Máculas de fondo: origen, morfología e implicaciones geotécnicas Pockmarks: Origin, Morphology and Geotechnical Implications

Diana De Ponte Fernandes^{1*}, Marcos Arroyo Álvarez de Toledo², Joana Gafeira³

Resumen

En la exploración costa afuera con fines geotécnicos, la caracterización morfológica del fondo marino juega un papel importante en la definición de proyectos de implantación de estructuras mar adentro.

Dentro de las geoformas que pueden estar presente, en ambientes marinos, se encuentran unas depresiones o máculas (*pockmarks* en inglés), que resultan de la migración y escape de fluidos a la superficie en presencia de materiales finos en el estrato superficial. Estas concavidades han despertado el interés de los investigadores, dado que se encuentran distribuidas por todos los océanos y se presentan en diferentes ambientes marinos.

Dada la abundancia con que se suelen presentar, la descripción cuantitativa y caracterización morfológica de un campo de máculas de fondo resulta muy laboriosa sin herramientas apropiadas. Con este fin se están desarrollando herramientas de análisis de imagen para automatizar la identificación y caracterización de las máculas.

Una de estas herramientas, desarrollada por Gafeira *et al.* (2012; 2018) en ambiente ArcGis, se emplea aquí para analizar una zona del mar Caribe, dónde no se habían realizado estudios de este tipo hasta la fecha. El estudio tiene el propósito de identificar las máculas encontradas costa afuera y caracterizarlas en función de su morfología, pendiente de laderas y posibles orígenes de formación.

Palabras clave: máculas, riesgo, semiautomatizado, mar Caribe.

Abstract

In offshore exploration for geotechnical purposes, the morphological characterization of the seabed plays an important role in the definition of projects for the implantation of offshore structures.

Among the seabed features that may be present at a study site there is a type of seabed depressions that are called pockmarks (máculas in Spanish), These depressions result from migration and seabed seepage surface in areas where the near-surface sediments are comprised of fine materials. Pockmarks have stimulated the interest of researchers since they are distributed throughout the world and occur in different aquatic environments.

For the description and morphological characterization of the pockmarks, tools are being developed to automate the identification and characterization of the concavities; minimizing the time required for the evaluation of areas of great spatial extension.

One of these tools, developed by Gafeira et al. (2012; 2018) within the ArcGIS environment, is used in this work for an area of the Caribbean Sea, where no studies of this type have been carried out to date. The purpose of the study is to identify the pockmarks found offshore and characterize them according to their morphology, slopes and possible origins.

Keywords: pockmarks, geohazards, semi-automated, Caribbean Sea.

1. INTRODUCCIÓN

En la geotecnia costa afuera, diferentes proyectos, y gracias a los métodos geofísicos, se identifican con frecuencia ciertas depresiones en el lecho marino, producto de emanaciones y escape de fluidos (gas y líquidos) desde el subsuelo y hasta la superficie del fondo. Para describir estas geoformas emplearemos en lo sucesivo el término máculas de fondo (*pockmarks* en inglés).

Las máculas de fondo suelen tener paredes muy pendientes y fondos planos. La existencia de máculas es sintomática de la presencia y evolución de gas en los sedimentos, y puede ser informativa sobre las características tectónicas y estratigráficas del emplazamiento. Dada la importancia del gas metano submarino en el efecto invernadero el análisis y estudio de las máculas recibe cada vez más atención, pues son la evidencia de posibles vías de migración de fluidos a través del subsuelo. Adicionalmente, el estudio de estas concavidades se considera de vital importancia en la evaluación de riesgos geológicos para estructuras costa afuera como cables, tuberías, plataformas auto elevables, plataformas fijas entre otras.

El estudio de las máculas presenta, no obstante, dificultades notables. Aunque hay varias hipótesis sobre su mecanismo de formación estas aún no han podido corroborarse en detalle, pues es difícil observarlo *in situ*. Así pues, el énfasis de la investigación actual se centra en la adquisición sistemática de datos.

En la práctica geotécnica costa afuera, tanto las máculas como cualquier otro rasgo de fondo marino se observan sobre todo gracias a la adquisición y procesamiento de datos geofísicos obtenidos del sonar de barrido lateral,

^{*} Autora de contacto: dianadeponte@gmail.com

¹ Máster en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Tesina CEDEX 2019.

² PhD en Ingeniería Geotécnica. Universitat Politècnica de Catalunya.

³ PhD en Geología Marina. British Geological Survey.

y de las ecosondas monohaz y multihaz. Usando las ecosondas es posible generar Modelos de Elevación Digital (MED) del fondo marino que reflejan la geomorfología submarina; el sonar de barrido lateral permite interpretar lo observado.

Hasta la fecha, la práctica habitual en los estudios geotécnicos costa afuera se limita a constatar la presencia de máculas, dando descripciones cualitativas de su abundancia y características. Aunque una descripción cuantitativa de estos accidentes sea más interesante, el procesamiento y análisis manual de los MED que se requiere implica gran cantidad de horas de trabajo, puede ser subjetivo y está sujeto a errores de interpretación.

En los últimos años se han desarrollado herramientas de análisis especializadas con el fin de paliar esta situación. En el presente trabajo se plantea el uso de una de estas herramientas, desarrollada por la Dra. Joana Gafeira, del Servicio Geológico Británico -British Geological Survey (BGS)- y colaboradores. La herramienta es una aplicación para el *software* ArcGIS que analiza MED mediante rutinas específicas en lenguaje Python. Esta caja de herramienta permite identificar las máculas presentes en una zona, extraer sus elementos geomorfométricos principales y obtener estadísticas de parámetros morfológicos (por ejemplo, dimensiones, punto más bajo de las estructuras, perímetro y profundidad).

En este trabajo se aplica la herramienta del BGS a un sitio ubicado en el mar Caribe, zona donde no hay hasta ahora constancia de estudios semejantes. Previamente se resume brevemente el estado del arte con particular énfasis en las implicaciones geotécnicas de la presencia de máculas para proyectos costa afuera. A partir de los resultados obtenidos se propone además un método novedoso, basado en el back-análisis, para aprovechar los datos morfológicos de las máculas como herramienta de caracterización geotécnica, comparando los resultados así obtenidos con los derivados de otros métodos más tradicionales.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Máculas, origen y morfología

Las máculas de fondo fueron identificadas por primera vez en la plataforma de Nueva Escocia a finales de la década de los sesenta del siglo pasado (King y MacLean, 1970). Las máculas son depresiones cóncavas del lecho marino que se pueden presentar en varios tamaños (generalmente comprendidas entre 5 y 500 m), profundidades y formas, causadas por la erupción de fluidos que migran a través de los sedimentos, generalmente de grano fino, hasta la superficie marina (figura 1).

Estas depresiones son indicadoras del flujo de gases o líquidos en cualquier entorno marino o lacustre, siempre que los sedimentos sean adecuados para su formación. En general, son evidencia de un flujo focalizado (Hovland *et al.*, 2002).Para entender el origen de las máculas, es importante diferenciar entre el origen de los fluidos y el proceso en que estos fluidos forman y mantienen la depresión.

Para Whiticar (2002), el gas natural termogénico y biogénico, los depósitos sedimentarios ricos en materia orgánica y los hidratos de metano son las fuentes más probables de fluidos con la flotabilidad necesaria para dar paso a la formación de las máculas. Sin embargo, Hovland *et al.* (2002)



Figura 1. Esquema de depresiones tipo Mácula. S/E (sin escala) (Cathles *et al.*, 2010).

no creen posible atribuir el fenómeno a un tipo de fluido único (gas o líquido), siendo también varios los posibles orígenes de la sobrepresión (microbiano, termogénico, hidrotérmico, volcánico o subterráneo); el flujo puede originarse desde cualquier profundidad bajo el lecho marino.

Las máculas aparecen en zonas del fondo marino dónde se encuentra una capa o estrato superficial de materiales finos (arcillosos) en superficie. Esta capa puede ir desde el lecho marino hasta pocas decenas de metros. Las máculas no aparecen en fondos con materiales granulares, pues en ellos los fluidos (y en particular los gases) pueden fluir a través de los poros sin causar aumentos significativos de presión.

2.1.1. Morfología y dimensiones de las máculas

Las máculas pueden alcanzar diámetros de centenares de metros y profundidades de hasta decenas de metros (Hovland y Judd, 1988). La forma de las máculas se define habitualmente mediante la delimitación de tres dimensiones (figura 2) (Andrews *et al.*, 2010):

- a) Profundidad del punto más bajo de la depresión.
- b) Profundidad media del aro que define la mácula.
- c) Perímetro definido por la mácula en el fondo marino.



Figura 2. Esquema de delimitación de las máculas S/E.

La forma y dimensión de las máculas pueden variar considerablemente, sin embargo. Hovland *et al.* (2002) proponen subdividir en seis clases morfológicas las depresiones más comunes reportadas en la literatura.

1. Máculas unitarias: son depresiones pequeñas, típicamente tienen hasta 0,5 metros de profundidad y entre 1 y 10 metros de diámetro mayor. Se cree que representa un único evento de expulsión de fluidos. Son comunes dentro de las maculas normales (figura 3).



Figura 3. Máculas unitarias S/E (Hovland et al., 2002).

 Máculas "normales": depresiones circulares, su diámetro puede variar desde 10 hasta 700 metros, alcanzado profundidades de entre 1 y 45 metros. Su sección transversal varia de asimétrica a regular (figura 4).



Figura 4. Máculas normales (regulares y asimétricas) S/E (Hovland et al., 2002).

3. **Máculas elongadas:** cráter donde uno de los ejes en mucho mayor que el otro. Se forman en laderas y áreas en que las corrientes de fondo son fuertes (figura 5).



Figura 5. Máculas elongadas S/E (Hovland et al., 2002).

4. Máculas "ojos": en el centro aparece un objeto o región acústicamente reflectante. La inspección visual sugiere que esta región puede ser resultado por el material grueso producto de procesos erosivos o por la actividad biológica (restos de esqueletos, conchas, etc.) (figura 6).



Figura 6. Máculas "ojos" S/E (Hovland et al., 2002).

 Máculas "encadenadas": consisten en máculas unitarias o pequeñas máculas normales organizadas en forma de cadenas curvilíneas o lineales. Llegan a abarcar kilómetros de longitud. Se sospecha que esta forma es producto de flujos a lo largo de fallas casi verticales, zonas de flexiones o áreas de debilidad en la capa sedimentaria superior.



Figura 7. Máculas elongadas (Judd y Hovland, 2007).

6. Máculas "complejas": aparecen como agrupaciones de máculas normales o amalgamaciones de marcas de máculas de gran tamaño (figura 8).



Figura 8. Máculas complejas (Judd y Hovland, 2007).

Cabe destacar que la morfología de las máculas puede variar a lo largo del tiempo debido a las corrientes de fondo, especialmente si la tasa de sedimentación es alta y las corrientes en el sitio son fuertes.

2.1.2. Distribución y actividad de las máculas

Se han observado máculas en áreas de producción de hidrocarburos, en deltas de ríos y en zonas tectónicamente activas. Las máculas pueden encontrarse en el talud de las plataformas continentales, estuarios, zonas costeras, lagos con o sin actividad hidrotermal, en diversas configuraciones de márgenes continentales alrededor del mundo (Rogers *et al.*, 2006), junto a montes submarinos y en las cuencas costa afuera.

La densidad de las máculas puede variar de acuerdo al perfil de suelo, la geología subyacente, flujo de los fluidos y naturaleza de los sedimentos del fondo marino (Hovland *et al.*, 2002).

Hovland *et al.* (2002) resalta que los campos de máculas no han sido observados aún durante mucho tiempo; por ello es difícil determinar su actividad típica o normal. Sin embargo, existen numerosas observaciones que sugieren una actividad periódica y continua de formación de máculas; por ejemplo, la primera evidencia de emanación de fluidos continua, con observación de burbujeo, se encuentra en el mar del Norte y se sospecha que en el golfo Arábigo ocurre un fenómeno semejante. Judd y Hovland (2007) reportan que es conocido que en Grecia y California se ha detectado actividad en las máculas antes y después de eventos sísmicos.

Las máculas pueden formarse con mucha rapidez, ejemplo de ello está documentado en el golfo Arábigo, donde en un levantamiento geofísico previo a la instalación de instalaciones costa afuera no mostró evidencia de depresiones y, sin embargo, tras la etapa constructiva, un nuevo levantamiento geofísico reveló la aparición de 7 máculas de los cuales 5 presentaban actividad constante (Hovland y Judd, 1988). Otro ejemplo corresponde al caso de la plataforma auto elevable *J Storm II* instalada en el golfo de México. En diciembre de 1972 la plataforma fue evacuada y luego de 20 minutos se hundió, el reporte del accidente indica que se formó un cráter de 500 metros de ancho, 12 metros de profundidad y de fondo plano; aparentemente, los estudios previos a la instalación de la estructura no mostraban evidencia alguna de emanaciones de fluidos o de una paleomorfología tipo depresión en el lugar (Cathles *et al.*, 2010), se concluyó que la concavidad apareció repentinamente y, luego del colapso se apreciaron emanaciones de gas que no habían sido reportadas con anterioridad (Judd y Hovland, 2007).

A pesar de que las máculas puedan parecer dormidas o extintas, se sospecha que muchas de ellas se activan con cierta periodicidad, mostrando en ocasiones migración de fluidos medible durante eventos externos especiales como: presiones extremadamente bajas, mareas muy bajas, tormentas, entre otros (Hovland *et al.*, 2002). Sin embargo, solo un monitoreo a largo plazo de las máculas y de las presiones en el subsuelo podrán proveer los datos necesarios para poder realizar predicciones de los riesgos y condiciones reales de formación de las depresiones.

2.1.3. Mecanismos de formación

El modelo conceptual aceptado actualmente que describe la formación de las máculas corresponde al planteado por Hovland y Judd (1988), y está asociado al gas termogénico; los autores indican que el gas formado en profundidad migra en dirección a la superficie a través de depósitos menores que se encuentra en el camino. Para Cox (2012), las variaciones de permeabilidad en la vertical tienen a detener el flujo del gas, que puede quedar acumulado debajo de las capas menos permeables. Esto puede propiciar la aparición de una serie de niveles freáticos colgados entre zonas de gas atrapado.



Figura 9. Modelo esquemático de migración de fluidos y formación de máculas. (Cathles et al., 2010).

Las fuerzas de tensión superficial inhabilitan el flujo ascendente; esto tiende a concentrar la migración ascendente en áreas locales de debilidad. La acumulación del gas da lugar a domos o cúpulas en la superficie del fondo y, las pequeñas fracturas que aparecen por tensión en ellas, permiten el escape de gas al medio (figura 9).

A medida que la ventilación de los fluidos se incrementa, la velocidad de flujo aumente y el proceso erosivo se acelera, hasta producirse una explosión violenta que da paso a la aparición de una concavidad o mácula. Una vez definidas las vías de escape de los fluidos, la ventilación se vuelve más lenta y se estima que el flujo sería constante durante al menos un año y, luego de este lapso, la mácula entra en inactividad (Hovland y Judd, 1988) (figura 9).

Judd y Hovland (2007) sugieren que el proceso de ventilación de fluidos se puede reactivar por pulsos posteriores de gas, aunque se desconoce cuánto podría tardar este proceso de reactivación. Se cree que la formación de nuevas máculas en áreas donde se tenga evidencia de depresiones preexistentes es poco probable ya que los fluidos buscarían los canales existentes para llegar a superficie lo que activaría las máculas existentes (Cathles *et al.*, 2010).

Cathles *et al.* (2010), presentan una propuesta de modelo cuantitativo que explica la formación de las máculas; los autores indican que sería posible aprender mucho más sobre la formación de las depresiones si se lograse cuantificar el modelo conceptual formulado por Hovland y Judd (1988) (figura 9). En su planteamiento se idealiza la chimenea de gas como una barrera capilar móvil, en la que el gas ascendente desplaza al agua de los sedimentos como un pistón y se identifica la formación de la mácula mediante una condición de licuación local sobre el techo de la chimenea. Estas consideraciones explicarían la etapa inicial de la formación de las máculas, dado que la etapa final de formación ocurre de manera catastrófica.

Los gradientes de presión, que pueden ser indicativos del riesgo de actividad macular pueden ser monitoreadas, en principio, con la instalación de piezómetros alrededor y debajo de las estructuras. Sin embargo, y aparte del coste y dificultad asociados a la instrumentación submarina, muchos de los sistemas habituales no son apropiados para medir en presencia de gases (por ejemplo, las piedras porosas de los sensores de presión de poro en los CPTU no responden en condiciones desaturadas).

Se pueden emplear métodos de mejoramiento del subsuelo para ventilar o permitir la expulsión del gas del subsuelo (Cox, 2012) y es recomendable tener estas consideraciones en la etapa de diseño.

2.2. Implicaciones de las máculas de fondo para la geotecnia costa afuera

Los riesgos geológicos costa afuera se definen como condiciones del terreno que presentan un potencial para el desarrollo de problemas ingenieriles que resulten en fallos estructurales, conducentes a daños medioambientales, daños económicos y/o pérdida de vidas humanas.

Las máculas pueden representar riesgo costa afuera para las estructuras existentes o proyectadas tanto en instalación como en su vida útil. El riesgo se deriva de su posible aparición súbita bajo una estructura previamente instalada, de su posible reactivación y de la morfología del fondo marino a ellas asociada, como el caso reportado por Cathles *et al.* (2010) para la plataforma *J Storm II* del golfo de México o el caso del Paso Sur frente al delta del Misisipi, donde se produjo una explosión cuando se encontró gas a los 210 metros de profundidad, el gas se encendió y la plataforma se derrumbó y se hundió, luego de lo sucedido se observó un cráter de 600 metros de ancho y 30 metros de profundidad con emanación constante de gas a superficie.

2.2.1. Migración de fluidos y tensión efectiva

Tanto durante la formación de una mácula como durante su posible reactivación se producen flujos subverticales de gas y/o agua. Estos flujos tienen implicaciones geotécnicas directas.

Las variaciones en la capacidad de carga de los suelos dependen principalmente de la tensión efectiva, que no es más que la diferencia entre la tensión total y la presión de poros ejercida por los fluidos (gas, líquido o mezcla de ambas). Si por alguna razón, se experimentan cambios en la presión de poro y esta llega a superar la tensión total, las tensiones efectivas se vuelven cero y el suelo entra en un proceso de licuación conducente a fallos por capacidad de carga (Cox, 2012).

En el caso de filtración vertical de líquidos (Sagaseta *et al.*, 2012), cuando el flujo es descendente, la presión del líquido aumenta en menos proporción que cuando se encuentra en reposo sin embargo, cuando la filtración vertical es ascendente, la presión del líquido aumente en mayor medida que cuando se encuentra en reposo y, si el gradiente hidráulico es suficientemente grande y llega a igualar al peso total saturado del suelo, los granos pierden su capacidad de transmitir tensiones y en suelos incoherentes, pueden llegar a transformarse en un material en suspensión dentro del líquido dando paso al fenómeno de sifonamiento.

La presencia de un fluido compuesto por gas y líquido hace más compleja la cuantificación del cambio en la presión de poros; mientras que la columna de agua es continua (sin burbujas de gas) a lo largo del perfil del suelo, el efecto hidrostático debido al peso propio no presenta variaciones, sin embargo, una vez que el contenido del gas es tal que el fluido presente en los poros contiene burbujas de agua la relación cambia.

Las fuerzas de flotación y la presión de poros dependen de la columna del líquido y no se ven afectadas por las burbujas de gas presentes en el sistema. El comportamiento más complejo se debe a la compresión o expansión del gas originando cambios de presión de poro en la fase líquida circundante y causando modificaciones en el flujo del mismo. A medida que es gas migra, la presión de poro de la fase líquida debe caer hidrostáticamente, sin embargo, cuando el gas se acumula en una zona, la presión puede elevarse; esto puede reducir la tensión efectiva y llevar a la aceleración de un flujo ascendente con un eventual efecto de licuación.

2.2.2. Afectación a cimentaciones

El efecto de la migración de los fluidos a superficie es difícil de modelar y de cuantificar, pero sí se conoce que este proceso reduce la capacidad de carga tanto para cimentaciones superficiales como para cimentaciones profundas. Para las estructuras con cimentación directa (*Gravity Based Structures–GBS*), la migración de fluidos y subsecuente disminución de capacidad de carga puede causar problemas de flotación y posterior deslizamiento en la base (Cox, 2012).

Para el diseño de cimentaciones directas en proyectos costa afuera se han empleado métodos más o menos sofisticados dependiendo de la aplicación a considerar (Randolph *et al.*, 2005). En proyecto la capacidad de carga se evalúa utilizando métodos de análisis plástico; la tendencia actual es el empleo de elementos finitos 2D y 3D. Sin embargo, para cimentaciones de menor escala como placas de apoyo (tipo *mudmats*) cimientos submarinos, generalmente se ha adoptado las recomendaciones descritas en la normativa internacional como la ISO (2003), API (2000) o DNV (1992). En este contexto, la presencia de un flujo de gas ascendente o de bolsas con presiones elevadas puede cambiar significativamente el perfil de tensión efectiva y disminuir la capacidad portante del terreno o causar asientos.

2.2.3. Impacto en el trazado de tuberías

La selección de la ruta de una tubería costa afuera responde a la necesidad de evitar o mitigar los efectos asociados a los riesgos geológicos encontrados (Randolph y Gourvenec, 2011) y estos pueden incluir, entre otros, los efectos asociados a las máculas:

- Irregularidades del fondo marino por efecto de las depresiones tipo máculas, que podrían dejar una altura libre entre la tubería y el fondo marino que sería inaceptable (Judd y Hovland, 2007).
- Inestabilidad de las laderas o pendientes asociadas a la morfología general del sitio o asociada a las máculas, que pueden resultar inestables bajo acciones de sismo o tormentas que pueden llegar a comprometer la integridad de la tubería.
- Fuga o migración de fluidos a superficie que pueden llegar a desestabilizar la línea del ducto.

Es por ello que la presencia de máculas puede llegar a afectar considerablemente la ruta de una tubería en proyectos costa afuera, donde se encuentren pendientes de laderas susceptibles a deslizamientos de fondo, y donde la densidad y clasificación de las mismas condicionen el trazado del ducto. Si no se puede evitar el campo de máculas es necesaria la intervención en el fondo marino mediante apertura de zanjas o instalación de estructuras de soporte, colocación de bloques en las depresiones y, en algunos casos puede conllevar a abandono del proyecto original (Andersen *et al.*, 2008).

2.2.4. Morfología macular y propiedades del fondo marino

Como se ve, la consideración habitual de la morfología macular preexistente en los estudios geotécnicos referidos ha sido la de elemento de riesgo, particularmente respecto a la estabilidad estructural de las estructuras lineales que las atraviesan, como los gasoductos (Cox, 2012). Sin embargo, creemos que se ha pasado por alto el hecho que una determinación y análisis cuidadoso de tal morfología puede ofrecer beneficios desde el punto de vista de la caracterización geotécnica submarina. Por otra parte, si un campo macular está activo y hay flujo ascendente la estabilidad general del talud de fondo puede verse comprometida, incluso para pendientes medias muy bajas (por ejemplo, de 5 grados). Este hecho se ha correlacionado directamente a regiones con hidratos de gas y deslizamientos importantes de fondo (Judd y Hovland, 2007).

3. ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE UN CAMPO DE MÁCULAS

Se ha utilizado la información batimétrica de un sitio ("sitio A") ubicado en el mar Caribe donde la presencia de máculas ha sido reportada en el fondo marino. La columna de agua varía entre 125 y 137 metros y el área levantada tiene un área de 10 km².

La batimetría fue adquirida con un ecosonda multihaz, obteniendo datos a lo largo de una cuadrícula regular de 50 cm por 50 cm. Este equipo, opera por ondas de sonido y se emplea para estimar la distancia que existe entre el espejo o superficie de agua y el fondo marino, así como para detectar objetos u obstáculos en el fondo.

La batimetría indica la presencia de depresiones tipo máculas, sin embargo, no da información de los perfiles que pasan por el centro de las concavidades que puede diferir significativamente con perfiles que pasen por el borde de la depresión.

El procesamiento manual de la información conllevaría mucho tiempo, por lo que se emplea la herramienta desarrollada por Gafeira *et al.* (2012) para la delimitación de las máculas.

Los datos batimétricos fueron convertidos inicialmente a formato *shapefile* (.shp) y transformados a un archivo tipo ráster en el programa ArcGIS mediante el método de interpolación IDW, con lo que se obtuvo el Modelo Digital del Terreno (MDT) y Índice de Posición Batimétrica (BPI) que en la extensión ArcGIS BTM (*Benthic Terrain Modeler*) es la pendiente de cada celda relativa a las celdas vecinas.

El MDT y BPI generados se utilizaron como datos de entrada para ejecutar la herramienta generada Gafeira *et al.* (2012) para la delimitación de las morfologías tipo máculas.

3.1. Perfil de suelo característico del área levantada

En el campo A, se ejecutaron 16 sondeos geotécnicos que incluyen toma de muestras y ensayos *in situ* tipo CPTU (Geohidra Consultores C.A., 2010), las mismas se realizaron fuera de las depresiones por lo que no se cuenta con información en el interior de las máculas; sobre las muestras recuperadas se realizaron ensayos básicos y ensayos especiales estáticos que, junto al resultado del procesamiento del CPTU permitieron la caracterización en profundidad del perfil de suelo (tabla 1).

Tabla 1. Perfil litológico campo A

Estrato	Profundidad (m)	Descripción	Humedad relativa (%)	Peso unitario sumergido (kN/m³)	Resistencia al corte sin drenar inalterada (kPa)	Resistencia al corte sin drenar remoldeada (kPa)
I	0,00 – 8,00 a 13,00	Arcilla de alta plasticidad, muy blanda a blanda	80% a 110%	2,8 - 6,6	0,00 a 12,00	0,00 a 8,00
II	8,00 – 13,00 a 26,00	Arena fina a media, con limo, suelta a media densa	23% a 42%	5,5 – 7,2	-	

De manera general, el área levantada se caracteriza por presentar un primer estrato de material fino, principalmente arcilla muy blanda a blanda, de espesor variable que va desde el fondo marino hasta unos 13 metros de profundidad. Bajo este se aprecian estratos de arena fina a media, que puede estar desde un estado suelto a medianamente densa que alcanza hasta los 26 metros de profundidad.

La presencia del estrato superficial de arcilla, que alcanza hasta unos 13 metros de profundidad bajo el lecho marino, propicia la formación de las depresiones denominadas máculas debido a que la migración de fluidos se ve afectada por el aumento de las presiones de profundidad.

Los valores del peso unitario varían con la profundidad, aumentando paulatinamente a medida que se profundiza en el terreno. El valor resulta de la mediana de los resultados obtenidos de los ensayos en el estrado.

El parámetro de la resistencia al corte sin drenar (Su de proyecto) fue obtenidos por Geohidra Consultores C.A, (2010) mediante la realización de ensayos triaxiales no consolidados no drenados, triaxiales consolidados isotrópicamente y no drenados y al procesar ensayos ejecutados *in situ* CPTU.

3.2. Datos empleados en la identificación de las máculas

Los datos batimétricos empleados en la identificación de las máculas fueron adquiridos al noroeste del mar Caribe en un área de 10 km², donde la columna de agua varía entre 125 y 137 metros (Geohidra Consultores C.A., 2010). En la batimetría del campo A se aprecia una morfología de fondo irregular, donde se distinguen geoformas cerradas tipo depresiones. En la zona no se observan otro tipo de morfologías de origen natural o instalaciones y evidencia de actividad humana. Para este estudio se ha trabajado con un subsector que parece contener entre 100 y 300 morfologías tipo mácula (figura 10).

A simple vista, las depresiones cubren al menos un 40 % del área levantada con la batimetría y presentan tipos morfológicos variados que se describirán en detalle en los siguientes apartados.

En la figura 11 se presenta la morfología del campo A en formato tipo superficie TIN, que servirán de insumo en el programa ArcGIS para generar los archivos tipo superficie *raster*, necesarios en el uso de las herramientas generadas por Gafeira *et al.* (2012) en la identificación y caracterización semiautomatizada de máculas.

3.3. Metodología de identificación de las máculas

Para la identificación de las máculas visualizadas en el campo A, se empleó una herramienta semiautomatizada desarrollada por Gafeira *et al.* (2012) que se utiliza en el software ArcGIS.



Figura 10. Batimetría campo A.



Figura 11. Morfología del campo A. Formato TIN de ArcGIS.

Esta herramienta procura reconocer, delimitar y caracterizar morfométricamente las máculas encontradas en el fondo marino.

Los datos de entrada requerida pueden ser un Modelo Digital del Terreno o un archivo Índice de Posición Batimétrica (BPI), en formato tipo superficie *raster*; los datos de salida corresponden a tres archivos en formado *shapefile* (.shp):

- Archivos *shapefile* con los polígonos que delimitan las máculas.
- Archivo de puntos que indican el centroide de las depresiones.
- Archivo de puntos ubicados en el punto más bajo de la concavidad delimitada. Estos puntos más bajo, parecieran ser la vía principal de escape de los fluidos que dan origen a las máculas.

Adicionalmente, se generan dos archivos tipo texto, que contienen al resumen de los datos y valores de entrada utilizados en la ejecución de la herramienta.

La herramienta desarrollada por Gafeira *et al.* (2012) para ArGIS contempla cuatro módulos que se ejecutan de manera independientemente:

Módulos de mapeo y delineación de las máculas:

- 1. Módulo 1: *Feature Delineation [Bathy]* (Delineación de las depresiones en función de la batimetría).
- 2. Módulo 2: *BPI-based Delineation Tool* (Delineación de las depresiones en función de un mapa índice de posicionamiento batimétrico).

Módulo de caracterización de las máculas:

- 3. Módulo 3: *Feature Short Description Tool* (Descripción simplificada de la geoforma).
- 4. Módulo 4: *Feature Full Description Tool* (Descripción completa de la forma).

Los módulos de mapeo y delineación de las máculas, corresponden a la identificación y ubicación en planta de las depresiones observadas en el área seleccionada. Estos módulos requieren la definición por parte del usuario de cinco valores de entrada.

- 1. Perímetro establecido para evaluación de profundidad de las máculas (*Cutoff Vertical Relief o Cutoff BPI value*): define una línea de contorno confinada que se usará para delinear las características, valor de entrada en metros (figura 12).
- Profundidad mínima de evaluación para las máculas (Minimum Vertical Relief o Minimun BPI value): únicamente las morfologías con una profundidad

mayor a la establecida como profundidad mínima serán mapeadas (figura 12).

- Ancho mínimo a mapear: *Minimum Width*: mapearán concavidades donde el ancho sea mayor al ancho mínimo establecido en el panel de entrada (figura 13).
- 4. *Minimum Size Ratio:* relación entre el ancho y largo de las geometrías a evaluar.
- 5. *Buffer Distance:* distancia de evaluación medida desde el punto 1 (figura 12).

Los resultados del primer módulo, arrojan dos archivos, el primero es a un archivo tipo *shapefile*, que contiene un conjunto de polígonos que muestran el mapeo de las máculas identificadas, el segundo es un archivo tipo texto que contiene la información relativa a los parámetros introducidos por el usuario al ejecutar la herramienta y la identificación del DMT empleado.

En la tabla de atributos del archivo *shapefile* incluye los siguientes campos característicos para cada mácula: Número de identificación de la mácula, área de la mácula, relieve vertical (VRelief) o valor de BPI, ancho límite mínimo de la geometría (MBG_Width), longitud límite mínimo de la geometría (MBG_Length), MBG_Orient, relación punto 4 y punto 5 (MBG_W_L).

Los campos 1 y 2 describen la geometría de cada depresión delineada, mientras que el campo 3 aporta su relieve vertical. Los valores de 4, 5, y 6 corresponden a los valores mínimos de las geometrías, en función de los parámetros de entrada en términos de su ancho, longitud, orientación y la relación del mínimo ancho y la mínima longitud.

El *shapefile* obtenido en el módulo 1 y el DMT de origen o archivo BPI, serán utilizado como elemento de entrada en los módulos 3 y 4 (*Feature Short Description y Feature Full Description Tool*).

Con estos módulos, es posible recalcular el atributo de relieve vertical (profundidad) e incluir nuevos parámetros de caracterización de cada estructura, como el punto más bajo detectado en cada depresión.

En este caso se obtendrán 3 archivos tipo *shapefile* de puntos, el primero que contiene la información de las ubicaciones más profundas de cada depresión, el segundo, incluye el centroide de cada mácula y el tercer, un nuevo archivo de polígonos con el mapeo de las depresiones. También se tendrá como salida un archivo tipo texto con los datos de entrada empleados.



Figura 12. Ejemplo de la definición de valor de 1, 2 y 5 (Gafeira et al., 2018).



Figura 13. Definición de valor de 1, 2, 4 y 5 (Gafeira, 2017).

3.4. Morfología de fondo y caracterización geotécnica

Los elementos de entrada para este análisis corresponden al perfil de suelo representativo del sector de evaluar y, la sección o corte vertical sobre la batimetría. Esta sección vertical se obtiene considerando el caso más desfavorable de evaluación, en este caso de mayor pendiente.

En el caso de las máculas, la evaluación de la estabilidad del talud se puede realizar por el método de talud infinito, dado que los deslizamientos esperados son de poca profundidad y la superficie de falla se presume paralela a la cara del talud.

El término de "talud infinito" se refiere al talud que tiene una inclinación constante (α) respecto a la horizontal, para una extensión ilimitada (infinita), donde el mecanismo de colapso es gobernado por una superficie de falla paralela a la superficie del talud (figura 14), en condiciones



Figura 14. Esquema de talud infinito. (Randolph y Gourvenec, 2011).

de terreno constante a cualquier profundidad desde la superficie del talud y hasta la superficie de falla. Este método se emplea cuando la longitud del deslizamiento es mucho mayor que el espesor del bloque a movilizar y es común su empleo en taludes submarinos extensos.

En la figura 14, se presenta el esquema del "talud infinito" en donde en donde N es la fuerza normal (la cual depende de W, peso del elemento del suelo) y es equivalente al esfuerzo efectivo en el suelo; S es la fuerza de resistencia equivalente a la resistencia al corte del suelo (que es función del esfuerzo efectivo en el suelo); T es la fuerza tangencial talud abajo (fuerza desestabilizadora); para una pendiente infinitamente extensa, las fuerzas son las mismas que en cualquier otro bloque, de modo que las fuerzas entre bloques F1 y F2 son iguales y opuestas y se cancelan, exceptuando la magnitud de la presión de poro neta que actúa horizontalmente de derecha a izquierda (Randolph y Gourvenec, 2011).

En casos en donde exista un régimen de presión hidrostática, el talud estará en equilibrio mientras el ángulo α sea menor que el ángulo de fricción interna del suelo. Sin embargo, una presión de poros excesiva producirá una reducción del esfuerzo efectivo, haciendo así que disminuya la resistencia al corte del suelo, lo que produce una falla en el talud.

El factor de seguridad a la falla no drenada para el caso de materiales finos, condiciones no drenadas y en término de esfuerzos totales viene dada por Randolph y Gourvenec (2011):

$$F.S. = \frac{2 * Su}{\gamma' * z * \cos(\alpha) * sen(\alpha)}$$

Su: resistencia al corte no drenada. γ': es el peso unitario sumergido del suelo. α: inclinación del talud Cuando el factor de seguridad se iguala a 1, se puede determinar el ángulo crítico del talud como función de la resistencia al corte no drenada y al esfuerzo efectivo (Randolph y Gourvenec, 2011) o, se puede determinar la resistencia al corte no drenada mínima para que el talud se mantenga estable.

3.5. Resultados

El origen de las estructuras identificadas en el campo A se considera hasta el momento incierto, se desconoce si el fluido desencadénate de las depresiones es de origen biogénico o termogénico y, si se tiene emanación constante de fluidos a superficie o si el flujo ocurre únicamente durante eventos determinados como sismos de magnitud importante.

Luego de conocer la existencia de las depresiones tipo máculas, se procedió a ejecutar la herramienta elaborada por Gafeira *et al.* (2012) para el programa ArcGIS obtenido los resultados presentados a continuación.

En el campo A, y empleando los módulos de mapeo y delineación de las máculas, se han identificado 200 máculas en un área seleccionada de 5,4 km², numeradas de 0 a 191 y se presentan en la figura 15.



Figura 15. Delineación de máculas en el campo A.

Para cada una de las máculas así delineadas, se obtuvieron los valores de área, perímetro y relieve vertical. Adicionalmente, el centroide de cada mácula y el punto de la geoforma de mayor profundidad, ambas ubicaciones no son necesariamente coincidentes, el centroide lo condiciona la forma en planta y el centro de mayor profundidad de penderá del mayor espesor desarrollado bajo la geoforma. En la figura 16 se representan los centroides en círculo verde y, cuando no son coincidentes, el punto de mayor profundidad se presenta en amarillo.

En la figura 17 se presenta un mapa general de las pendientes, donde se aprecia que el mayor desnivel se encuentra en las caras de las máculas, sitio donde se debe prestar



Figura 16. Centroides y puntos de mayor profundidad de las máculas del campo A.



Figura 17. Pendiente general para área analizada del campo A.

mayor atención a la estabilidad local al momento de instalar alguna estructura costa afuera.

Con el plano de variaciones de pendiente, se trazan dos perfiles generales el primero N-S (figura 18) y el segundo E-W (figura 19).

Con los perfiles generados y bajo la hipótesis de que el espesor de material a deslizar será pequeño en relación con el área potencial de deslizamiento, se realiza el análisis de estabilidad del fondo marino empleando el método de talud infinito (Randolph y Gourvenec, 2011).

El análisis de estabilidad se enfoca en los taludes de las máculas de una zona reducida de interés. Para el análisis se utiliza el perfil generalizado generado para el campo A.

La sección a evaluar del perfil N-S corresponde a la figura 20, y se analizaron el talud norte y sur de la mácula 183 identificada en la figura 18.

La sección a evaluar del perfil W-E corresponde a la figura 21, y se analizaron el talud oeste y este de la mácula 180 identificada en la figura 19.

Para las máculas seleccionadas del campo A, se obtuvo la resistencia al corte no drenada crítico empleando el método de talud infinito y considerando un factor de seguridad de 1; se evaluaron ambas caras de cada mácula tomando en cuenta los perfiles N-S y W-E; los valores del Su resultado del análisis retrospectivo (Su A.R.) y el Su obtenido de resultados de laboratorio y ensayos CPTU se muestran en las figuras 22 y 23.







Figura 19. Perfil general W-E campo A. *Rectángulo rojo, sección a evaluar estabilidad.



Figura 20. Sección evaluada N-S campo A.



Figura 21. Sección evaluada W-E campo A.



Figura 22. Valores de resistencia al corte en función de la profundidad. Mácula 183, N-S, campo A.



Figura 23. Valores de resistencia al corte en función de la profundidad. Mácula 180, W-E, campo A.

4. DISCUSIÓN

La información obtenida es fundamental en la evaluación de zona de implantación de las estructuras costa afuera, pudiendo identificar las áreas de mayor riesgo respecto a la cercanía a las máculas, pendientes de las depresiones, extensión de las geoformas y posible actividad en la emanación de fluidos a superficie.

La sección evaluada para el campo A tiene un área 12,5 km² en donde 6,29 km², que representa el 52,25 % está cubierto por morfologías tipo mácula.

Las máculas se encuentran distribuidas uniformemente en este campo, y se han originado en materiales finos descritos en la sección 3.1.

Morfológicamente se distinguen máculas normales, encadenadas y elongadas, y han sido mapeadas gracias a la herramienta empleada un total de 200 depresiones. Respecto al área de las máculas identificadas en este campo, se aprecia que puede alcanzar hasta 414.194,1 m², estando los valores predominantes entre 0 m² y 40.000 m² (figura 24). Las áreas mayores del rango predominante están asociadas a morfologías elongadas y encadenadas.

La profundidad de las concavidades resulta variable, siendo la mínima de -1 metro y el valor máximo de -12 metros. En la figura 25 se observa que la profundidad predominante de las máculas se encuentra entre -5 y -6 metros bajo el nivel del mar, profundidades entre -3 y -4 también son representativas de la zona; valores de profundidad de -7 metros y hasta -12 metros, son menos representativas del sitio.

La variación de las depresiones y la densidad de las mismas en el área condicionan los valores de la pendiente general el sitio, por lo que al seleccionar un punto de instalación de alguna facilidad costa afuera, se debe revisar las pendientes en la coordenada seleccionada y realizar el análisis local de los datos.



Figura 24. Variación de las áreas de las máculas de campo A.



Figura 25. Variación de profundidades de las máculas del campo A.

Las pendientes del campo A varían entre 0° y 32° como se muestra en la figura 17, las mayores inclinaciones se alcanzan en los taludes internos de las máculas, en donde la pendiente varía entre 6° y 32°.

Al realizar el análisis de estabilidad por el método de talud infinito en las caras norte y sur de la mácula 183 y, caras oeste y este de la depresión 180, se observa que para un factor de seguridad 1, el Su crítico es ligeramente inferior al Su obtenido de ensayos de laboratorio y de los ensayos CPTU (figuras 22 y 23), esto indicaría que a cualquier cambio en la presión de poros, los taludes podrían volverse inestables; este es un punto de atención importante en la ejecución de un proyecto de perforación, dado que esta actividad modificaría la presión de poros en los estratos atravesados por la sarta de perforación cambiando las condiciones de estabilidad del fondo marino.

Cabe destacar que en la evaluación de estabilidad de la mácula 183, a partir de los 7 metros, la resistencia al corte sin drenar obtenida del cálculo retrospectivo, es ligeramente superior al Su del perfil generalizado (figura 22), esto ocurre porque el perfil generalizado ha sido generado a partir de pocos sitios de exploración, que no necesariamente satisface las condiciones particulares de la mácula evaluada.

Al comparar las máculas descritas en este trabajo con las depresiones observadas a nivel mundial, se tiene que el material donde se han formado las concavidades es semejante en términos de granulometría, los diámetros reportados varían desde 30 metros hasta 300 metros, formando parte de las dimensiones más comunes de este tipo de depresiones.

Las profundidades de las máculas descritas se concentran entre 1 y 8 metros de profundidad, presentando escasos sitios que logran alcanzar 12 metros; estos resultados son semejantes a los encontrados a nivel mundial, lo que indica que estas concavidades no logran superar los 15 metros de profundidad reportados en África, destacando de esta manera que estas morfometrías serán de tipo somero.

Con los perfiles generalizados y, al focalizar una mácula de interés por cada sección, se realizó en cálculo de estabilidad de los taludes de las máculas empleando el método de talud infinito, para caso no drenado; con esta evaluación se obtuvo el Su crítico para cada caso. De los resultados se destaca que los valores de Su crítico son ligeramente inferiores al Su obtenido de ensayos.

5. CONCLUSIONES

Las máculas son depresiones que deben su origen a la migración de fluidos a superficie y pueden representar un riesgo geológico importante para estructuras costa afuera. La presencia de máculas en emplazamientos de estructuras puede condicionar rutas de tubería, afectar la estabilidad del fondo marino, particularmente en laderas, reducir la capacidad de carga, producir asientos de placas de apoyo y otras cimentaciones superficiales y modificar la permeabilidad vertical del suelo. Las máculas también tienen interés desde una perspectiva de riesgo sísmico; casos como los de Grecia hacen pensar que la emanación repentina de fluidos, podría ser el anticipo sismos o terremotos. Por estas razones es conveniente caracterizar y delimitar correctamente su presencia en el fondo marino.

La batimetría multihaz, el sonar de barrido lateral, las muestras de suelo y los videos adquiridos por vehículos de operación remota son elementos habituales para la identificación de las máculas en del fondo marino. Tener resultados de buena resolución y calidad facilita la identificación de geoformas u obstáculos que puedan encontrarse en lugares de interés.

El empleo de métodos semiautomatizados para la delimitación de las geoformas tipo mácula, reduce de manera significativa el tiempo de caracterización de las mismas, sin embargo, el criterio ingenieril debe prevalecer para realizar los ajustes que se consideren necesarios tomando en cuenta perfil de suelo donde se encuentran, corrientes del lugar, columna de agua, estructuras antropogénicas entre otras. Para poder utilizar los métodos semiautomatizados de identificación de las máculas, se debe seleccionar áreas pequeñas y luego proceder a la integración la información. De este modo se podrán ajustar los parámetros de entrada en función de la profundidad y extensión de las depresiones, para así abarcar el conjunto de geoformas objeto de estudio.

En el ejemplo de aplicación en el mar Caribe, se logran distinguir máculas normales, unitarias y elongadas en los tres campos seleccionados. Se estima que las máculas unitarias, por la experiencia de Noruega, son producto de emanaciones cíclicas de fluidos, y las máculas normales de emanaciones explosivas intercaladas con flujos cíclicos a superficie.

Las máculas descritas en el mar Caribe se asemejan a la media de las máculas encontradas en diferentes puntos a nivel mundial, presentando estas áreas, diámetros y profundidades comunes para este tipo de estructuras. De lo observado en el mar Caribe y la experiencia mundial, las máculas no llegan a superar los 15 metros de profundidad, siendo lo más común encontrar máculas de hasta 5 metros; estas estructuras se consideran entonces de tipo somero que se forman principalmente en sedimentos fino-blandos.

La pendiente de las máculas descritas en este trabajo varía de 10° a 28° aproximadamente, y en el caso que no estén activas, están pendientes disminuirán con el tiempo por la acción de modelación de las corriente y ajustes de los materiales de las pendientes, sin embargo, en el caso de estar activas (que sólo se puede conocer tras un monitoreo constante), estás pendientes se podrían mantener e incluso aumentar como en caso de la bahía de Belfast.

Aprovechando los resultados del análisis morfológico de las máculas pueden obtenerse parámetros de interés para el proyecto geotécnico. Bajo la hipótesis de talud infinito, se ha realizado el análisis retrospectivo de la estabilidad de las laderas de las máculas, donde los valores de resistencia al corte sin drenaje resultantes han resultado inferiores, pero cercanos, a los valores de Su obtenidos de los resultados de laboratorio y ensayos CPTU. Dado el escaso coste relativo de la adquisición de datos morfológicos y su ejecución durante las primeras etapas de investigación este tipo de análisis puede ser atractivo en futuros desarrollos costa afuera.

6. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Geohidra Consultores C.A., haber puesto a nuestra disposición los datos necesaria para la elaboración del presente artículo.

7. REFERENCIAS

Andersen, K.H., Lunne, T., Kvalstad, T.J., y Forsberg, C.F. (2008). Deep Water Geotechnical Engineering. *Proceedings of the XXIV National Conference of the Mexican Society of Soil Mechanics, Aguascalientes, Mexico City, Mexico, 26-29 November, 2008.*

Andrews, B., Brothers, L.L, y Barnhardt, W.A. (2010). Automated feature extraction and spatial organization of seafloor pockmarks, Belfast Bay, Maine, USA. *Geomorphology*, 124(1-2): pp. 55-64.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice API-RP2A for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. Washington, DC: API.

Cathles, L.M., Su, Z., y Chen, D. (2010). The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 27(1): pp. 82-91.

Cox, D.W. (2012). The Effect of Rising Gas on Submerged Foundations and Structures. Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies-Present and Future, London, UK, 12-14 September 2012, pp. 119-126. Dando, P.R., Hughes, J.A., Leahy, Y., y Zivanovic, S. (1995). Earthquakes increase hydrothermal venting and nutrient inputs into the Aegean. *Continental Shelf Research*, 15(2): pp. 655-662.

Det Norske Veritas (DNV) (1992). Offshore Standard DNV-CN-30.4, Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures, Appendix F-Foundations. Oslo (Norway): DNV.

Fonseca, L.R., y Álvarez, M. (2013). Sistemas de información geográfica y el análisis de los pockmarks en el suelo marino, al norte del estado Sucre; Venezuela. *Geominas*, 41(60): pp. 61-65.

Gafeira, J. (2017). BGS Seabed Mapping Toolbox-User Guide, s.l.: British Geological Survey Internal Report R/17/040.

Gafeira, J., Dolan, M.FJ., y Monteys, X. (2018). Geomorphometric Characterization of Pockmarks by Using a GIS Based Semi-Automated Toolbox. *Geosciences*, 8, 5, 154.

Gafeira, J., Long, D., y Díaz-Doce, D. (2012). Semi-automated characterisation of seabed pockmarks in the Central North Sea. *Near Surface Geophysics*, 10(4): pp. 303-314.

Geohidra Consultores C.A. (2010). Servicio de recolección y procesamiento de datos geotécnicos para la plataforma, cabezales submarinos y tubería. Proyecto Mariscal Sucre (PMS). Vicepresidencia de Geociencias. Caracas (Venezuela): Geohidra.

Hance, J.J. (2003). Development of a Database and Assessment of Seafloor Slope Stability Based on Published Literature. M.S. Thesis. Austin (TX/USA): The University of Texas.

Hovland, M., Gardner, J.V., y Judd, A. (2002). The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, Vol. 2, pp. 127-136.

Hovland, M., Heggland, R., De Vries, M.H., y Tjelta, T.I. (2010). Unit-pockmarks and their potential significance for predicting fluid flow. *Marine and Petroleum Geology*, 27(6): pp. 1190-1199.

Hovland, M., y Judd, A. (1988). Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on Geology, Biology and Marine Environment. London (UK): Graham & Trotman.

International Organization for Standardization (2003). ISO 19901-4:2003 Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures-Part 4: Geotechnical and foundation design considerations. Geneva (Switzerland): ISO.

Judd, A., y Hovland, M. (2007). Seabed Fluid Flow: Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. New York: Cambridge University Press.

King, L.H., y MacLean, B. (1970). Pockmarks on the Scotian Shelf. *Geological Society of America Bulletin*, 81(10): pp. 3141-3148.

Nicholas, W.A., *et al.* (2014). Pockmark development in the Petrel Sub-basin, Timor Sea, Northern Australia: Seabed habitat mapping in support of CO_2 storage assessments. *Continental Shelf Research*, Vol. 83, pp. 129-142.

Picard, K., *et al.* (2018). Origin of High Density Seabed Pockmark Fields and Their Use in Inferring Bottom Currents. *Geosciences*, 8, 6, 195.

Randolph, M., Cassidy, M., Gourvenec, S., y Erbrich, C. (2005). Challenges of Offshore Geotechnical Engineering. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Geotechnology in Harmony with the Global Environment*: Vol. 1, pp. 123-176.

Randolph, M., y Gourvenec, S. (2011). *Offshore Geotechnical Engineering*. New York: Spon Press.

Rogers, J.N., *et al.* (2006). Shallow-water pockmark formation in temperate estuaries: A consideration of origins in the western Gulf of Maine with special focus on Belfast Bay. *Marine Geology*, 225(1): pp. 45-62. Sagaseta, C., Cañizal, J., y Da Costa, A. (2012). *Geotecnia I, Propiedades del terreno*. Santander: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander.

Sahling, H., *et al.* (2007). Pockmarks in the Northern Congo Fan area, SW Africa: Complex seafloor features shaped by fluid flow. *Marine Geology*, 249(1-2): pp. 206-225.

Scanlon, K.M., Coleman, F.C., y Koenig, C.C. (2005). Pockmarks on the outer shelf in the northern Gulf of Mexico: Gas-release features or habitat modifications by fish? *American Fisheries Society Symposium*, Vol. 41, pp. 301-312. Schattner, U., *et al.* (2016). Pockmark asymmetry and seafloor currents in the Santos Basin offshore Brazil. *Geo-Marine Letters*, Vol. 36, pp. 457-464.

Umbilical Manufacturers' Federation (2017). *Guidance Note: Free Span Analysis UMF-GN04-02*, p. 5.

Webb, K.E. (2009). *Ecology and geology of pockmarks*. Dissertation for the degree of Philosophiae Doctor. Oslo (Norway): University of Oslo.

Whiticar, M.J. (2002). Diagenetic relationships of methanogenesis, nutrients, acoustic turbidity, pockmarks and freshwater seepages in Eckernförde Bay. *Marine Geology*, 182(1-2): pp. 29-53.