente:

1. Determinar la orientación del flujo medio de energía en el punto de difracción.
2. Es necesario definir dentro de la zona afectada por la difracción el P_c de la línea de costa, dicho punto puede ser una imposición a priori (por ejemplo por una condición de anchura de playa), o puede ser consecuencia de una condición de contorno, por ejemplo, el máximo avance que puede tener la línea de costa en el apoyo contra un espigón, en cuyo caso será necesario inscribir el perfil.
3. Determinar aproximadamente la distancia entre el punto de difracción y la proyección de la dirección del flujo medio de energía.
4. Calcular la longitud de onda media, L asociada al período T_{S12} y a la profundidad media existente entre el punto de difracción y la futura línea de costa. El período T_{S12} es el correspondiente a la H_{S12} a través de la relación dada por la ROM para temporales.
5. Calcular el α_{\min} , correspondiente a Y/L , se debe utilizar la expresión (7.28), donde $\beta = 90 - \alpha_{\min}$ y los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 de la parábola de Silvester y Hsu (1993) Ilustración 7-8

$$\alpha_{\min} = \arctan \left[\frac{\left(\frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^2 Y}{2L} \right)}{Y/L} \right]; \text{ donde } \beta_r = 2.13 \quad (7.28)$$

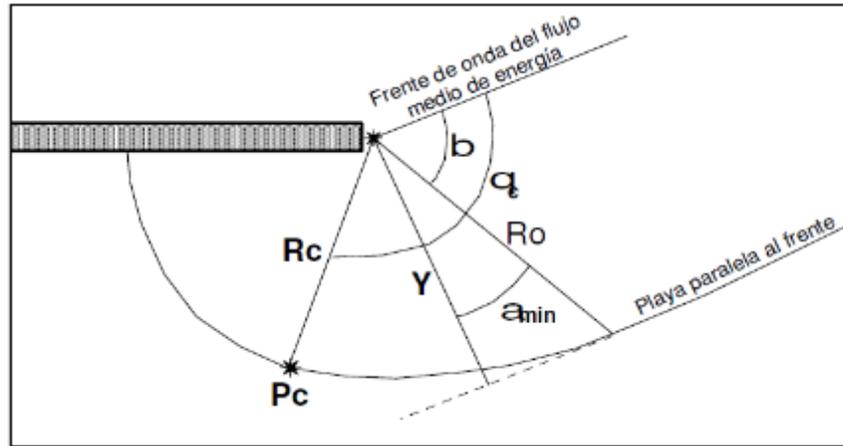


Ilustración 7-8, Definición de las variables para determinar la forma en planta de equilibrio.

6. Calcular el R_c y el θ_c correspondiente al punto P_c .
7. Aplicar la ecuación de la parábola de Silvestre y Hsu al punto P_c , Se deberá despejar el valor de R_0 para realizar las proyecciones:

$$R_0 = \frac{R_c}{C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta_c} + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta_c} \right)^2} \quad (7.29)$$

8. Dibujar el resto de la línea de costa, utilizando la parábola de Silvester y Hsu, entre $\theta = \beta$ y la estructura que provoca la difracción.

7.6.1.1 Predicción de la forma en planta de equilibrio debido a diques exentos

Los diques reducen efectivamente la cantidad de energía del oleaje incidente y se utilizan para modificar la forma de la línea de costa. González (1996) propuso extender la metodología propuesta para el estudio de la forma en planta de equilibrio generada por este tipo de estructuras, para el caso de incidencia normal del oleaje, parametrizando las soluciones obtenidas. Esta solución se representa en una serie de gráficas. En el caso de incidencia oblicua, la metodología se puede aplicar igualmente aunque no está parametrizada la respuesta. En el caso de incidencia normal la respuesta de la playa

puede presentar tres tipos de comportamientos distintos, tómbolo, saliente y dos salientes

Tómbolo, Ilustración 7-9: Las parábolas correspondientes a cada punto de difracción no se cortan y alcanzan el dique, que de esta manera queda unido a la playa.

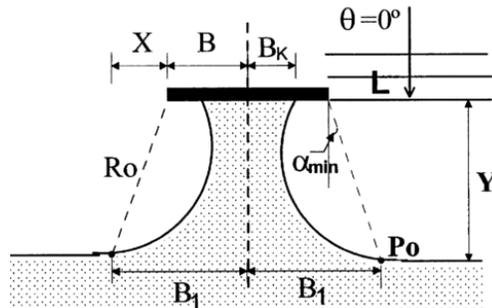


Ilustración 7-9, esquema del tómbolo.

Saliente, Ilustración 7-10: En este caso, las parábolas correspondientes a cada punto de difracción se cortan una vez, provocando un saliente en la playa.

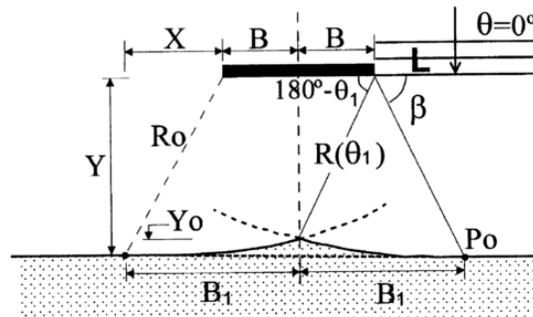


Ilustración 7-10, esquema de saliente.

Doble saliente, Ilustración 7-11: Las parábolas se cortan en dos puntos, generando un saliente en la playa y otro en el dique.

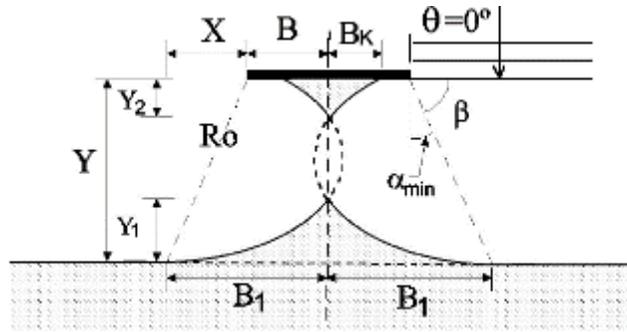
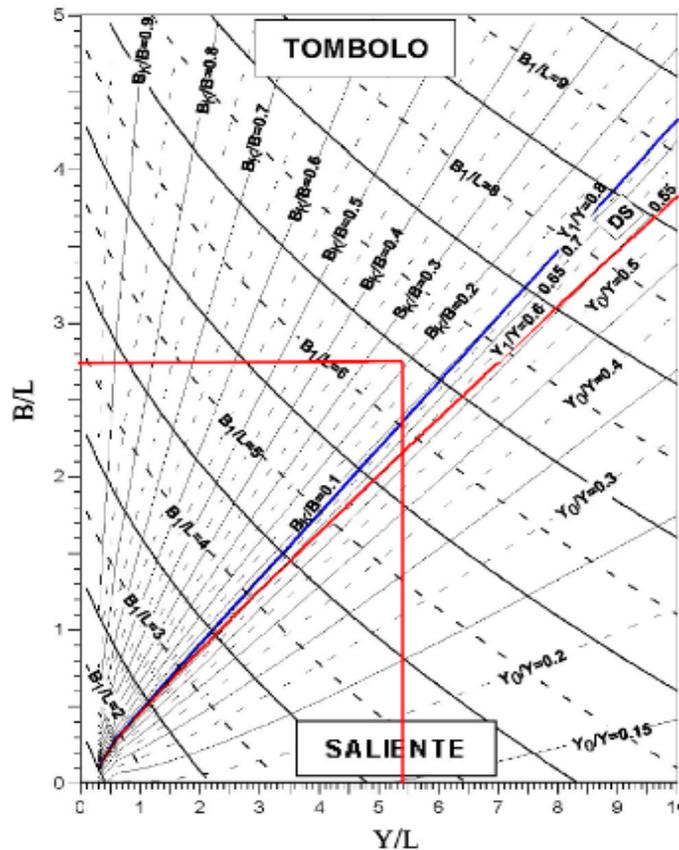


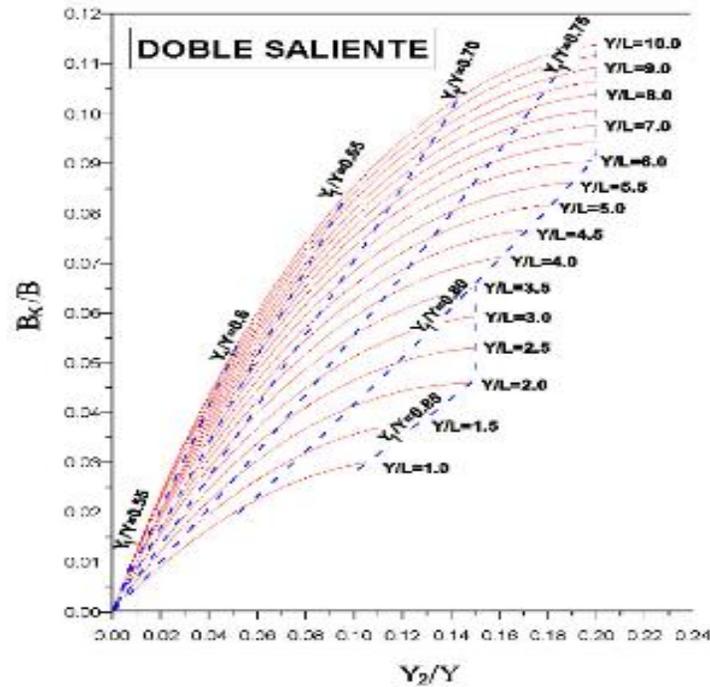
Ilustración 7-11, esquema de doble saliente.

En la Gráfica 7-2, se definen las características geométricas de las formas generadas. En el eje horizontal se dibuja la distancia adimensional desde el dique hasta la costa original, Y/L y en el eje vertical se dispone la semianchura adimensional del dique, B/L . Según donde se encuentren las coordenadas Y/L y B/L , tendremos tómbolo, doble saliente o saliente.



Gráfica 7-2, Características geométricas de tómbolos, dobles salientes y salientes

Cuando se presenta el caso en la zona de tómbolo, el gráfico suministra la semianchura adimensional de la playa en el dique, B_k/B y la semianchura del tómbolo en la playa, B_1/L . y si el resultado es en doble saliente, la Gráfica 7-3 indica la altura adimensional del saliente en la costa, Y_1/Y y la semianchura del saliente en la costa, B_1/L .



Gráfica 7-3, Determinación de las características geométricas de dobles salientes.

En los párrafos siguientes se muestra la solución del experimento numérico de (Nicholson *et al.*, 1997) el cual se describió en el apartado de validación del modelo numérico.

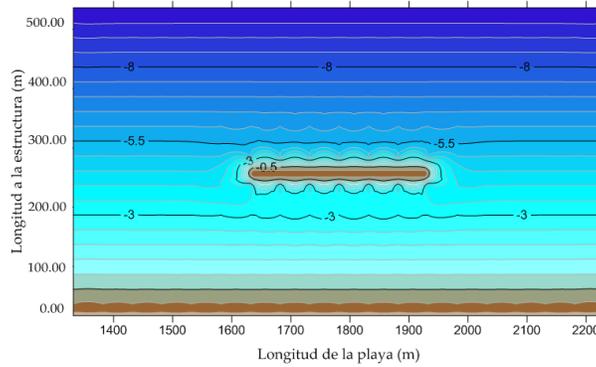


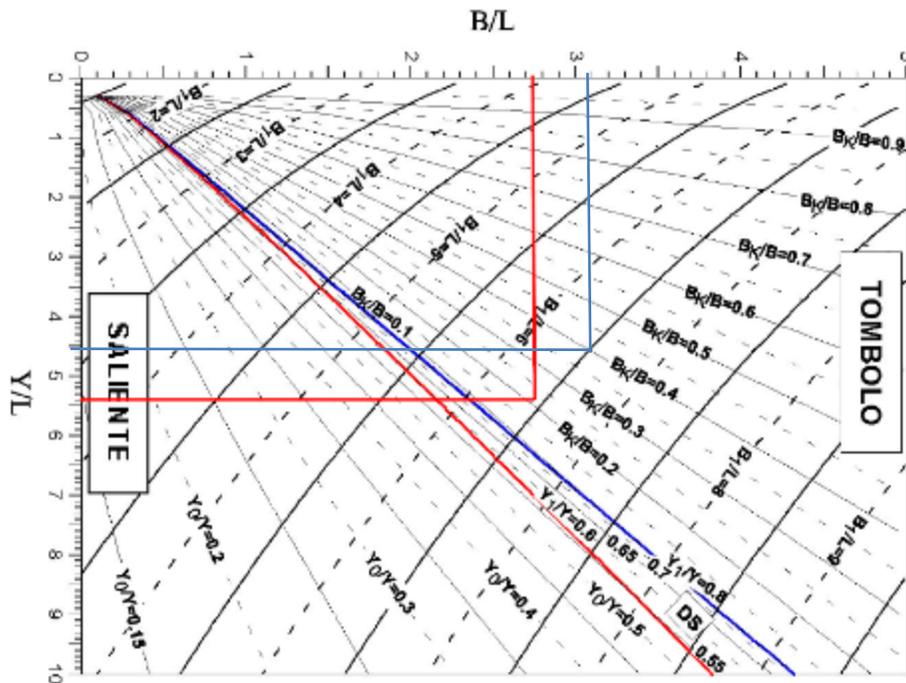
Ilustración 7-12, rompeolas paralelo a la costa

En la Ilustración 7-12 se puede observar un rompeolas paralelo a la costa, la forma de equilibrio de este tipo de estructura viene condicionada por el sistema de corrientes asociado a la rotura del oleaje, el sedimento existente y por el contorno o geometría, por lo cual el tipo de respuesta del sistema puede ser de tres tipos: tómbolo, saliente, doble saliente. Se utiliza Gráfica 7-2, para determinar las características geométricas que presentará el sistema. Es necesario calcular la relación $Y/L; B/L$ para obtener los resultados de la gráfica, para ellos, se utilizó un método interactivo, el valor de la longitud de onda.

Donde Y , es distancia de la ubicación de la estructura medida desde la costa, B es la longitud media del rompeolas. Entonces la relación será la siguiente:

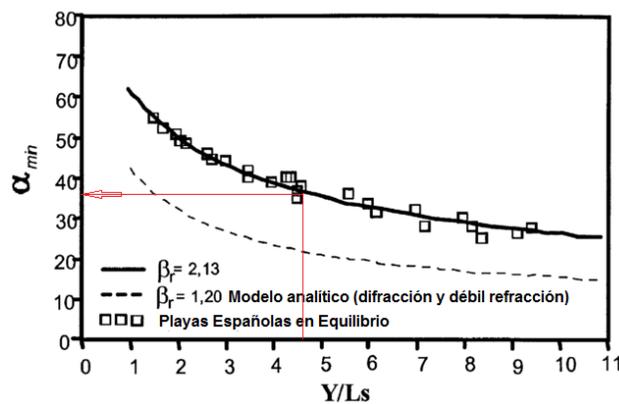
| Y | B | L | Y/L = | B/L |
|-----|-----|---------|---------------|---------------|
| 220 | 150 | 48.0057 | 4.5828 | 3.1246 |

Tabla 7-2, relación del diagrama geométrico.



Gráfica 7-4, Forma geométrica.

El valor encontrado en la Gráfica 7-4Gráfica 7-2, indica que la forma geométrica será un tómbolo (línea en azul), y la relación B_1 / L es 7.3, y B_k / B es 0.4. Después se calcula el α_{min} con la relación Y/L , la Gráfica 7-5 indica que el valor de $\alpha_{min} = 38$.



Gráfica 7-5, Ajuste α_{min} .

Con los datos obtenidos se estimaron las dimensiones geométricas que se determinaron la forma de equilibrio en planta.

| Relación | | | |
|----------|-----|----|--------|
| B1/L | 7.3 | B1 | 350.44 |
| BK/B | 0.4 | BK | 60.00 |

Con la información anterior se realizaron las proyecciones de la parábola y se calculó

$\beta = 90 - \alpha_{\min}$ y los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 , donde $\alpha_{\min} = 38$, por lo tanto el valor de

$\beta = 52^\circ$.

| β° | C_0 | C_1 | C_2 |
|---------------|--------|-------|--------|
| 20 | 0.054 | 1.040 | -0.094 |
| 22 | 0.054 | 1.053 | -0.109 |
| 24 | 0.054 | 1.069 | -0.125 |
| 26 | 0.052 | 1.068 | -0.144 |
| 28 | 0.050 | 1.110 | -0.164 |
| 30 | 0.046 | 1.136 | -0.186 |
| 32 | 0.041 | 1.166 | -0.21 |
| 34 | 0.034 | 1.199 | -0.237 |
| 36 | 0.026 | 1.236 | -0.265 |
| 38 | 0.015 | 1.277 | -0.296 |
| 40 | 0.003 | 1.322 | -0.328 |
| 42 | -0.011 | 1.370 | -0.362 |
| 44 | -0.027 | 1.422 | -0.398 |
| 46 | -0.045 | 1.478 | -0.436 |
| 48 | -0.066 | 1.537 | -0.473 |

| β° | C_0 | C_1 | C_2 |
|---------------|--------|-------|--------|
| 50 | -0.068 | 1.598 | -0.512 |
| 52 | -0.112 | 1.662 | -0.552 |
| 54 | -0.138 | 1.729 | -0.592 |
| 56 | -0.166 | 1.797 | -0.632 |
| 58 | -0.196 | 1.866 | -0.671 |
| 60 | -0.227 | 1.936 | -0.710 |
| 62 | 0.260 | 2.006 | -0.746 |
| 64 | -0.295 | 2.076 | -0.781 |
| 66 | -0.331 | 2.145 | -0.813 |
| 68 | -0.368 | 2.212 | -0.842 |
| 70 | -0.405 | 2.276 | -0.867 |
| 72 | -0.444 | 2.336 | -0.888 |
| 74 | -0.483 | 2.393 | -0.903 |
| 76 | -0.522 | 2.444 | -0.912 |
| 78 | -0.561 | 2.489 | -0.915 |

Tabla 7-3, Coeficientes C_0 , C_1 , y C_2 en función de β .

$$R_o = \frac{Y}{\cos \alpha_{\min}} = \frac{220}{\cos 32^\circ} = 707.507 \quad (7.30)$$

Se aplicó la ecuación de la parábola de Silver y Hsu al punto comienzo despejando los valores de R : (7.27)

Datos:

$\alpha_{\text{mín.}} = 38$

$\beta^\circ = 52$

$R_0 = 279.184$

| Radiaciones para determinar límites de azolves o erosión | | | | | |
|--|-------------|-----------|---------------------|-------------|-----------|
| \emptyset Directo | \emptyset | R | \emptyset Directo | \emptyset | R |
| 128 | 52 | 278.62564 | 68 | 112 | 150.94169 |
| 123 | 57 | 263.77449 | 63 | 117 | 144.51391 |
| 118 | 62 | 249.48998 | 58 | 122 | 138.50618 |
| 113 | 67 | 236.02411 | 51 | 129 | 130.73039 |
| 108 | 72 | 223.46095 | 44 | 136 | 123.61476 |
| 103 | 77 | 211.80088 | 37 | 143 | 117.08193 |
| 98 | 82 | 201.00385 | 30 | 150 | 111.0655 |
| 93 | 87 | 191.01188 | 23 | 157 | 105.50834 |
| 88 | 92 | 181.76093 | 16 | 164 | 100.36109 |
| 83 | 97 | 173.18702 | 11 | 169 | 96.911542 |
| 78 | 102 | 165.22927 | 8 | 172 | 94.925884 |
| 73 | 107 | 157.83131 | 6 | 174 | 93.635417 |

Tabla 7-4 Proyecciones de la forma del tómbolo.

Finalmente se dibujan las proyecciones hacia la línea de costa Ilustración 7-13.

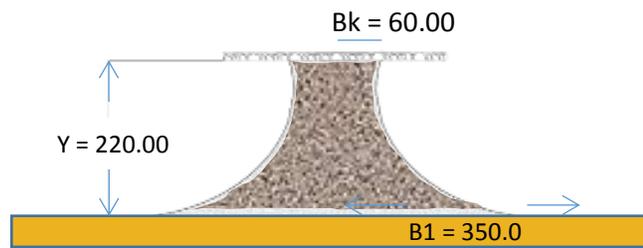


Ilustración 7-13, solución analítica.

La Ilustración 7-13 muestra los resultados obtenidos de la solución analítica, estos datos se comparan de manera cualitativa y cuantitativa contra los valores arrojados por SETRAD, para esto se realizaron simulaciones con resultados de diferentes pasos de tiempos, tratando de encontrar aquellos más semejantes a la solución de González.

La Ilustración 7-14 representa las variaciones espaciales y temporales de la playa con la presencia de un rompeolas paralelo a la costa. En la hora 24 se aprecia la tendencia de acumular sedimento en la zona de sombra, principalmente en la línea de costa; a partir de la hora 72 las condiciones se modifican, el transporte de sedimento se aprecia mejor, existe un pequeño desplazamiento de la línea de costa hacia la estructura, y acumulación del lado de la estructura hacia la costa. En la hora 360 se observa la tendencia de generarse una doble saliente, la línea de costa avanza, y hay acumulación de sedimento entre la estructura y el frente de playa.

En la hora 720 se aprecia la formación de un tómbolo, y el desplazamiento de la línea de costa; se analizó de manera particular este resultado contra los valores obtenidos de las formulaciones y diagrama de González y Medina. (2001)

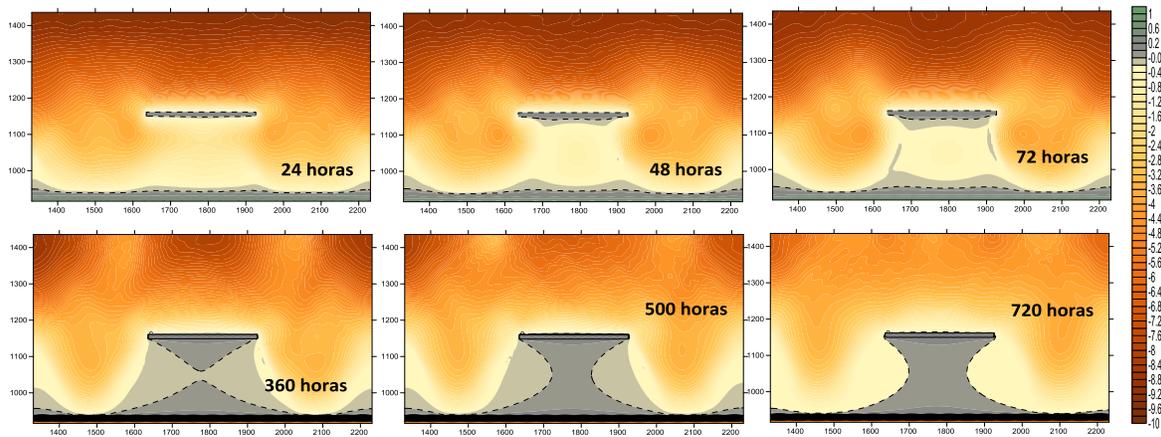


Ilustración 7-14, resultados de la simulación $t = 0$; $t = 720$ horas.

En la Ilustración 7-15 se sobreponen los resultados; Gonzáles Gonzales (años) (amarillo) y de SETRAD (gris) para ver las diferencias con mayor claridad, se compararon las dimensiones de B_l , B_k y Y .

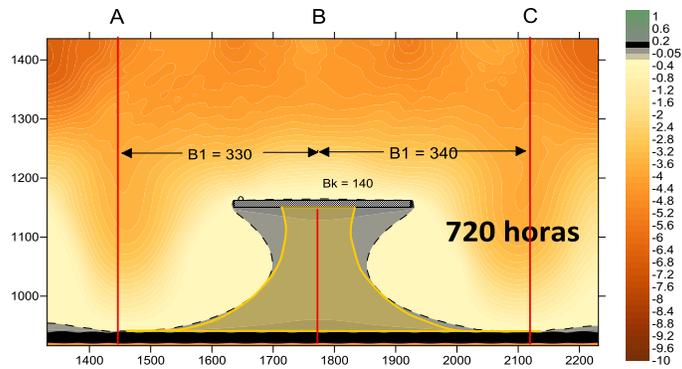


Ilustración 7-15, comparación entre los resultados analíticos y numérico.

La comparación de los resultados se hizo de manera cualitativa y cuantitativa; en relación a la manera cualitativa, se utilizó la misma escala. Con el cotejo de los resultados analíticos y del modelo numérico, se puede apreciar la similitud de los resultados; además se observa acumulación de sedimentos en la parte de sombras, así como el desplazamiento de la línea de costa y finalmente la formación del tómbolo.

Para determinar las diferencias cuantitativas se utilizaron tres ejes auxiliares denominamos A, B, C, resaltados con líneas en color rojo.

B_1 indica la distancia entre el eje A y B. La línea auxiliar B, refiere el centro de la estructura, ubicada en el eje $x = 1770$. La línea A = 1440, y la línea C = 2110.

$$B_{1_{izq}} = B - A = 1770 - 1440 = 330m \text{ izq.} \quad (7.31)$$

$$B_{1_{der}} = C - B = 2110 - 1770 = 340m \text{ der.} \quad (7.32)$$

Los resultados muestran que los datos de B_1 del modelo y la solución analítica son semejantes, pero en relación de las distancia Bk , se observa que el valor para Bk de la solución analítica es de 60 m, mientras que la del modelo numérico es de casi 140 m, una diferencia significativa. Al comparar los resultados, se puede confirmar que el modelo puede predecir la evolución morfológica, y que los parámetros seleccionados en el proceso de validación representaron una forma aceptable las condiciones de flujo como la relación entre las corrientes y el transporte de sedimento.

7.7 Caso de aplicación

En la simulación se utilizó la malla del puerto de Coatzacoalcos, se analizaron las condiciones hidrodinámicas del sistema. El oleaje empleado tiene una altura de ola de 1.5 m, un ángulo de incidencia de 20° con dirección norte, periodo de 6 s Ilustración 7-17



Ilustración 7-16 localización del puerto de Coatzacoalcos.

El tamaño de la malla es aproximadamente 5×9 km, con 531×927 celdas de 10×10 m. La malla es de forma rectangular, la cual se dimensiona con una base alrededor de 5 km a lo largo de la costa y una longitud de 9 km en dirección transversal.

Se simuló un dragado y se consideró que el vertido del material sería en el mar, así analizar los efectos del procesos morfológico y la hidrodinámica después del dragado, para ello se hicieron zanjas de dimensiones estándares, las cuales se caracterizaran por una longitud que es más grande que su anchura.

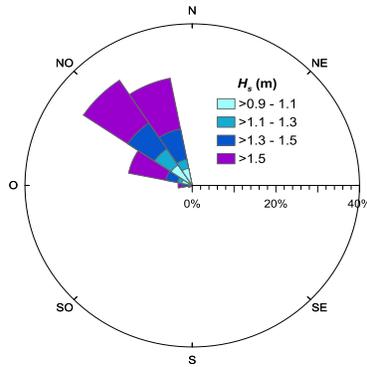


Ilustración 7-17, dirección y altura del oleaje.

La Ilustración 7-17 muestra la propagación del oleaje y la circulación de las corrientes; el oleaje se propagó de norte a sur, con un ángulo de incidencia de 20°, las mayores velocidades de corrientes se centran en la entrada al puerto junto a la escollera Este. Los resultados de la propagación del oleaje de aguas profundas a someras muestran los procesos de transformación que sufre el oleaje en su aproximación a la costa: asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y rotura.

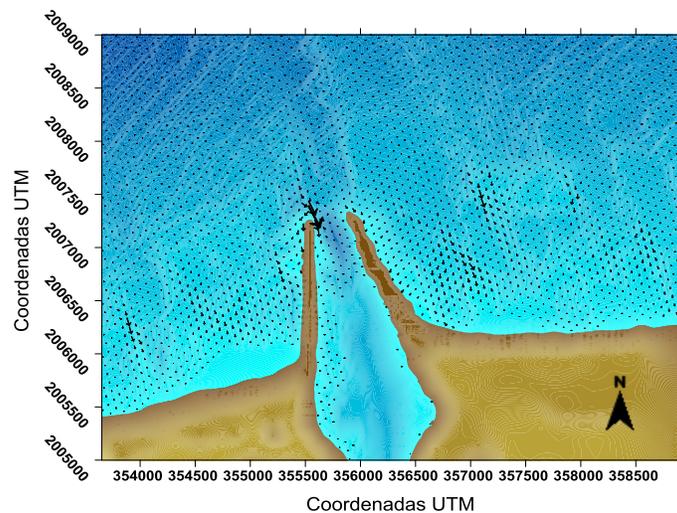


Ilustración 7-18, mapa de corrientes.

En cuanto a los resultados encontrados en la zona de vertido, se aprecian velocidades mayores en los costados de esta zona, siendo las de mayor intensidad las del margen izquierdo, de esta manera se produce transporte de sedimentos hacia la costa, y en pequeñas cantidades a la escollera derecha.

En la Ilustración 7-19, se muestran los tres casos de zanjas realizados (Batimetría original, Dos Zanjas, Zanja Exterior), en los cuales se hacen las propuestas de zanjas de dragado con diferentes ubicaciones y una combinación dentro de la zona de abrigo y lejos de la costa, las zanjas tendrán forma rectangular de una longitud L una anchura B.

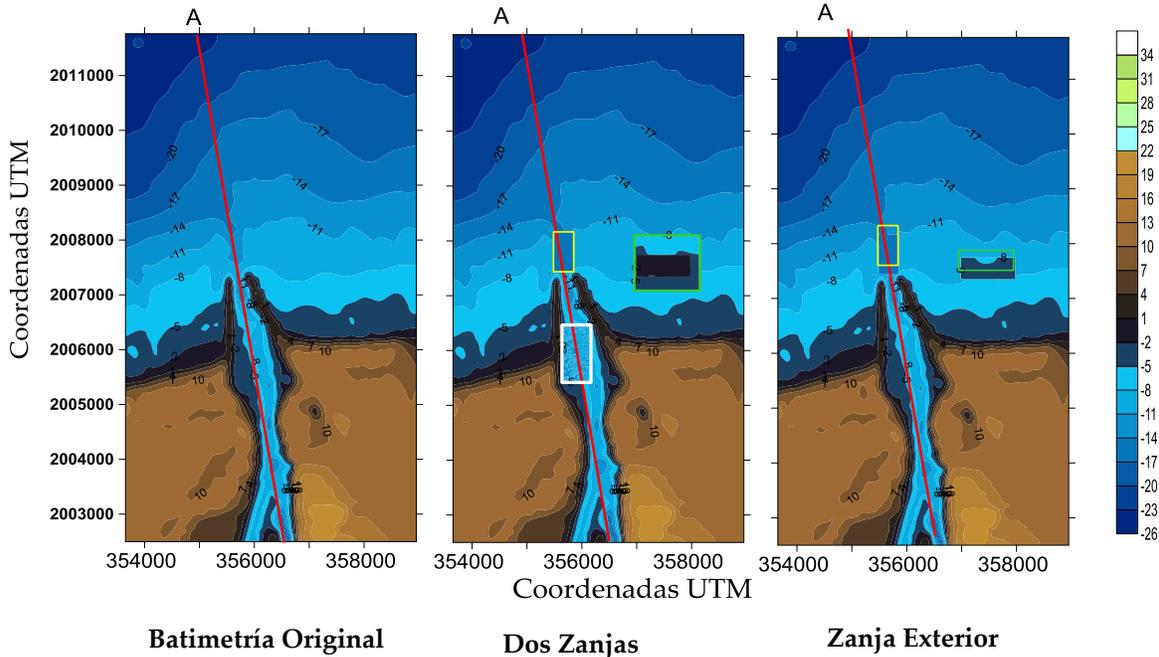


Ilustración 7-19, caso de aplicación en Puerto de Coatzacoalcos, Ver.

El primer caso se realiza el modelado con la batimetría original, la pretensión en esta simulación es ver el comportamiento normal del transporte de sedimento sin la influencia de dragados extras que pudieran incrementar la vida útil del canal de navegación. En el segundo caso se construye una zanja dentro del canal de acceso, el cual se indica con un recuadro blanco, y otra fuera de este, misma que se ubica cerca de las escolleras, y es representada por un recuadro amarillo. Con esta configuración de dragado, se pretende ver el beneficio que pudiera proporcionar un dragado al exterior del puerto. El caso Exterior se construye la zanja fuera del puerto, frente a las escolleras. Esto se realiza para ver la influencia en el transporte de sedimento al interior del puerto, la diferencia con el primer punto, es que al interior del puerto no se ha realizado dragado.

La ubicación de las zanjas se realizó considerando la ruta que emplean las embarcaciones portuarias al ingresar al puerto, la zona de vertido se situó considerando la profundidad y la dirección de transporte de sedimento.

El cuadro verde hace referencia al lugar donde se depositaron los sedimentos extraídos del fondo marino, este vertido se idealiza en forma de caída libre por apertura de fondo de la barcaza. Al finalizar la simulación, el modelo determina las nuevas condiciones hidrodinámicas a las que será sometido el sistema, y con ello el transporte de los sedimentos, la evolución morfológica y finalmente se calculará la nueva batimetría.

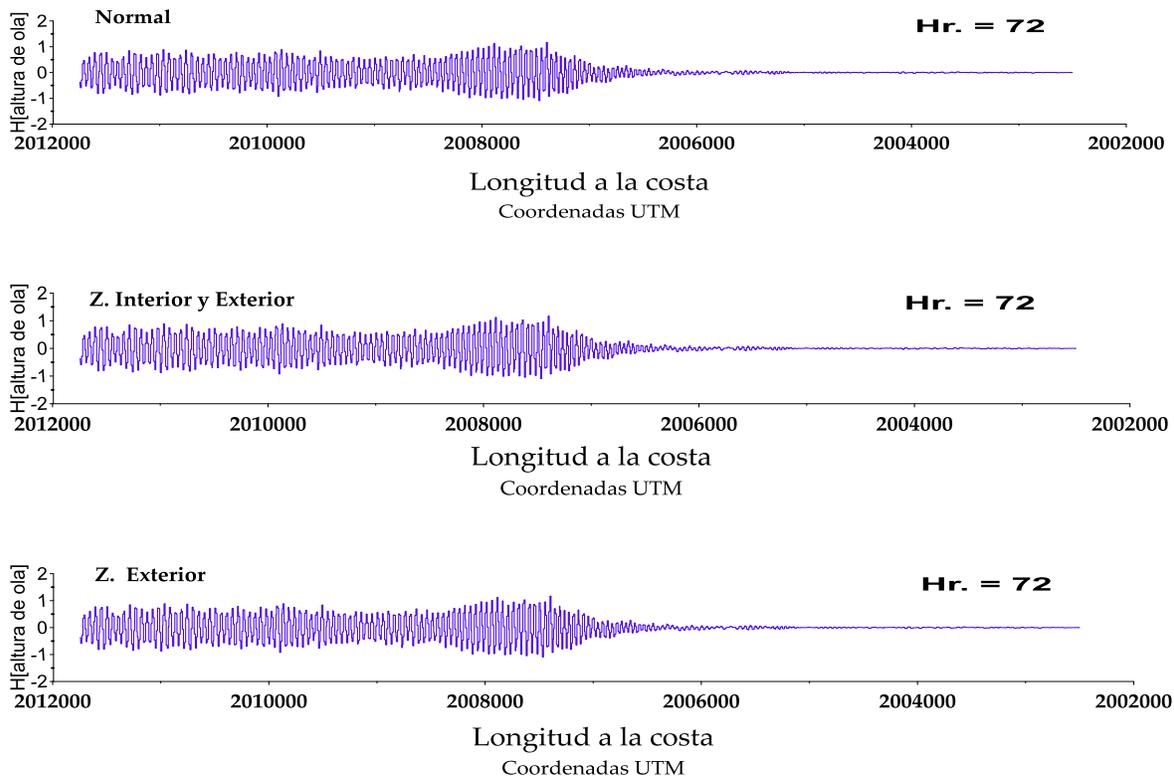


Ilustración 7-20, Perfil de oleaje

La Ilustración 7-20 indica la caracterización del perfil del oleaje, en los tres casos de aplicación se puede observar que el agrupamiento conserva el mismo comportamiento, independientemente de las modificaciones hechas al lecho marino, esto revela que la

profundidad presente en los tres casos influye de manera similar. Determinar el comportamiento del oleaje es relevante, pues éste puede llegar con gran cantidad de energía y generar resonancia en las estructuras o al interior del puerto, provocando perturbación e incluso el volteo de embarcaciones, así como la desestabilización de elementos de protección costera.

En la Ilustración anterior también se puede observar el incremento del oleaje en la longitud 200850 hasta 200750, debido al fenómeno de refracción, después de este tramo y por la presencia de las escolleras la energía del oleaje es reducida. Lo anterior se puede corroborar en la Ilustración 7-17, en ella se aprecia un incremento en las corrientes al margen izquierdo de la escollera longitud 200750.

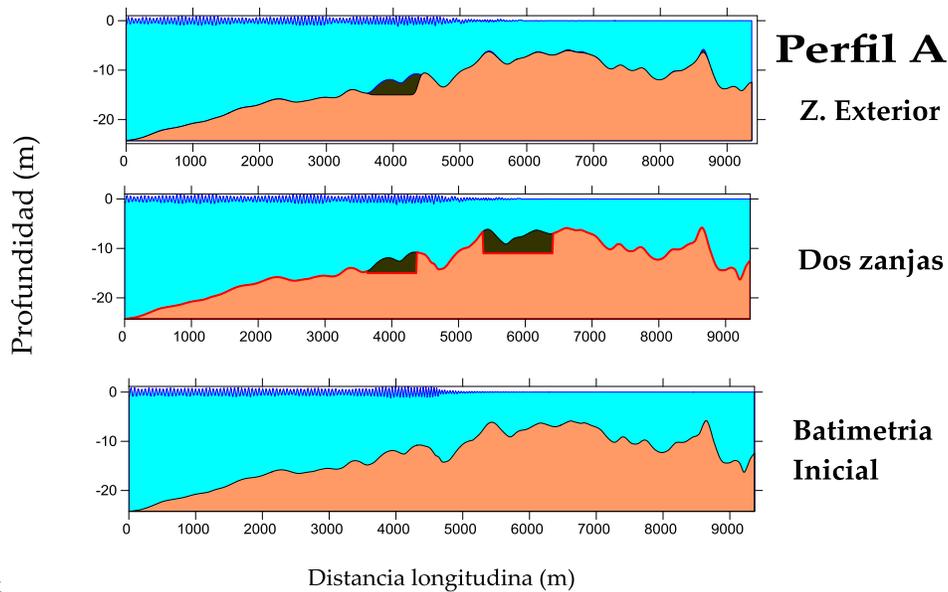


Ilustración 7-21, perfiles A de los casos a modelar.

En la Ilustración 7-21 se muestra el perfil de corte de los tres casos. En los tres perfiles, el color verde oscuro indica el área donde se realizó el dragado. El modelo realizó las simulaciones por 150 horas.

Los resultados obtenidos se presentan en la Ilustración 7-22, la cual muestra los perfiles con los componentes principales, longitud (m) en el eje x, y la variación de la profundidad en el eje Y (m), la línea roja, y la línea azul punteada indican la variación morfológica para los tiempos de 150 y 72 horas respectivamente, la línea azul continua indica la propagación del oleaje. En los tres casos, el comportamiento en los primeros cuatro mil metros muestra una pendiente estable, y la conservación del perfil de equilibrio en los tres casos. El caso que presenta la mayor acumulación de sedimento es el de Zanja exterior, seguido por el de dos zanjas, siendo el perfil de zanja interior el que mostró menos acumulación.

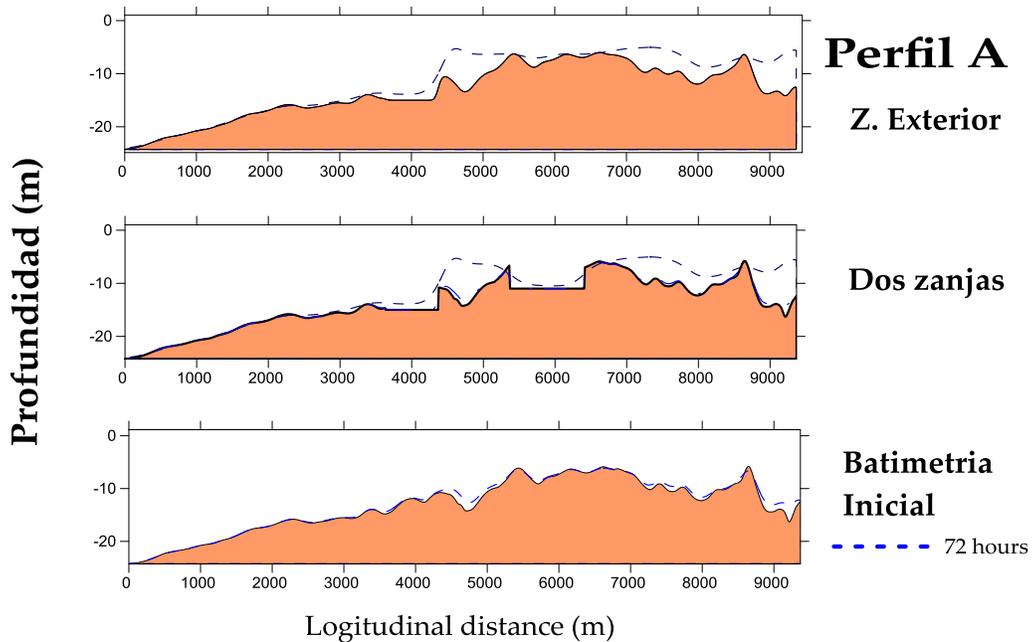


Ilustración 7-22, Perfil A con los resultados de las simulaciones de 300 horas.

La zanja interior mostró la menor acumulación dentro de su área de influencia, pero conforme el sedimento avanza a la costa, el asolvamiento es similar a los otros casos. En el caso de las dobles zanjas, se presentó el mayor asolvamiento, tanto en su zona de influencia como a lo largo del perfil. El último caso, zanja exterior muestra menor acumulación en todo el perfil, ya que al terminar el análisis se encontró menor variación en la profundidad.

Un punto a destacar es el azolvamiento presentado entre el cadenamiento 4000 y 5000, esto se debe a dos factores: el corte hecho por el dragado en la zona exterior del puerto (cadenamiento 4000), el cual amplifica la energía y con ello el esfuerzo constante se incrementa, por lo cual aumenta el transporte de sedimento; el otro factor es la configuración natural de la batimetría, ya que ésta presenta una forma de cuña, la cual acumula y atrapa el sedimento transportado.

CAPÍTULO 8

Aportaciones, Conclusiones, y Futura Línea de Investigación

APORTACIONES, CONCLUSIONES, Y FUTURA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

08

CAPÍTULO OCTAVO

8 Aportaciones, conclusiones, y futura línea de investigación

8.1 Aportaciones

El análisis y estudio del transporte de sedimentos, permitió desarrollar, validar y aplicar una nueva herramienta numérica que permite estimar la variación morfológica en recintos portuarios y playas. La herramienta permite analizar de manera cualitativa y cuantitativa la influencia que ejerce el dragado en la evolución morfológica, así como el vertido de los materiales cercanos a los puertos; esto ayuda a la optimización del dragado en puertos. A este modelo se le ha denominado *SETRAD* (*Sediment TRAansport for Dredging*); el cual está diseñado para simular, en el orden de semanas o meses, el transporte de sedimentos en recintos portuarios. *SETRAD*, cuenta con un módulo de topografía que simula el dragado, así determinar de manera más precisa la vida útil del dragado portuario. Asimismo se codificó en *FORTRAN* un módulo estadístico de predicción de oleaje, el cual permite estimar el clima de oleaje extremo; el modelo puede variar la altura de ola, la dirección del oleaje, el ángulo de incidencia, determinar la duración e intensidad de una tormenta si es que se presenta, números de eventos por mes. Esto es posible por el módulo estadístico, el cual genera las condiciones hidráulicas a la que estará sometido el sistema. Esto último es de gran utilidad ya que en la República Mexicana existe una gran carencia de monitoreo e información del clima marítimo en zonas costeras

8.2 Conclusiones

El sedimento es transportado principalmente por la acción conjunta entre el oleaje y las corrientes, en general el oleaje provee la energía para poner en suspensión al sedimento y las corrientes generan el transporte. Estos sedimentos son distribuidos por toda la línea costera y a su vez son ingresados en el recinto portuario, lo que lleva al detrimento de los canales de navegación y pone en riesgo la seguridad de las embarcaciones.

Actualmente muchos puertos acuden a la técnica de dragado para retirar el exceso de sedimento depositado en sus canales, las inversiones realizadas en este tipo de proyecto son altas, por lo cual es necesario buscar metodologías y herramientas que ayuden a mitigar los costos producidos por esta actividad, hacerlo reflejaría grandes beneficios a la industria portuaria.

Como se apreció en los primeros capítulos existe una relación muy estrecha entre el transporte de sedimentos y la morfología costera, de la misma manera entre el dragado y los sedimentos. Es por ello que se dio a conocer los procesos en que se relacionan, y sus inconvenientes.

La teoría indica que los puertos captan el sedimento fácilmente y que el proceso de asolvamiento se acelera si existe una fuente de aporte de sedimento cercana, tal es caso de una desembocadura de un río. Se puede concluir que existen configuraciones en la morfología que provocan cambios en la hidrodinámica del sistema, las cuales no son favorables a la vida útil del dragado.

Con base a la investigación documental y de campo, fue posible derivar que no todas las obras de dragado llevan un seguimiento al uso y manejo de los materiales contaminados, y que la mayoría de las empresas que realizan los trabajos de dragado se limitan a extraer el material y verterlo en las zonas indicadas en el contrato. Como se mencionó existe la técnica de uso rígido, este método es seguro y minimiza los impactos ambientales.

Los avances tecnológicos han logrado la construcción de embarcaciones cada vez más potentes y de mayor capacidad, tal es el caso de los equipos de dragado que se han convertido en grandes fábricas navieras de extracción de materiales. En la actualidad el dragado ha permitido el desarrollo en diferentes sectores como: la industria pesquera, portuaria y turística.

La implementación de los modelos evolutivos son de ayuda imprescindible en proyectos de ingeniería costera, éstos han tomado gran importancia y uso en los últimos años ya que permiten modelar el comportamiento de los sedimentos. En base a la predicción de estos modelos, es posible tomar decisiones con un mayor grado de certidumbre, y de esta manera apearse a las políticas de manejo de puertos y costas.

SETRAD se basa en el modelado de los procesos físicos que afectan a la playa, esta herramienta permite predecir los cambios hidrodinámicos a los que será sometido el sistema debido a las modificaciones hechas por el dragado, el ejemplo de la simulación con la batimetría del puerto de Coatzacoalcos destacó en la escollera izquierda la presencia de vórtices, así como mayor velocidad y transporte de sedimentos, estos resultados dan una idea del comportamiento que presenta el sistema con las condiciones establecidas. Al trabajar con datos reales se cuenta con información muy valiosa para evitar perturbaciones que pongan en riesgo la estabilidad y seguridad del puerto.

El análisis comparativo de las soluciones, tanto analítico como numérico, muestra un comportamiento similar en la dinámica de la playa, el cual tiende a la formación de un tómbolo. La diferencia, aunque podría pensarse que depende sólo del tiempo de modelación, depende de que la solución analítica considera disponibilidad de sedimento y cambios nulos en el entorno físico (batimetría en las cercanías de la estructura). Con esto se puede destacar que el modelo mostró potencial para ser una herramienta útil en la ingeniería portuaria.

Las zanjas en zona la de navegación demostraron que la deformación y la migración del sedimento dependen de la hidrodinámica y la morfología, y ésta a su vez de la geometría de la zona. Considerando los resultados se comprueba que una mala configuración al momento de realizar un dragado puede ocasionar resultados perjudiciales para la vida útil de éste; por ello es importante implementar modelos que permitan predecir el comportamiento y los cambios hidrodinámicos del sistema debido al dragado.

Utilizar modelos numéricos permite realizar estudios rápidos y extensos de los efectos en la variación de las características morfológicas de la zona de estudio, así como facilitar la comprensión de las condiciones hidrodinámicas.

8.3 Futura línea de investigación

En el desarrollo de este trabajo fue necesario acotar los temas sobre el dragado, así como la forma en que éstos serían abordados, ya que es difícil profundizar en su totalidad la gran gama de temas que existen en la industria del dragado. Sin embargo, la información generada constituye una muy buena base de partida para futuros estudios, trabajos, proyectos científicos y de ingeniería; no obstante, hay mucho por hacer. Se puede realizar investigación sobre los nuevos equipos de dragado, los cuales trabajan a grandes profundidades, estas dragas principalmente se utilizan para la extracción de minerales.

En el tema de transporte de sedimentos, será oportuno analizar cómo las diversas configuraciones, que sirven para retener de manera focalizada el material que llega al interior del puerto, influyen en el incremento de las corrientes y éstas a su vez, amplifican el transporte de sedimento.

El modelo permite analizar el tema de resonancia en puertos, por lo que este sería un buen punto de partida para establecer recomendaciones de diseño.

Unas de las pruebas convenientes, es desarrollar e implementar la interacción del modelo con estructuras no necesariamente rectas, ni perpendiculares a la playa; así como la presencia de más de una de ellas, una batería de espigones. Esto sería útil en el análisis de la línea de costa y en el estudio de sistemas de espigones que sirven para la protección de las playas. Finalmente promover y adecuar este tipo de modelos como herramienta de análisis en la planeación de proyectos de ingeniería costera y portuaria.

9 REFERENCIAS

- (EXSA), 1989. Manual Practico De Voladura. J. Chem. Inf. Model. 4, 160.
doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Bailard, J. a., Inman, D.L., 1981. An energetics bedload model for a plane sloping beach: Local transport. J. Geophys. Res. 86, 2035.
doi:10.1029/JC086iC03p02035
- Balderas Pérez, G., 2007. Revisión y análisis de aspectos técnicos y administrativos de la obra de dragado de mantenimiento en el puerto de Dos Bocas, Tabasco. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Benites Domínguez, N.N., 2008. proyecto de inversión en el servicio de dragado del canal de acceso del puerto marítimo de guayaquil a través de una concesión privada. Escuela Superior Politécnica Del Litoral.
- Bray, R.N., Bates, A., Land, J.M., 1997. Dredging: a handbook for engineers.
- Brea, J.D., Balocchi, F., 2010. Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas. UNESCO, Chile.
- Brokers, D., 2016. Dredge Brokers, Mechanical Dredgers [WWW Document]. URL <http://www.dredgebrokers.com/mechanical-dredgers>
- Brokers, D., 2005. Dragas, y Equipo de Dragado Usado, Bombas, Barcos de Trabajo, Barcazas. [WWW Document]. URL <http://www.dredgebrokers.com/>
- Comisión nacional de estrategias de Marinas, 2015. Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre. Minist. Agric. Aliment. y medio Ambient. 173.
- Costas, G. de I.O. y de, 2015. Modelo de evolución del perfil transversal de playa. MANUAL DEL USUARIO. Petra 3.0. G.I.O.C. Cantabria.
- Dabees, M., Kamphuis, W.J., 1998. Oneline, a Numerical Model for Shoreline Change. 26th Coast. Eng. Conf. 2668–2681.

doi:<http://dx.doi.org/10.1061/9780784404119.202>

Darling, P., 1992. Thermal Fragmentation and Excavation, Vol. 1. ed. SME Mining Engineering Handbook.

Dredg, 2016. Dredging [WWW Document]. URL http://www.gzbgj.com/english/article.aspx?menuid=1437&tab=tab_e&tabid=1396

Elena, I.Q.L., Valladares, V., 2009. Jurado Asignado :

EPA, 2004. Evaluating Environmental Effects Of Dredged Material Management Alternatives -- A Technical Framework. Framew. Dredged Mater. Manag. EPA842-B-92-008 1-77. doi:EPA842-B-92-008

Escalante, I. R.S., 2007. Ingeniería de Dragado, Draga de succión por arrastre.

González, M., Medina, R., González-Ondina, J., Osorio, A., Méndez, F. J., & García, E., 2007. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. Comput. Geosci. 33, 916-931. doi:10.1016/j.cageo.2006.12.005

González, M., Medina, R., 2001. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. Coast. Eng. 43, 209-225. doi:10.1016/S0378-3839(01)00014-X

Guillermo, M.M., 1999. Ingeniería Marítima y Portuaria, Alfaomega. ed.

Hammers, G.H.S., 2007. Hydraulic Hammer Operators Manual.

Hans Hanson, N.C.K., 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Report 1. Technical Reference (No. CERC-TR-89-19-1). Coast. Eng. Res. Cent. Vicksbg. MS 247.

Hanson, H., Aarninkhof, S., Capobianco, M., Jiménez, J.A., Larson, M., Nicholls, R.J., Plant, N.G., Southgate, H.N., Steetzel, H.J., Stive, M.J.F., Vriend, H.J. de, 2003. Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decadal Time Scales. J. Coast. Res. VO - 19 19, 790.

- Hanson, H., Connell, K.J., Larson, M., Nicholas, C., Beck, T.M., Frey, A.E., 1920. Coastal evolution modeling at multiple scales in regional sediment management applications. Eng. Res. Dev. Cent. Vicksbg. MS Coast. Hydraul. LAB.
- Hanson, H., Kraus, N.C., 1990. Shoreline response to a single transmissive detached breakwater. Coast. Eng. Proc. 1, 2034–2046. doi:10.9753/icce.v22.%p
- Hel, P.S., 1998. Dredged material management guide.
- Hsu, J., Evans, C., 1989. Parabolic bay shapes and applications..pdf. Proc. Inst. Civ. Eng. 557–570.
- Kamphuis, J.W., Davies, M.H., Nairn, R.B., Sayao, O.J., 1986. Calculation of littoral sand transport rate. Coast. Eng. 10, 1–21. doi:10.1016/0378-3839(86)90036-0
- Lackey, T., Macdonald, N., 2007. The Particle Tracking Model: Description And Processes. Proc. XVIII World Dredg. Congr. 551–566.
- Larson, M., Kraus, N., 1989. SBEACH: Numerical Model For Simulating Us Army Corps Of Engineers. Office. Office.
- Lavalle Argudin, M., 1972. Manual de Dragado, Secretaria de Marina. México, DF.
- López Jimeno, C., 2006. Manual de tronadura ENAEX S.A. 274.
- Losada, I.J., Medina, R., Losada, M.A., 1995. Modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos 2, 99–118.
- Marine, E., 2015. Marine Dredging [WWW Document]. URL <http://www.eastmarine.com.sg/marine-dredging/>
- Martinez Barrón, J., Salamanca Mora, A., 2008. Dragado En Puertos Maritimos. Inst. Politec. Nac. doi:Tesis de Ingenieria Civil
- Masselink, G., Short, A.D., 2016. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. J. Coast. Res. 9, 785–800.
- Melrose, J., Perroy, R., Careas, S., 2015. Dredging A Handbook for Engineers.

- Statew. Agric. L. Use Baseline 2015 1. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948. Formulas for bed-load transport. IAHR 14.
- Moreno, L.J., Kraus, N.C., 1999. Equilibrium Shape of Headland-Bay Beaches for Engineering Design. Proc. Coast. Sediments '99 860, 860–875.
- Nam, P.T., Larson, M., Hanson, H., Hoan, L.X., 2011. A numerical model of beach morphological evolution due to waves and currents in the vicinity of coastal structures. Coast. Eng. 58, 863–876. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.05.006
- Nicholson, J., Broker, I., Roelvink, J.A., Price, D., Tanguy, J.M., Moreno, L., 1997. Intercomparison of coastal area morphodynamic models. Coast. Eng. 31, 97–123. doi:10.1016/S0378-3839(96)00054-3
- Nielsen, P., 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. World scientific.
- NOM-002-SCT4-2013, 2017. NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SCT4-2013, Terminología Marítima-Portuaria. D. Of. Segunda Se, 1–34.
- NPK, C.E., 2012. HAMMERS Hydraulic Breaker Operating Manual.
- OOrd, V., 2015. Dragas y equipos [WWW Document]. URL <http://www.vanoord.com/dredging>
- Ortiz Sánchez, O., Giraldo Paredes, E.M., 2009. Explotación minera sin voladura 12, 117–126.
- Ousley, J.D., Schroeder, P.R., Bailey, S., Lang, M.J., Kennedy, A., 2016. Ocean Dredged Material Disposal Site (ODMDS) Authorization and Short-Term FATE (STFATE) Model Analysis.
- Pechon, P., Teisson, C., 1996. Numerical Modeling Of Bed Evolution Behind A Detached Breakwater. Coast. Eng. Proc. 25, 1577–1582. doi:10.1016/B978-0-323-04579-7.00159-3
- Pedrozo Acuña, A., 2011. Docencia Procesos costeros y morfodinámica de playas, Instituto. ed. Unidad de Promoción y Comunicación, México, DF.

- Peeck, H.H., Proctor, R., Brockmann, C., 1982. Operational storm surge models for the North Sea. *Cont. Shelf Res.* 2, 317–329. doi:10.1016/0278-4343(82)90024-3
- Raúl, E., 2008. Tema 13 otras dragas.
- Raúl, E., 2007. Ingeniería de dragados, Draga Dustpan RAUL S .
- Raúl, E., n.d. Técnicas de dragado hidrodinámico.
- Rijn, B.L.C. Van, 1987. Sedimentation of dredged channels by currents and waves 112, 541–559.
- Roos, P.C., Hulscher, S.J.M.H., de Vriend, H.J., 2008. Modelling the morphodynamic impact of offshore sandpit geometries. *Coast. Eng.* 55, 704–715. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.02.019
- RX, M.H., 2010. Excavadoras el día de Hoy Portadora con herramientas multipropósito.
- Sánchez, J.S., 2017. Exposiciones Virtuales de la FNB [WWW Document]. *Bibl. la Fac. Náutica Barcelona*. URL <http://biblioteca.upc.edu/FNB/>
- Shields, A., 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung.
- Shimizu, T., Kumagai, T., Watanabe, A., 1996. Improved 3-D beach evolution model coupled with the shoreline model (3D-SHORE). *Coast. Eng.* ... 2843–2856.
- Silva, R., Baquerizo, A., Losada, M.Á., Mendoza, E., 2010. Hydrodynamics of a headland-bay beach-Nearshore current circulation. *Coast. Eng.* 57, 160–175. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.10.003
- Silva Casarín, R., 2008. Manual Del Usuario Y Guía De Referencia del programa MWAPO3, Instituto de Ingeniería. México D.F.
- Soulsby, R., 1997. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications.
- Soulsby, R., Whitehouse, R., 1997. Threshold of sediment motion in coastal environments, in: *Pacific Coasts and Ports' 97: Proceedings of the 13th*

- Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harbour Conference; Volume 1. Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, p. 145.
- Sunamura, T., Takeda, I., 1984. Landward migration of inner bars. *Mar. Geol.* 60, 63–78.
- Sutton, A. P., Finnis, M. W., Pettifor, D. G., & Ohta, Y., 1988. The tight-binding bond model. *J. Phys. C Solid State Physics*, 35.
- Thach, N.N., Truc, N.N., Hau, L.P., 2007. Studying shoreline change by using LITPACK mathematical model (case study in Cat Hai Island, Hai Phong City, Vietnam)., *Earth Sci.* 23, 9.
- Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, 1006th ed. Aqua publications Amsterdam.
- Van Rijn, L.C., 1985. Sediment Transport, Part III: Bed forms and Alluvial Roughness. *J. Hydraul. Eng* 110, 1733–1754.
- Van Rijn, L.C., 1984. Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *J. Hydraul. Eng.* 105, 1613–1641.
- Wright, L., Short, A., Nielsen, P., 1982. Morphodynamics of High Energy Beaches and Surf Zones: A Brief Synthesis. SYDNEY UNIV Coast. Stud. UNIT 3.
- Yaacov Nir, 1982. Offshore artificial structures and their influence on the israel and sinai mediterranean beaches. *Statew. Agric. L. Use Baseline* 2015 1, 1837–1856. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Zheng, J., Dean, R.G., 1997. Numerical models and intercomparisons of beach profile evolution. *Coast. Eng.* 30, 169–201. doi:10.1016/S0378-3839(96)00040-3