

ESTUDIOS GEOFÍSICOS REALIZADOS EN LA BAHÍA DE CIENFUEGOS EN LAS ÁREAS MARINAS DEL PROYECTO “INGENIERÍA CONCEPTUAL-SEGUNDA ETAPA DE EXPANSIÓN REFINERÍA CAMILO CIENFUEGOS”

Idoris Alfonso Santiesteban, Gustavo Godínez Barrera, Jose R. Gabilondo Márquez y Yamel Hernandez Durañona

GEOCUBA Estudios Marinos. Punta Santa Catalina, Regla, CP 112000, Ciudad de La Habana, Cuba. Telef: 797-7575, Ext.114 y 107, Fax: 797 0019. E-mail: idoris@emarinos.geocuba.cu, gem@emarinos.geocuba.cu

RESUMEN

Se recogen en este trabajo, los resultados de las investigaciones geofísicas para la fase de ingeniería conceptual en la segunda etapa de expansión de la refinería Camilo Cienfuegos. Se estudia el emplazamiento de la nueva Terminal de carga de Coque y Azufre sólido, que será construida cerca de los muelles existentes de la refinería así como las condiciones para el dragado en la dársena de maniobra.

El trabajo realizado fue un levantamiento sismoacústico que abarca el área marina prevista para emplazamiento del muelle y las zonas aledañas para el dragado de la dársena, utilizando para ello un sistema de perfilaje sismoacústico de reciente adquisición, considerado de alta tecnología en el mercado mundial procedente de la firma APPLIED ACOUSTICS ; el cual posee un rango de frecuencias desde 400 Hz a 2400 Khz. y una potencia de 300 joules, que permite obtener una relación resolución/penetración adecuada en las diferentes capas o estratos que subyacen el fondo marino. Las ventajas del sistema de adquisición digital permiten realizar además trabajos de post-procesamiento para elevar la precisión y calidad de los registros y con ello obtener los resultados, en especial en aquellas áreas donde las ondas acústicas son absorbidas en gran parte por la presencia de sedimentos con alto contenido de hidrocarburos u otros elementos como es nuestro caso en la zona del canal.

El aporte fundamental de los resultados, es que brinda un conocimiento general del comportamiento de los horizontes geológicos para la ubicación prevista de la estructura de atraque de Coque y Azufre que permite ubicar las perforaciones en los futuros sondeos geotécnicos en el proyecto ejecutivo del muelle. De la misma manera, el estudio realizado permite determinar las áreas necesarias a dragar para alcanzar la rasante de dragado de -14 m en la dársena de maniobra y la ubicación de las perforaciones que permitirán dictaminar el tipo de suelos y su clasificación para este fin. Como resultados también se propone la ubicación de dichas perforaciones para ambos objetivos (emplazamiento y dragado).

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo exponer los resultados alcanzados en las investigaciones geofísicas realizadas para la fase de ingeniería conceptual en la segunda etapa de expansión de la Refinería Cienfuegos para alcanzar los 150.000 barriles por día. Estos trabajos solicitados por **PDV CUPET** tuvieron la finalidad de determinar las características del corte geológico con vistas al emplazamiento previsto de la nueva Terminal de carga de Coque y Azufre sólido, que será construida cerca de los muelles existentes de la refinería, así como determinar las profundidades de yacencia de los horizontes reflectores con vistas al dragado en la dársena de maniobra a fin de alcanzar la rasante de dragado de -14m, así como proponer las ubicaciones de los sondeos geotécnicos a realizar en la fase de proyecto ejecutiva.

La zona de estudio se ubica dentro de la Bahía de Cienfuegos (Figura 1 y 2), específicamente en el interior de la misma donde se encuentra la refinería, abarcando las áreas de:

- El muelle para Carga de Coque y Azufre – dentro de la Bahía, se localiza cercano a la Refinería, al este del Terminal de Líquidos existente (Muelles N° 1 y N° 2). Su ubicación exacta, aún pendiente, será definida en la primera fase de la Ingeniería Conceptual actualmente en desarrollo. (Ver Fig. 1 y 2)
- El área para el dragado, se corresponde con la dársena de maniobra de la actual refinería.



Figura 1 Imagen aérea macro localizando en la bahía de Cienfuegos la ubicación del muelle previsto, aledaño a la instalación de atraque ya construida en la refinería y dársena de maniobra.



Figura 2 Ubicación preliminar del muelle al este del Terminal de Líquidos existente en la refinería y localización del área de estudios batimétricos y geofísicos con las líneas sísmicas previstas.

Para cumplimentar estos objetivos de investigación fue empleado un sistema de perfilaje sismoacústico de reciente adquisición procedente de la firma APPLIED ACOUSTICS considerado de alta tecnología en el mercado mundial procedente de la firma APPLIED ACOUSTICS; el cual posee un rango de frecuencias desde 400 Hz a 2400 Khz. y una potencia de 300 joules, que permite obtener una relación resolución/penetración adecuada en las diferentes capas o estratos que subyacen el fondo marino.

Dentro de las características geográficas generales de la zona de estudio podemos resumir que el puerto de Cienfuegos está situado en la bahía del mismo nombre, en la costa sur de la provincia de Cienfuegos, aproximadamente al centro de la isla de Cuba, a 211 millas náuticas al NW de cabo Cruz. La bahía en su interior se divide en dos bolsas la del NW donde está enclavado el puerto, y la del SE de costas mas bajas y de acceso mas limitado.

En general sus costas son altas en muchas partes y cubiertas por vegetación. En la costa de la bahía desembocan los ríos Arimao, Damují, Salado y Caonao. La bahía tiene 8 millas náuticas de longitud de N a S y aproximadamente 5.4 millas náuticas de ancho. El canal de entrada nace entre las puntas de las Coloradas y de Sabanilla, tiene una longitud de 3,5 millas náuticas y su parte más estrecha es de 278 m. Las costas son altas y cubiertas en parte por vegetación. El tramo del canal en la zona de Pasacaballos, es la zona más difícil para la navegación. Las corrientes de marea son más fuertes en el tramo comprendido entre Punta Coloradas y Cayo Carenas. En época de lluvia, la crecida de los ríos se suma a la marea aumentando sus efectos. En el tramo de Pasacaballos se sienten los mayores efectos de las corrientes, por lo que se regulan las entradas y salidas de los buques teniendo en cuenta la eslora y calado de los mismos para las diferentes condiciones de mareas. La pleamar mas baja promedio es de 0,2 m y la bajamar mas baja promedio es de 0,1 m (Punta Coloradas). Los vientos predominantes son del NE y el SE con velocidades entre 6 y 9 nudos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Perfilaje Sismoacústico de Reflexión de Alta Resolución, es una de las técnicas bien establecidas y frecuentemente utilizadas en las investigaciones marítimas, en ocasiones considerada imprescindible en este campo, ya que es una de las técnicas geofísicas marinas que aporta un cuadro más detallado de la estructura geológica del subsuelo marino. Se basa en el principio físico de la reflexión de la señal acústica cuya principal ventaja estriba en que brinda una imagen continua de las estructuras del subfondo (siempre que entre estas exista un marcado contraste de densidades).

El alcance de este trabajo en el estudio del corte litológico esta determinado por las posibilidades del método en delimitar la frontera de separación entre los sedimentos sueltos y los consolidados, o limites de contacto entre rocas y sedimentos.

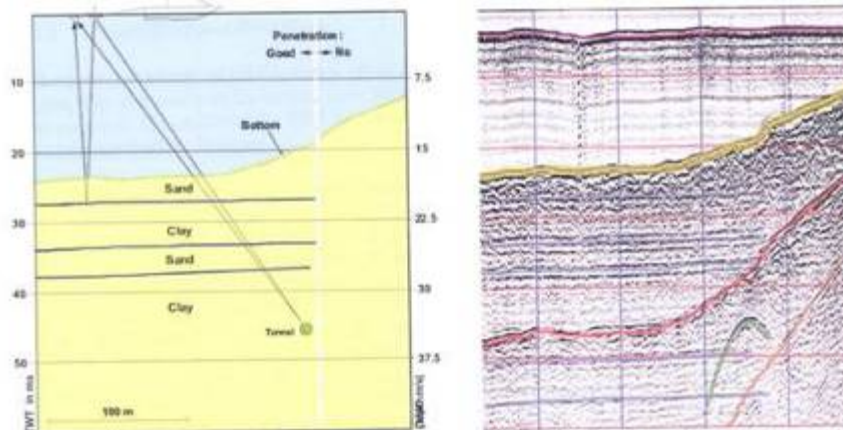


Figura 3 Esquema teórico básico y resultados típicos de la sísmica de reflexión en un perfil de sedimentos.

Se utilizo en este trabajo un sistema de perfilaje sísmico de la firma **APPLIED ACOUSTICS, CODA DA 2000**, el cual esta constituido por 4 módulos fundamentales (Figura 4), el cual trabaja con un rango de frecuencias desde 400 Hz a 2400 kHz y una potencia de 300 joules, para la obtención de una relación resolución/penetración adecuada en las capas del subsuelo, en un área con profundidades de medias a bajas. Los datos obtenidos en este son almacenados en un sistema integrado geofísico de adquisición y procesamiento digital.

Este sistema fue instalado a bordo de una embarcación de 2.5 m de calado y se trabajo a una velocidad de 3 nudos. La alimentación se tomo desde un generador portátil de 5 Kv. El boomer fue utilizado como fuente de emisión de pulsos cortos y de alta energía que garantiza una adecuada

relación entre resolución y penetración. Durante la adquisición se utilizaron energías desde 300 Joules hasta 100 joules para las zonas bajas tratando de disminuir las reflexiones múltiples. El intervalo entre disparos se aplicó entre 500 mseg y 250 mseg y la extensión del barrido estuvo entre 40 y 64 mseg. Se registró con una banda de filtrado entre 800 Hz y 2400 Hz y posteriormente durante el procesamiento se aplicaron diferentes bandas de filtros, mezclado de las señales, variación de ganancia en el tiempo y otras técnicas para mejorar la calidad del registro.

Este sistema de perfilaje recibió directamente la señal de GPS, y los pings de adquisición de datos a lo largo de todo el registro están correspondientemente georeferenciados, independientemente de que como se explicó anteriormente los cursos de navegación se controlaban desde el software de navegación **GEONAV**, el cual recibía la señal desde el mismo GPS.



Unidad de almacenamiento y transmisión de energía para los pulsos acústicos **CSP-D** y Boomer **AA 300**



Sistema de remolque de la fuente boomer y el hidrofono mediante mástil lateral en la banda de la embarcación



Sistema de adquisición y procesamiento **CODA DA 2000** instalado en la cabina de la embarcación utilizada, con una pantalla para el control de los parámetros técnicos y otra para la visualización de los datos que se van adquiriendo.

Figura 4 Disposición del sistema CODA a bordo de la embarcación y sistema de remolque de los sensores.

Los trabajos de mar comenzaron con la ejecución de los trabajos experimentales o de reconocimiento, los cuales tienen como objetivo determinar la geometría y los parámetros óptimos de medición con el perfilador sismoacústico en la zona de estudio. A partir de estos, se definió el espaciamiento óptimo entre los perfiles, la distancia transmisor-receptor, las direcciones adecuadas de levantamiento, los filtros a utilizar durante la adquisición de los datos, la velocidad de la embarcación, etc. Como resultado de los trabajos experimentales o de reconocimiento se determinaron los siguientes parámetros:

- **Orientación de los perfiles:** NW-SE
- **Velocidad de la embarcación:** 3 nudos

- **Filtrado a utilizar:** 800 Hz y 2400 Hz
- **Extensión del Barrido:** entre 40 y 64 mseg.
- **Intervalo de trigger:** 250 a 500 mseg.
- **Energía:** entre 100 y 300 joules
- **Tipo de remolque:** Por la banda utilizando un tangón de 4 m de longitud, en su extremo se fijó el cable del hidrófono y a 2 m el cable de remolque de la fuente boomer.
- **Distancia emisor - receptor:** 2 m
- **Profundidad de inmersión emisor - receptor:** 0.5 m
- **Error promedio de las mediciones con DGPS:** $\pm 1,5$ m

Además se realizaron perfiles de control en varias orientaciones para correlacionar los horizontes ya que las condiciones de reflexión de una frontera dependen en gran medida de la dirección en la cual incida la señal en ella, en nuestro caso la dirección NW-SE en la que se proyectaron los perfiles brindó una adecuada continuidad en las reflexiones y se mantuvo como la de las líneas principales, que se calibraron en tramos de las fronteras con los resultados en los cruces desde otras direcciones.

La energía utilizada fue la máxima del boomer de 300 joules, no obstante, se hicieron tramos de perfiles en las zonas bajas con menor energía de 100 joules para disminuir el efecto de las reflexiones múltiples y se correlacionó esta información con las líneas principales.

El boomer como emisor se mantuvo en una profundidad de inmersión de 50 cm., se ubicó un flotador en la línea del hidrófono y se colocó a una distancia en que sin incorporar un ruido de remolque inconveniente mantuviese el receptor en una profundidad de inmersión que disminuyese las fases obtenidas en cada frontera, esto se comprobó experimentalmente y se obtuvo un mínimo de 2 fases para cada frontera.

Como método de comprobación se realizó mediante buceo autónomo, una inspección del fondo y una hincada manual con varilla graduada.

Para el posicionamiento se utilizó el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), en su variante diferencial, empleándose el Datum Geodésico NAD-27. Sistema Cuba Norte. Se utilizó DGPS Newton Surveyor, la estación referencial fue colocada en un punto de coordenadas fuertes y la móvil o receptora se colocó en la embarcación, garantizando el sistema una exactitud del posicionamiento inferior a 1.5 m de error en la determinación de la posición.

La orientación de las líneas se realizó utilizando el software de navegación **GEONAV** de Geocuba Estudios Marinos, que permite la comunicación entre el GPS y la computadora, facilitando la visualización y programación del sondeo y la grabación digital de los datos de las posiciones.

Los resultados se referenciaron al Nivel Medio del Mar (NMM), el cual se determinó con ayuda del mareógrafo del tipo GR-38 y una regla de marea, los cuales se instaló en un punto geodésico certificado.

Los trabajos de procesamiento consistieron en los siguientes:

- Visualización digital de los registros sismoacústicos, con el sistema de procesamiento Geo Kit SBP de CODA.
- Mejoramiento de los registros utilizando diferentes filtrados, ganancias y tratamiento de las imágenes.
- Cálculo y aplicación de correcciones por geometría de medición de acuerdo a la distancia de remolque y profundidad de inmersión de los sensores.
- Interpretación de cada registro sismoacústico, obtención de sus reportes automatizados en formatos txt y dxf.

- Corrección de los horizontes al Nivel Medio del Mar (NMM).
- Elaboración del plano de datos reales con la posición de cada ping obtenido.
- Elaboración del plano de divergencias en los puntos de cortes de los perfiles
- Transformación de todas las profundidades obtenidas del sismograma de milisegundos a metros, utilizando una velocidad media similar a la del sonido en el agua de 1500 m/mseg, al no contar con información de sondeos geológicos
- Elaboración del plano de espesores de los sedimentos no consolidados (Isopacas),
- Elaboración del plano de profundidades hasta el techo de los sedimentos consolidados (Isohipsas),
- Elaboración del plano de perfiles geofísicos,

En este estudio, la velocidad de propagación de la onda acústica seleccionada para los diferentes medios en la determinación de las profundidades de yacencia fue de 1500 m/s, teniendo en cuenta que no se dispone hasta el momento sondeos geotécnicos en el área para la correlación de los resultados.

RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos se resumen en los siguientes materiales:

- Planos de espesores de los sedimentos no consolidados.
- Planos de profundidades del techo de los horizontes detectados.
- Perfiles sismo - geológicos.
- Plano batimétrico.

De acuerdo a la información geológica general del área disponible y con un carácter orientativo es posible suponer que la litología de los sedimentos sueltos no consolidados se corresponda con sedimentos finos arcillosos, plásticos, de tonalidades grises y de consistencia muy blanda, que trancisionan hacia materiales más limosos y hasta arenosos al acercarnos a la línea costera. Por debajo de estos aparecen materiales mas competentes de la formación Paso Real que esta constituida por arcillas arenosas de tonalidades carmelitas, que van desde firmes a muy duras gradualmente en profundidad; en esta formación se pueden encontrar intercalaciones de arenas densas hasta areniscas y roca caliza en diferentes niveles.

En los planos de isopacas debemos señalar que los espesores superficiales, indicados para los horizontes 1 y 2 no necesariamente están constituidos en toda su extensión por el mismo material. En las zonas de mayores profundidades, estos espesores pueden corresponderse con materiales mas finos; la arcilla gris muy blanda (cieno). Pero hacia las zonas bajas al disminuir estos espesores, los materiales pudieran ser una mezcla más arenosa pudiendo ser esta última predominante y de algo gruesa hasta gravosa por tramos.

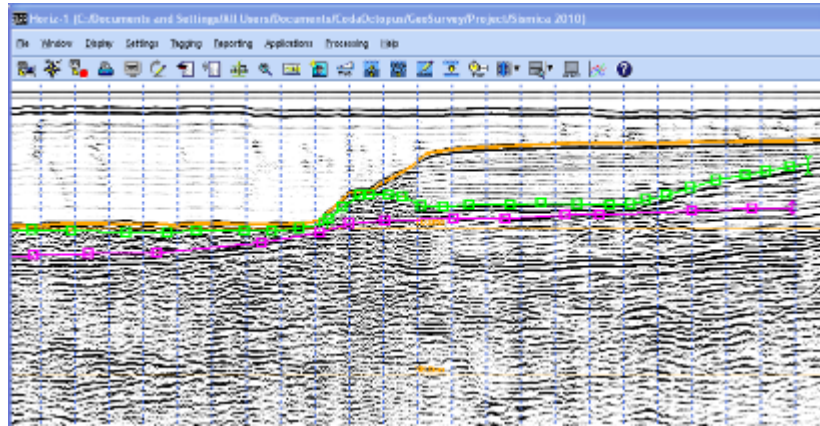


Figura 5 Registro que muestra la elevación de los horizontes hacia la costa

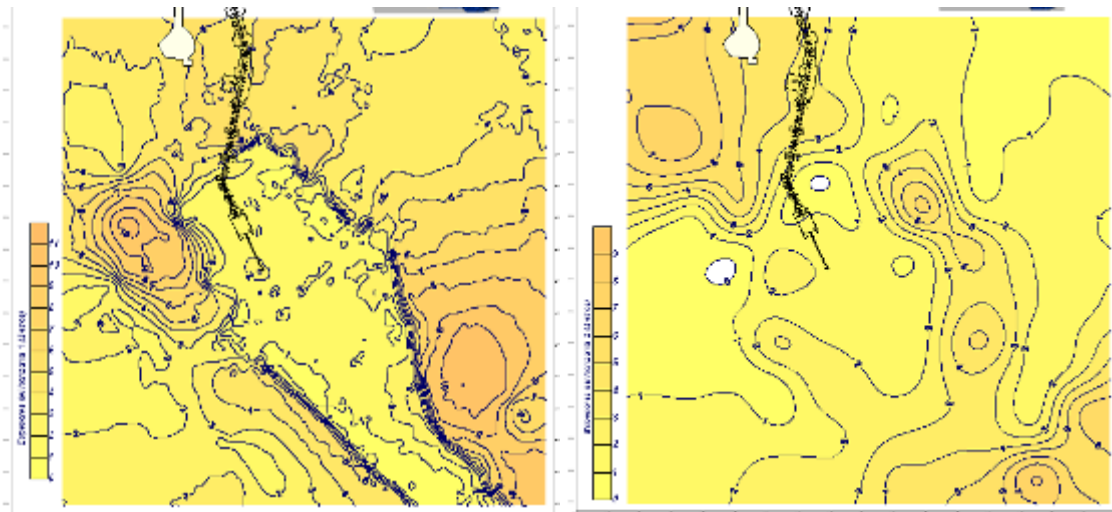


Figura 6 Mapas de isopacas de los sedimentos no consolidados h1 y h2 respectivamente.

En la zona se realizó mediante buceo autónomo, una inspección del fondo y una hinca manual con varilla graduada, mediante la cual se logró siempre una penetración mayor de 2.5 m sin resistencia, no alcanzando materiales competentes, inclusive en las zonas más bajas.

De forma general en todos los sismogramas estas arcillas muy blandas (cienos), que asociamos al horizonte 1 tuvieron un patrón de reflexión de transparente a plano paralelo, típico de materiales finos y poco consolidados (Figura 7).

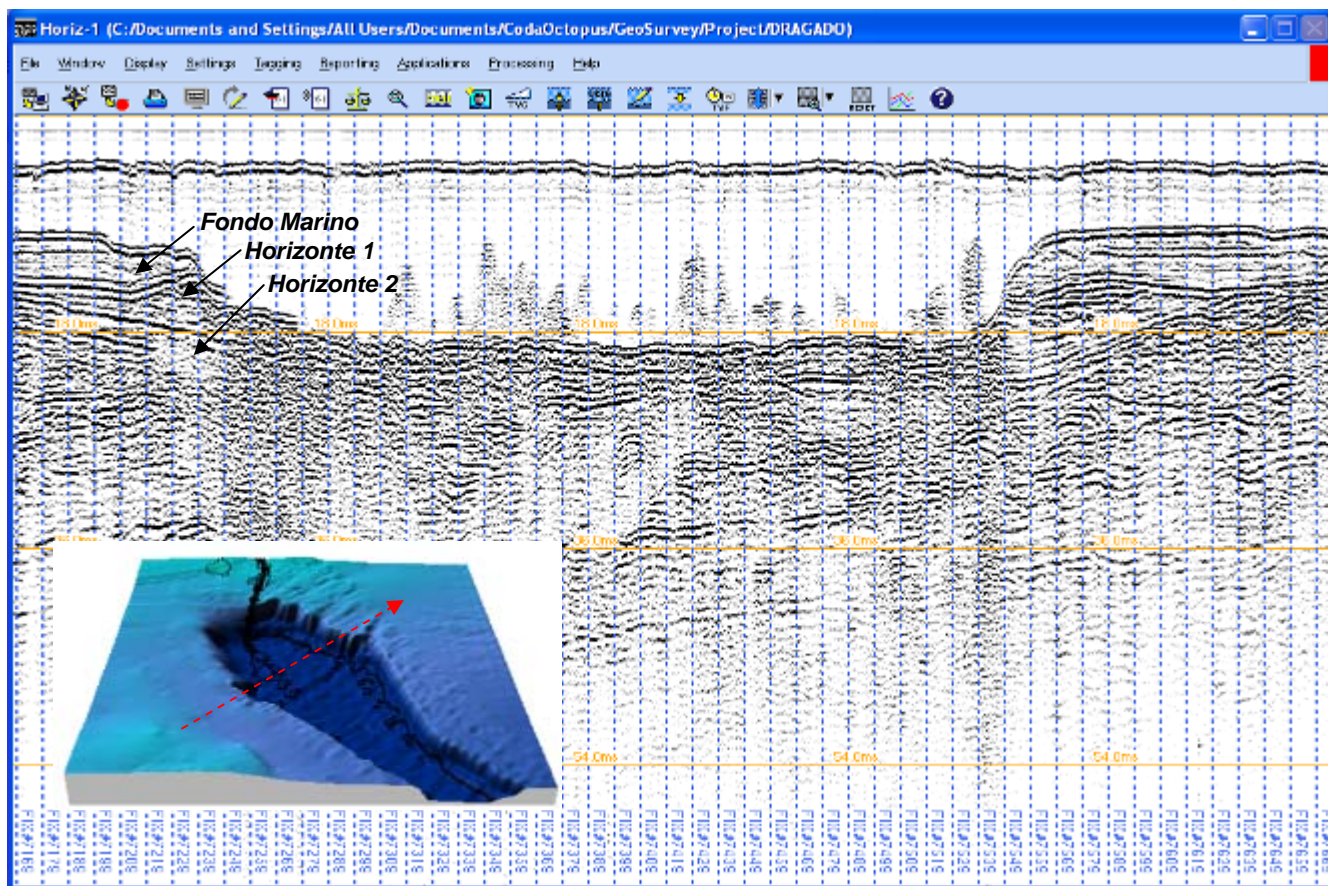


Figura 7 Registro sismoacústico representativos de la zona de estudio.

Fue muy clara la frontera entre este horizonte y uno inferior que denominamos como horizonte 2, el cual también consideramos no consolidado con un patrón de reflexión de una textura algo mas compleja y abigarrada, lo que puede indicar la presencia de sedimentos algo mas gruesos y que sobre yacen los estratos competentes.

Estos últimos pudiesen estar constituidos por arcillas firmes que brindan una clara y definida frontera de reflexión por su contraste en densidades y en las cuales pueden aparecer diferentes intercalaciones en profundidad.

Los 2 horizontes de materiales superficiales cuyo carácter y textura en el registro indica su carácter de sedimentos blandos y finos, fueron claramente diferenciables y pueden responder a variaciones litológicas o a diferencia en las condiciones naturales de densidad de dichos materiales sueltos. De ahí decidimos darles un tratamiento diferenciado por cuanto constituyen dos horizontes bien diferenciables y a su vez establecer el comportamiento y distribución de estas dos capas en el área.

En el área del emplazamiento es apreciable que para el horizonte 1 al alejarnos de la costa (dirección sur) aparecen los mayores espesores que alcanzan más de 9,0 m y hacia la zona costera aparece una disminución hasta menos de 4,0 m. En la zona dragada para la dársena del muelle existente, la extracción de este material disminuyó su potencia apreciablemente. Para el horizonte 2 al alejarnos de la costa (dirección sur) también aparecen los mayores espesores que alcanzan algo más de 7,0 m y hacia la zona costera aparece una disminución hasta menos de 1,0 m. Las isohipsas del techo de los sedimentos competentes (piso de los no consolidados), aparecen entre los -8.0 (y algo menor) y los -24.0 m de profundidad. Ya dentro de los sedimentos competentes se aprecian fronteras de reflexión, con la característica de ser interrumpidas por tramos donde las condiciones de absorción-dispersión en el fondo las enmascaran (zona dragada donde se acumulan hidrocarburos que

absorben la señal) o donde las diferencias de contraste acústico de estas no son favorables. Es evidente el buzamiento de estos límites de reflexión en dirección ascendente hacia la zona costera. Estas fronteras están representadas en los perfiles sísmogeológicos para esta área y pudieran corresponder con variaciones en consistencia de las arcillas, y/o la alternancia e intercalación de capas de diferentes litologías como se describen para la formación geológica característica de la región.

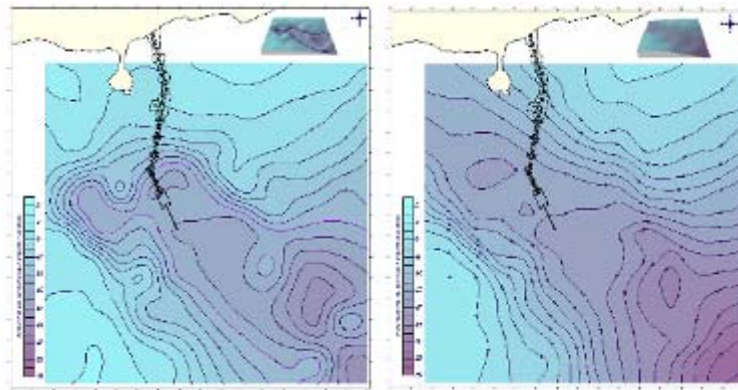


Figura 8 Mapas de isohipsas de los techos de los horizontes 1 y 2 respectivamente.

CONCLUSIONES

1. Se cumple el objetivo de la investigación de brindar un conocimiento general del comportamiento de los horizontes geológicos con vista a la ubicación prevista de la estructura de atraque de Coque y Azufre así como las áreas necesarias a dragar para alcanzar la rasante de dragado de -14 m en la dársena de maniobra.
2. El estudio permite ubicar las perforaciones en los futuros sondeos geotécnicos en el proyecto ejecutivo de ambos objetivos (emplazamiento muelle y dragado).
3. Se determinan 2 horizontes de materiales superficiales cuyo carácter y textura en el registro indica su carácter de sedimentos blandos y finos, fueron claramente diferenciables y pueden responder a variaciones litológicas o a diferencia en las condiciones naturales de densidad de dichos materiales sueltos. De ahí decidimos darles un tratamiento diferenciado por cuanto constituyen dos horizontes bien diferenciables y a su vez establecer el comportamiento y distribución de estas dos capas en el área.
4. Las condiciones geológicas y geométricas de los horizontes indican que sería más favorable el emplazamiento del muelle hacia el extremo más al este de la investigación, donde no existe la irregularidad que aporta el dragado existente, esto se apoya además en que lo alejaría del borde del área donde los buques realizan maniobras para atracar en el Muelle No. 1 de la Refinería, que es una posición peligrosa por el riesgo ante cualquier dificultad que se pueda presentar en las maniobras de atraque, téngase en cuenta que son buques de considerable eslora y la distancia es pequeña.
5. Disminuir la extensión del muelle y colocarlo más hacia la costa sería una buena ubicación, tanto por la seguridad de maniobras del Muelle, como porque la pasarela y el sistema tecnológico de carga serían más cortos y los estratos competentes menos profundos, pero se incrementaría la obra de dragado en volúmenes y en materiales de mayor densidad.
6. Es importante señalar que las profundidades y espesores con que se caracterizan los horizontes se deben considerar con reserva, (como valores aproximados), debido a la precisión que se obtuvo al procesar con la velocidad del sonido en el agua (1500 m/seg) todo

el paquete de sedimentos. En etapas posteriores con resultados de sondeos geotécnicos estos límites de los mapas pueden ser reajustados.

RECOMENDACIONES

1. Teniendo en cuenta que el método empleado aunque brinda una importante información acerca de las características del corte geológico, tiene limitaciones en cuanto a la determinación de la naturaleza de los elementos que conforman el corte, recomendamos reajustar los mapas en etapas posteriores con resultados de los sondeos geotécnicos y luego de tenerse una batimetría ingeniera de precisión en la zona oeste del área de estudio con vistas al dragado de la dársena de maniobra.
2. Recomendamos que los futuros sondeos geotécnicos pueden ser ubicados a partir de la información de este estudio; y deberá tenerse en cuenta la características de las diferentes capas para ubicar las perforaciones y considerar el carácter buzante de las mismas (o estratificación inclinada) para proyectar las profundidades de investigación. (la orientación de los horizontes de reflexión presentados en los perfiles puede orientar esta programación).

BIBLIOGRAFIA

- Derrotero de las Costas de Cuba. Tomo II "Región Marítima del Sur": De Punta Maria Aguilar al Golfo de Cazones. Servicio Hidrográfico y Geodésico de Cuba, 2003.
- Catálogo de Normas de Tiempo de la Agencia de Geología y Geofísica. GEOCUBA Estudios Marinos. 2005.
- Catálogo de Normas de Consumo de material para la Agencia de Geología y Geofísica. GEOCUBA Estudios Marinos. 2005.
- Manual de operaciones del Perfilador Sismoacústico de alta resolución de Applied Acoustics y del sistema CODA DA 2000. .
- Metodología para el posicionamiento de GPS. Met.- 30 – 35 – 2004. GEOCUBA Estudios Marinos. Ciudad de la Habana, 2004.
- Metodología para la realización del levantamiento sismoacústico. MET. 30-12- 2005 GEOCUBA Estudios Marinos. Ciudad de la Habana, 2005.
- Bases para estudios batimétricos y geofísicos en fase conceptual. NOUEL Consult SA.