



**FACULTAD DE OCEANOGRAFIA, PESQUERIA, CIENCIAS ALIMENTARIAS Y  
ACUICULTURA**

PLUMAS DE GAS Y RASGOS MORFOLÓGICOS A LO LARGO DEL MARGEN  
CONVERGENTE PERUANO ENTRE PUNTA SAL Y PUNTA PARIÑAS

**Línea de investigación:**

**Condiciones Oceanográficas y su Impacto en los Recursos Hídricos**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Pesquero

**Autor:**

Ancco Chota, Oscar Humberto

**Asesor :**

Herbozo Jiménez, Gerardo Manuel

ORCID: 0000-0001-5682-7590

**Jurado:**

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Hinojosa Blanco, Ignacio Leonidas

Llontop Vélez, Carlos

**Lima - Perú**

**2022**

**Referencia:**

Ancco, O. (2022). *Plumas de gas y rasgos morfológicos a lo largo del margen convergente peruano entre Punta Sal y Punta Pariñas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/6251>



**Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)**

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura

**PLUMAS DE GAS Y RASGOS MORFOLÓGICOS A LO LARGO DEL MARGEN  
CONVERGENTE PERUANO ENTRE PUNTA SAL Y PUNTA PARIÑAS**

**Línea de Investigación:**

Condiciones Oceanográficas y su Impacto en los Recursos Hídricos

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Pesquero

**Autor**

Ancco Chota, Oscar Humberto

**Asesor**

Herbozo Jiménez, Gerardo Manuel

ORCID:  [0000-0001-5682-7590](https://orcid.org/0000-0001-5682-7590)

**Jurado**

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Hinojosa Blanco, Ignacio Leonidas

Llontop Vélez, Carlos

Lima - Perú

2022

*«Me iré con ustedes falsos y sombríos senadores; proclamen el bien, dejen fuera los malos llantos malvados. Desafío al poderoso titán y a sus trovadores; y, con una sonrisa, los llevaré a los Siete Mares de Rhye» (Mercury, 1974).*

**DEDICATORIA**

*A mi padre Humberto,  
por los ejemplos de perseverancia  
y constancia que siempre lo caracterizan  
y que me ha infundado siempre, por el valor  
mostrado para salir adelante y por su gran amor.*

*A mi madre Edith,  
por su apoyo en todo momento  
y por su incalculable e incondicional  
amor que me ofrece en cada instante de mi vida.*

*A mi hermana Dayana,  
por su amistad, paciencia y comprensión  
que siempre me brinda y ver en ella un ejemplo a seguir.*

*A mi amado Perú,  
donde tuve la dicha de nacer;  
y como dijo el libertador Simón Bolívar:  
«Porque primero es el suelo nativo que nada,  
nuestra vida no es otra cosa que la herencia de nuestro país».*

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Gerardo Herbozo, por su desinteresada e invaluable contribución de conocimientos en Geofísica Marina, Hidroacústica, Geología Marina, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Programación en Linux, por orientarme y motivarme en mi etapa profesional, por creer en mis aptitudes y ser un gran amigo. Al programa de Geología Marina y Geología de la Antártida perteneciente al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), que fue el marco científico para el desarrollo de esta investigación. Al Ing. Luis Cerpa, Jefe del Programa de Geología Marina y Geología de la Antártida, por su contribución desinteresada de enseñanzas, acertados comentarios, consejos y guías para realizar esta tesis. A la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV) de la Marina de Guerra del Perú (MGP) que, al tener una alianza estratégica con el INGEMMET, nos permitieron usar la plataforma de trabajo del B.A.P. ZIMIC para la recolección de datos y poder realizar esta investigación. A mis amigos José, Kathy, Deisy, María, Anacé y Carlos, compañeros de trabajo que con su amistad y aporte de conocimientos, permitieron desarrollar mi vida profesional. A Arnold, Wilson, Dennis y Ulises, pertenecientes al programa de la Carta Nacional de Suelos de la Dirección de Geología Regional del INGEMMET, liderado por la MSc. Cristina Cereceda, muchas gracias a ustedes por soportar mis exposiciones enredadas sobre mi tesis, me ayudaron mucho con sus consejos y sus correcciones, estoy eternamente agradecido. A la gestión del Ing. Oscar Bernuy, quién fue presidente ejecutivo del INGEMMET y en especial al Dr. José Macharé, asesor científico, que gracias a su apoyo fue posible emprender nuevos retos en el programa de Geología Marina y Geología de la Antártida dejando como uno de los resultados este trabajo de tesis. Además, una apreciación a la música que me acompañó a lo largo de mi vida y que ahora es parte de mi esencia, el rock and roll. Por último, un reconocimiento especial al Ing. Milner Calonge, uno de mis mejores amigos de la universidad que lamentablemente ya no se encuentra más con nosotros, Dios decidió llevárselo para que con sus ocurrencias dibuje sonrisas en el cielo. Siempre estarás en nuestros corazones y ahora puedo decir: ¡Lo logramos «pelao»!

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>		<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT</b>		<b>XV</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>		<b>1</b>
1.1	Descripción y formulación del problema . . . . .	2
1.2	Antecedentes . . . . .	3
1.3	Objetivos . . . . .	4
1.3.1	Objetivo general . . . . .	4
1.3.2	Objetivos específicos . . . . .	4
1.4	Justificación . . . . .	5
1.5	Hipótesis . . . . .	5
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>		<b>7</b>
2.1	Bases teóricas sobre el tema de investigación . . . . .	7
2.1.1	Hidroacústica para la exploración del fondo marino . . . . .	7
2.1.2	Plumas de gas . . . . .	11
2.1.3	Detección de plumas de gas . . . . .	14
2.1.4	Tecnología de detección de plumas de gas . . . . .	16
2.1.4.1	Ecosonda . . . . .	16
2.1.4.1.1	Tecnología monohaz . . . . .	19
2.1.4.1.2	Tecnología multihaz . . . . .	21
2.1.4.1.3	Ecograma digital . . . . .	22
2.1.4.1.4	Ecotrazos y clasificación . . . . .	23
2.1.5	Comparación acústica entre organismos hidrobiológicos y plumas de gas . . . . .	24
2.1.5.1	Burbujas en resonancia . . . . .	24
2.1.5.2	Burbujas y plancton . . . . .	26
2.1.5.3	Burbujas y peces . . . . .	28

2.1.5.4	Burbuja ascendente . . . . .	30
2.1.6	Concepto de margen convergente . . . . .	30
2.1.7	Morfología del margen convergente peruano . . . . .	31
2.1.7.1	Descripción general de la plataforma continental peruana	33
2.1.7.2	Descripción principal del alto estructural . . . . .	35
2.1.7.3	Características del talud continental peruano . . . . .	35
2.1.7.4	Fisiografía de la fosa . . . . .	39
2.1.7.5	Rasgos principales de la Placa de Nazca . . . . .	40
2.1.8	Rasgos morfológicos predominantes en las zonas de expulsión de gas natural . . . . .	40
2.1.8.1	Volcán de fango . . . . .	40
2.1.8.2	Pockmark . . . . .	42
2.1.8.3	Zona de fractura y falla geológica . . . . .	44
<b>III.</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>46</b>
3.1	Tipo de investigación . . . . .	46
3.2	Ámbito temporal y espacial . . . . .	46
3.3	Variables . . . . .	47
3.3.1	Independientes . . . . .	47
3.3.2	Dependientes . . . . .	48
3.4	Población y muestra . . . . .	48
3.5	Instrumentos . . . . .	48
3.6	Procedimientos . . . . .	48
3.6.1	Etapa de pre-campo . . . . .	48
3.6.2	Etapa de campo . . . . .	49
3.6.3	Etapa de post-campo . . . . .	49
3.7	Análisis de datos . . . . .	53
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>54</b>
4.1	Morfología regional del fondo marino . . . . .	54

4.2	Zonas de expulsión de gas natural y rasgos morfológicos . . . . .	61
4.3	Anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural . . . . .	73
4.4	Análisis geoestadístico de distribución espacial de zonas de expulsión de gas natural . . . . .	84
<b>V.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>92</b>
5.1	Relación pluma de gas/rasgo morfológico . . . . .	92
5.2	¿Vida en el fondo marino costa afuera de Talara dependiente de la expul- sión de gas natural? . . . . .	94
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>96</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>97</b>
<b>VIII.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>98</b>
<b>IX.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>111</b>
	Anexo A. Vita . . . . .	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Modelo conceptual que define el escenario de relación directa de la hipótesis . . . . .	6
Figura 2.	Modelo conceptual que define el escenario de relación indirecta de la hipótesis . . . . .	6
Figura 3.	Desplazamiento de onda sonora de frecuencia única, con forma de onda sinusoidal . . . . .	7
Figura 4.	Reflexión y transmisión de una onda de sonido . . . . .	9
Figura 5.	Esquema sobre el funcionamiento de una ecosonda . . . . .	18
Figura 6.	Esquema básico de prospección con ecosonda de tecnología monohaz .	20
Figura 7.	Tipos de información hidroacústica recibida por el sistema multihaz . .	22
Figura 8.	Ecograma generado por una ecosonda científica de pesca con tecnología monohaz . . . . .	23
Figura 9.	Ecograma generado por una ecosonda de sistema multihaz . . . . .	23
Figura 10.	Modelado de reflejo acústico de aspecto dorsal de algunos objetos biológicos comunes y una burbuja de gas . . . . .	27
Figura 11.	Movimiento convergente de placas . . . . .	31
Figura 12.	Margen convergente peruano . . . . .	33
Figura 13.	Corte transversal este-oeste que muestra las características morfoestructurales del margen convergente peruano . . . . .	36
Figura 14.	Vista en planta de las provincias fisiográficas del talud continental . . .	37
Figura 15.	Líneas o transectos de rastreo de la provincia A . . . . .	38
Figura 16.	Fisiografía y perfil batimétrico de las Provincias A, B, C y D del talud continental . . . . .	39
Figura 17.	Imágenes de expulsión de gas natural del volcán de fango Håkon Mosby	41
Figura 18.	Fotografía de un volcán de fango terrestre . . . . .	42
Figura 19.	Fotografía de un pockmark (Noruega-Mar del Norte) . . . . .	43
Figura 20.	Descripción general de fallas geológicas . . . . .	45

Figura 21.	Ubicación del área de estudio perteneciente a la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 en el margen convergente peruano . . . . .	47
Figura 22.	Post-procesamiento batimétrico . . . . .	50
Figura 23.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica en forma de pluma causada por una nube ascendente de burbujas de gas metano . . .	50
Figura 24.	Identificación de un volcán de fango en la edición de batimetría . . . . .	53
Figura 25.	Mapa de perfiles batimétricos del área de la Carta Náutica Recalada n.º 112 de la DIHIDRONAV . . . . .	56
Figura 26.	Perfil 1 este-oeste (sector norte) del área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 . . . . .	57
Figura 27.	Perfil 2 este-oeste (sector norte-centro) del área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 . . . . .	58
Figura 28.	Perfil 3 este-oeste (sector sur-centro) del área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 . . . . .	59
Figura 29.	Perfil 4 este-oeste (sector sur) del área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 . . . . .	60
Figura 30.	Perfil 5 norte-sur (plataforma-talud) del área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 . . . . .	60
Figura 31.	Perfil 6 norte-sur (talud) del área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 . . . . .	61
Figura 32.	Mapa de distribución de zonas de expulsión de gas natural del área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 . . . . .	62
Figura 33.	Dos zonas de expulsión de gas en la plataforma continental que guardan una relación con volcanes de fango . . . . .	64
Figura 34.	Perfil 1 este-oeste del volcán de fango en la plataforma continental . . .	64
Figura 35.	Perfil 2 este-oeste del volcán de fango en la plataforma continental . . .	65
Figura 36.	Zona de expulsión de gas en la plataforma continental que guarda una relación con un afloramiento rocoso . . . . .	65
Figura 37.	Perfil 3 este-oeste del afloramiento rocoso en la plataforma continental .	66

Figura 38.	Zona de expulsión de gas en la plataforma continental que guarda una relación con un volcán de fango . . . . .	66
Figura 39.	Perfil 4 este-oeste del volcán de fango en la plataforma continental . . . . .	67
Figura 40.	Zona de expulsión de gas en el talud continental que guarda una relación con un pockmark . . . . .	67
Figura 41.	Perfil 5 este-oeste del pockmark en el talud continental . . . . .	68
Figura 42.	Zona de expulsión de gas en el talud continental que guarda una relación con un canal de cañón submarino . . . . .	68
Figura 43.	Perfil 6 este-oeste del canal del cañón submarino en el talud continental . . . . .	69
Figura 44.	Zona de expulsión de gas en el talud continental que guarda una relación con una falla . . . . .	69
Figura 45.	Perfil 7 este-oeste de la falla en el talud continental . . . . .	70
Figura 46.	Zona de expulsión de gas en el talud continental que guarda una relación con un pockmark . . . . .	70
Figura 47.	Perfil 8 este-oeste del pockmark en el talud continental . . . . .	71
Figura 48.	Dos zonas de expulsión de gas en el talud continental que guardan una relación con volcanes de fango . . . . .	71
Figura 49.	Perfil 9 este-oeste del volcán de fango en el talud continental . . . . .	72
Figura 50.	Perfil 10 este-oeste del volcán de fango en el talud continental . . . . .	73
Figura 51.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas con una estructura de relieve positiva en el suelo marino perteneciente a un volcán de fango en la plataforma continental . . . . .	74
Figura 52.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural con una estructura de relieve positiva en el suelo marino perteneciente a un volcán de fango en la plataforma continental . . . . .	75
Figura 53.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas en la plataforma continental . . . . .	76

Figura 54.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas con una estructura de relieve positiva en el suelo marino perteneciente a un volcán de fango en la plataforma continental . . .	77
Figura 55.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas en el talud continental . . . . .	78
Figura 56.	Ecograma multihaz que muestra tres anomalías acústicas de zona de plumas de gas con una estructura de relieve negativa en el suelo marino que pertenece a un canal de cañón submarino en el talud continental . . . . .	79
Figura 57.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas en el talud continental . . . . .	80
Figura 58.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas en el talud continental . . . . .	81
Figura 59.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas con una estructura de relieve positiva en el suelo marino en el talud continental . . . . .	82
Figura 60.	Ecograma multihaz que muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas con una estructura de relieve positiva en el suelo marino que representa un volcán de fango en el talud continental . . . . .	83
Figura 61.	Histograma de frecuencias de altura de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural . . . . .	84
Figura 62.	Histograma de frecuencias de profundidad de columna de agua de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural . . . . .	85
Figura 63.	Histograma de frecuencias de distancia entre anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos . . . . .	86
Figura 64.	Histograma de frecuencias de índice (Distancia/Altura) de áreas de plataforma continental, entre 0 y 200 m de profundidad de columna de agua . . . . .	88

Figura 65.	Histograma frecuencias de índice (Distancia/Altura) de áreas de talud superior, entre 200 y 650 m de profundidad de columna de agua . . . . .	89
Figura 66.	Histograma de índice (Distancia/Altura) de áreas de talud superior, entre 650 y 1750 m de profundidad de columna de agua . . . . .	90
Figura 67.	Histograma de frecuencias de índice global . . . . .	91

## RESUMEN

Una pluma de gas es un conjunto de burbujas de gas natural que ascienden de forma vertical o subvertical desde el fondo marino; además, han sido observadas en distintos márgenes continentales del mundo. Esta tesis tiene como objetivo caracterizar la relación de plumas de gas con rasgos morfológicos presentes entre Punta Sal y Punta Pariñas mediante interpretación hidroacústica, con la finalidad de ubicar zonas de expulsión de gas del fondo marino. Se utilizaron datos hidroacústicos multihaz recolectados durante el crucero INGEMAR I, organizado en el año 2016 por el INGEMMET en cooperación con la DIHIDRONAV. Luego de realizar una revisión, post-procesamiento y análisis de los datos hidroacústicos, se detectaron 477 anomalías acústicas agrupadas en 66 zonas de expulsión de gas entre la plataforma continental y el talud superior asociadas a volcanes de fango, pockmarks, cañones submarinos y estructuras anticlinales donde ha existido exploración y explotación de hidrocarburos. Se concluye que, existe una relación directa entre zonas de expulsión de gas y rasgos morfológicos (70 % con relación directa), tales como volcanes de fango, pockmarks y fallas a partir del índice global (distancia/altura); esto concuerda con el escenario n.º 1 de la hipótesis. Sin embargo, existe una relación indirecta entre zonas de plumas de gas y rasgos morfológicos con una menor predominancia (30 % con relación indirecta), descritas de igual manera a través del índice global; esto corresponde al escenario n.º 2 de la hipótesis. Por ende, no todas las zonas de expulsión de gas tienen un origen con base en rasgos morfológicos.

**Palabras clave:** Perú, margen convergente peruano, plumas de gas natural, rasgos morfológicos, fondo marino, hidroacústica, ecosonda de batimetría multihaz, geología marina

## ABSTRACT

A gas flare is a set of natural gas bubbles that rise vertically or subvertically from the deep sea; moreover, they have been observed in different continental margins of the world. This thesis aims to characterize the relationship of gas flares with morphological features present between Punta Sal and Punta Pariñas through hydroacoustic interpretation, in order to locate areas of gas expulsion from the deep sea. Multibeam hydroacoustic data collected during the INGEMAR I cruise, organized in 2016 by INGEMMET in cooperation with DIHIDRONAV, were used. After performing a review, post-processing and analysis of the hydroacoustic data, 477 acoustic anomalies were detected grouped in 66 gas expulsion zones between the continental shelf and the upper slope associated with mud volcanoes, pockmarks, submarine canyons and anticlinal structures where there has been exploration and exploitation of hydrocarbons. It is concluded that there is a direct relationship between gas expulsion zones and morphological features (70 % with direct relationship), such as mud volcanoes, pockmarks and faults from the global index (distance/height); this agrees with scene n.º 1 of the hypothesis. However, there is an indirect relationship between gas flare zones and morphological features with a lower dominance (30 % with indirect relationship), described in the same way through the global index; this corresponds to scene n.º 2 of the hypothesis. Therefore, not all gas ejection zones have an origin based on morphological features.

**Keywords:** Peru, Peruvian convergent margin, natural gas flares, morphological features, deep sea, hydroacoustics, multibeam bathymetry echo sounder, marine geology

## I. INTRODUCCIÓN

Evidencia hidroacústica y geofísica obtenida en márgenes continentales alrededor del mundo señala que la expulsión de gas natural del fondo marino suele estar relacionada a rasgos morfológicos del relieve submarino tales como estructuras anticlinales (Hovland et al., 1984; Greinert et al., 2006; Römer et al., 2012).

Esta expulsión de gas natural proviene de zonas subsuperficiales que han almacenado gas natural de origen biogénico, generalmente gas metano ( $\text{CH}_4$ ), producto de la descomposición microbiana de materia orgánica (Suess y von Huene, 1990). Sin embargo, expulsiones de gas desde el fondo marino tienen contribuciones de gases de procedencia profunda (i.e., *gas natural de origen termogénico*) que se encuentran ligados a yacimientos de petróleo y gas (Judd y Hovland, 2007). Las ocurrencias de gas detectadas por métodos hidroacústicos han generado el interés de la industria energética y de la comunidad científica para diversas investigaciones multidisciplinarias.

Asimismo, este fenómeno geológico de expulsión de gas tiene gran implicancia para el subsuelo, los fondos y los ambientes marinos, dado que el flujo de fluidos del fondo marino afecta la morfología del lecho marino, promueve la mineralización y ecología bentónica, manteniendo comunidades biológicas quimiosintéticas únicas. Además, las emisiones de fluidos naturales tienen un impacto significativo en la composición de los océanos y la atmósfera. La expulsión de gas metano tiene repercusiones importantes para el clima global (Judd y Hovland, 2007).

Por otro lado, el gas poco profundo es un riesgo geológico significativo para las operaciones costa afuera y, a su vez, son un indicio para la exploración petrolera. Los hidratos de gas y los minerales hidrotermales son recursos potenciales que repercuten en el futuro (Judd y Hovland, 2007).

Suess y von Huene (1990) señalan que la productividad marina costa afuera de Perú desde el Mioceno ha promovido una abundante producción biogénica de gas metano a lo largo del margen convergente peruano producto de la acumulación de materia orgánica en el fondo marino. Esta producción ha sido responsable de la formación de gas metano que han

dado lugar a depósitos de hidratos de gas en las cuencas Trujillo y Lima (von Breymann et al., 1990; Kvenvolden y Kastner, 1990).

Con base en la primera evidencia proporcionada por Herbozo (2006) que sugiere la existencia de plumas de gas en el margen convergente peruano, la presente investigación tiene como objetivo caracterizar la posible expulsión de gas natural del fondo marino en la zona norte del margen convergente peruano con base en información hidroacústica multihaz de alta resolución obtenida en el crucero de investigación INGEMAR I del Programa de Geología Marina (GEOMAR) y Geología de la Antártida (GANT) de la Dirección de Geología Regional (DGR) del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en cooperación estratégica con la Marina de Guerra del Perú a través de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV).

En el margen convergente peruano no hay estudios sobre la caracterización de plumas de gas dado que no existe exploraciones sistemáticas tales como la realizada por primera vez por el crucero INGEMAR I.

En la presente tesis se estudia la ubicación de posibles zonas de expulsión de gas natural y su relación con los rasgos morfológicos existentes en el área de estudio; además, se realiza un análisis geoestadístico sobre la distribución espacial de estas zonas de expulsión para la interpretación de datos y validación de la hipótesis.

## **1.1 Descripción y formulación del problema**

¿Existe alguna relación/asociación entre plumas de gas y rasgos morfológicos en la zona de estudio entre Punta Sal y Punta Pariñas al norte del Perú?

La expulsión de gas natural se produce en los márgenes continentales geológicamente activos y pasivos. Esta filtración de fluidos relativamente tibios se caracteriza por tener concentraciones elevadas de metano que son empujados hacia arriba a través de los sedimentos por gradientes de presión (Levin, 2005).

En el norte del Perú, costa afuera de Talara se encuentra el área de mayor producción petrolera del mar peruano, el cual ha sido el foco del estudio científico que realizó el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en cooperación estratégica con la Dirección

de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV) perteneciente a la Marina de Guerra del Perú (MGP) llamado INGEMAR I en el año 2016.

Con la detección de zonas de expulsión de gas natural en el área de estudio, y con la identificación de rasgos morfológicos del fondo marino presentes en dichas zonas de expulsión, se podrá inferir si las zonas de expulsión de gas natural tienen relación con rasgos morfológicos. Esto permitirá concluir si la expulsión de gas natural es definida por las estructuras y geoformas del relieve submarino presentes en estas zonas de expulsión.

## 1.2 Antecedentes

Las plumas de gas observadas alrededor del mundo tienen características variables pero suelen tener factores comunes entre sí.

Por citar unos casos, McGinnis et al. (2006) observaron que la expulsión de metano del fondo marino ocurre de forma continua e intermitente durante cortos periodos de tiempo (i.e., *del orden de días*) y que esta expulsión puede ocurrir en amplias zonas del fondo marino asociadas a rasgos batimétricos (e.g., *pockmarks*). Estos autores también señalan que tal expulsión podría ser capaz de llegar a la atmósfera dependiendo de la profundidad de la columna de agua y la altura de las plumas de gas.

Asimismo, en el mar Negro se han observado plumas de gas de hasta 1300 m de altura a 2068 m de profundidad de columna de agua (Greinert et al., 2006).

Por otro lado, en el margen continental de Makrán se encontraron 12 sitios de emisiones de burbujas de gas mediante métodos hidroacústicos, donde algunos se asociaron a estructuras anticlinales, volcanes de fango y fallas geológicas (Römer et al., 2012). Estos autores observaron que la expulsión de gas natural oscilaba entre 575 m y 2870 m de profundidad de columna de agua y que las plumas con mayor profundidad persistían mucho más tiempo en la columna de agua pero desaparecerían en el límite de la fase de hidratos de gas, por ende, estas burbujas de gas se disuelven en lo profundo de la columna de agua y no contribuyen a la exposición de gas metano en la atmósfera.

En el Perú, la gran productividad de su mar es producto del proceso de afloramiento constante que caracteriza esta zona del Pacífico Oriental (Suess y von Huene, 1990). Gracias

a esta gran productividad marina presente desde aproximadamente el Mioceno (i.e., *hace 20 millones de años*), a lo largo de la plataforma y talud del margen continental peruano se han desarrollado acumulaciones de materia orgánica en el sedimento marino lo cual ha favorecido la generación abundante de gas metano de origen biogénico como resultado del proceso de metanogénesis (Suess y von Huene, 1990; von Breymann et al., 1990).

Se desconoce si existen plumas de gas asociadas a rasgos batimétricos en el margen convergente peruano, pero hay evidencia que sugiere la expulsión de fluidos y gas natural en la plataforma y talud continental en el norte del Perú (Ancco et al., 2018).

En el mes de julio de 1995, NPA (1995) hizo una evaluación preliminar de presencia de *oil slicks* (i.e., *finas capas de aceite que se filtran en la superficie del océano, lagos*) en el norte del Perú (i.e., *desde Trujillo*), utilizando imágenes satelitales ERS-1. Se observó que en el norte del mar peruano, alrededor de la zona petrolífera, existen posibles *oil slicks*, probablemente surgiendo a través de la columna de agua hacia la superficie, pero no existen estudios complementarios que confirmen tales hallazgos.

En el año 2006, Herbozo (2006) muestra, mediante información hidroacústica utilizada para evaluaciones de pesquerías, que existe una posible pluma de gas de 130 m de altura asociada a una estructura anticlinal costa afuera de Chimbote (i.e., *en la cuenca Trujillo*) (9°S) a 600 m de columna de agua. Estos estudios sirvieron como precedente para realizar esta investigación.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

- Caracterizar la relación entre plumas de gas y rasgos morfológicos del fondo marino a lo largo del margen convergente peruano entre Punta Sal y Punta Pariñas.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Compilar información hidroacústica del crucero INGEMAR I realizado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV) de la Marina de Guerra del Perú (MGP).

- Localizar anomalías acústicas de zonas de plumas de gas en ecogramas hidroacústicos.
- Caracterizar la presencia de zonas de expulsión de gas en el área de estudio.
- Reconocer rasgos morfológicos en datos hidroacústicos compilados.

#### 1.4 Justificación

El presente trabajo de tesis propone ubicar y determinar características de zonas de expulsión de gas mediante hidroacústica, y asociarlas a rasgos morfológicos en el margen convergente peruano. Las dos justificaciones más relevantes son la parte energética y la biodiversidad bentónica.

Los resultados de esta tesis permitirán inferir la existencia de depósitos de gas y petróleo que podrían ser económicamente interesantes desde un punto de vista energético.

A su vez, desde un punto de vista biológico, se podrá realizar una asociación con comunidades biológicas bentónicas, bacterianas y vida marina asociada (e.g., *en zonas del fondo marino caracterizadas por rasgos batimétricos escarpados como cañones submarinos*) para futuras investigaciones, dado que es conocida la existencia de comunidades biológicas bentónicas (así como comunidades bacterianas) sujetas a estas ocurrencias de gas (Judd y Hovland, 2007; Thurber et al., 2020). Esto es una característica típica, inseparable y tal vez uno de los mejores vestigios que certifican lugares en el suelo marino donde ocurre la expulsión de fluidos ricos en metano y H<sub>2</sub>S (Suess y von Huene, 1990; Bialas y Kukowski, 2000).

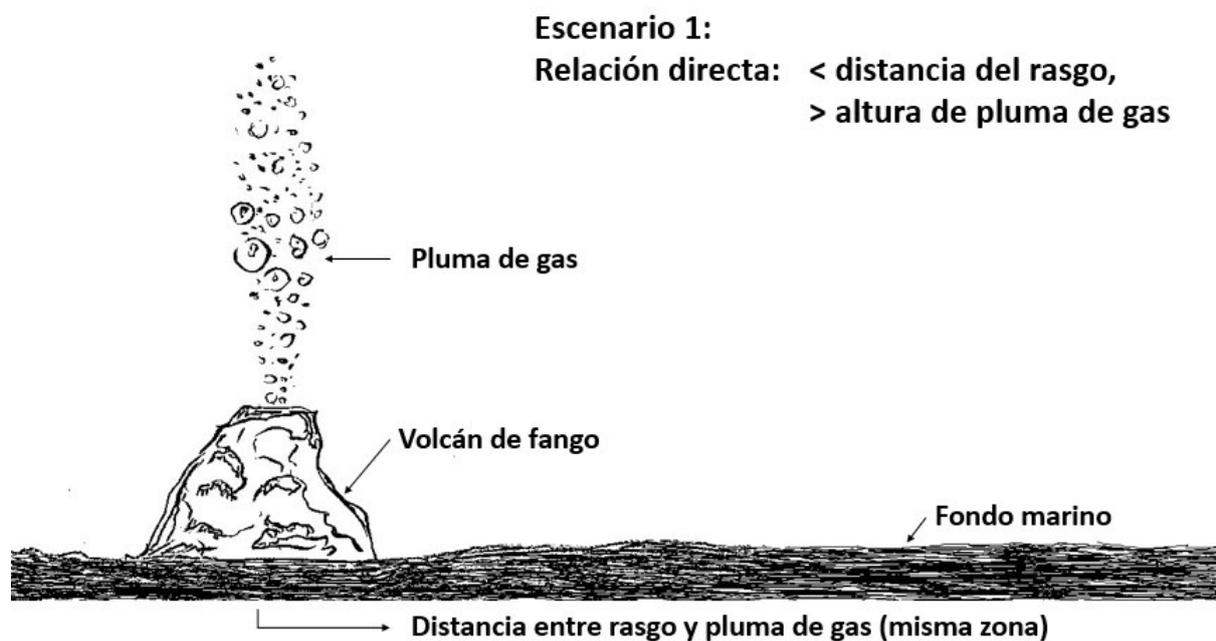
Por otro lado, desde un punto de vista oceanográfico, conocer las zonas donde existe una expulsión de gas natural del fondo marino es clave para estudiar la interacción de estas emanaciones con la biogeoquímica en la columna de agua (e.g., *degradación aeróbica en la columna de agua, por ende desoxigenación y acidificación*) y la capa superficial de sedimentos (e.g., *pockmarks asociados a sedimentos fangosos*).

#### 1.5 Hipótesis

Los rasgos morfológicos del fondo marino definen la presencia y distribución de plumas de gas en el margen convergente peruano entre Punta Sal y Punta Pariñas.

### Figura 1

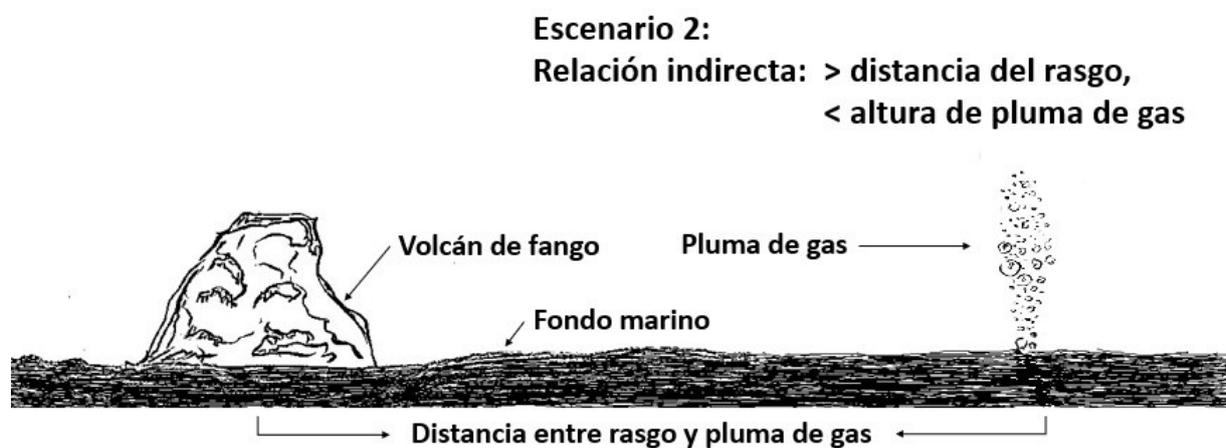
*Modelo Conceptual que Define el Escenario de Relación Directa de la Hipótesis*



*Nota.* Este escenario establece que a menor distancia del rasgo morfológico, mayor altura de pluma de gas.

### Figura 2

*Modelo Conceptual que Define el Escenario de Relación Indirecta de la Hipótesis*



*Nota.* Este escenario establece que a mayor distancia del rasgo morfológico, menor altura de pluma de gas.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

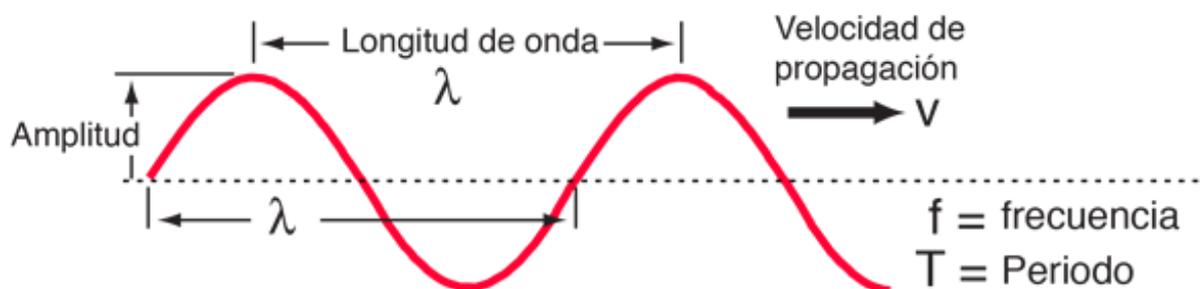
#### 2.1.1 Hidroacústica para la exploración del fondo marino

La hidroacústica o acústica submarina se fundamenta en el estudio físico de la propagación del sonido en medios acuáticos, el cual es utilizado para la detección de dispersores de sonido que están presentes en la columna de agua (Urlick, 1983; Kaharl, 1999).

En la propagación del sonido intervienen las «ondas sonoras» (i.e., *una onda sonora, considerada onda mecánica, es una onda longitudinal que transmite lo que se asocia con sonido*) (Beranek, 1969; Nave, 2000; Andriessen, 2008).

#### Figura 3

*Desplazamiento de Onda Sonora de Frecuencia Única, con Forma de Onda Sinusoidal*



*Nota.* Desplazamiento de onda sonora de frecuencia única, con forma de onda sinusoidal. Muestra la relación de las magnitudes de onda: amplitud de onda  $A$ , longitud de onda  $\lambda$ , velocidad de propagación  $V$ , frecuencia  $f$  y periodo  $T$ ; donde amplitud de onda  $A$ , es el máximo desplazamiento desde el equilibrio; longitud de onda  $\lambda$ , es la distancia repetida de la onda; velocidad de propagación  $V$ , es el espacio que recorre la onda por unidad de tiempo; frecuencia  $f$ , es el número de ciclos por segundo en 1/segundos o Hercios ( $Hz$ ); y periodo  $T$ , es el tiempo necesario para realizar un ciclo completo en segundos/ciclo. Tomado de Nave (2000).

Las principales magnitudes físicas asociadas al sonido son la «longitud de onda», que es la distancia entre los puntos correspondientes de una curva de presión-tiempo (i.e., *distancia entre picos*), y se representa con la letra griega Lambda  $\lambda$ ; la «amplitud de onda», que es la distancia que existe entre el valor máximo (i.e., *el punto más alto de la onda*) y el punto de equilibrio (i.e., *su base*). La amplitud de onda se mide en decibeles (dB) (i.e., *es utilizado para la medición de los niveles de sonido con relación al umbral de la audición humana; la escala de decibeles o decibelios es logarítmica, lo que significa que 20 dB no es el doble de fuerte que 10 dB, sino 10 veces más energía sonora y 30 dB es cien veces más*). A medida que crece la amplitud de onda, aumentan los decibeles, lo que refleja un crecimiento de la intensi-

dad (i.e., *el volumen*) del sonido; «frecuencia», la cual indica el número de ciclos (i.e., *ciclo es el momento en el que la onda vuelve a estar en el mismo punto de la gráfica desde que partió por primera vez*) de la onda sonora que ocurren en una unidad de tiempo; «periodo», que es el tiempo en el que la onda recorre un ciclo completo; y «velocidad de propagación», que es el espacio que recorre la onda por unidad de tiempo.

La longitud de onda y frecuencia son inversamente proporcionales, si disminuye la longitud de onda, aumenta la frecuencia. La frecuencia es inversamente proporcional al periodo, es decir, se cumple que  $f = 1/T$  donde  $f$  es la frecuencia y  $T$  es el periodo (Beranek, 1969; Kinsler et al., 2000; Andriessen, 2008).

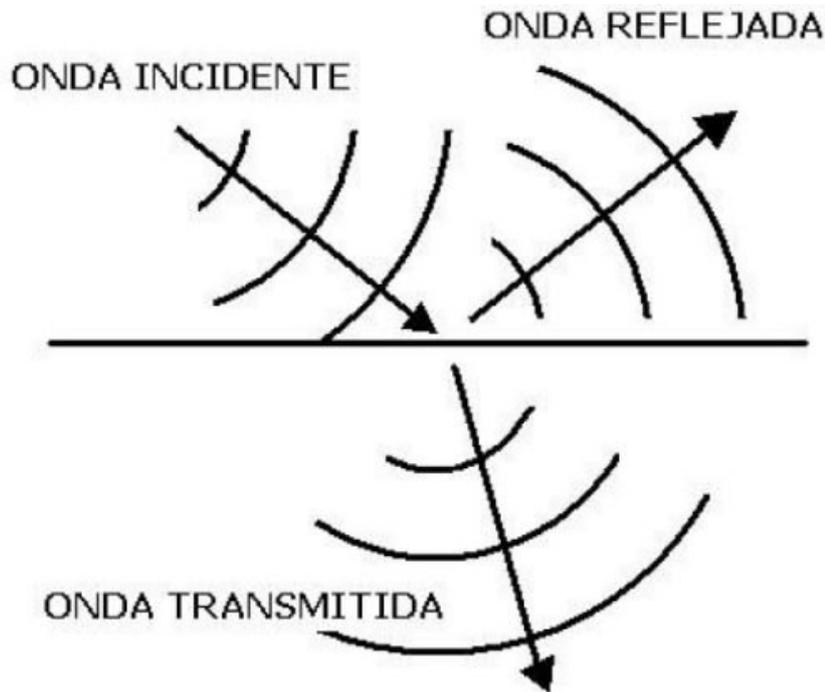
El uso de la hidroacústica tiene beneficios para distintas investigaciones en el mar, tales como generación de imágenes del fondo oceánico de un barco hundido, identificación de fumarolas negras «black-smoker» y chimeneas hidrotermales «hydrothermal vents», medición de nubes de burbujas, plumas de gas y circulaciones; precipitación en el mar e intercambio de gas en olas rompientes; como también evaluación de pesquerías y monitoreo de ballenas. (MacLennan y Simmonds, 1992; Medwin y Clay, 1997). La hidroacústica es una de las mejores herramientas de observación para una cobertura rápida y rentable de volúmenes de agua (Kubilius, 2015).

Por otra parte, existe una propiedad de estado intensiva llamada impedancia acústica, la cual es la resistencia que tienen los medios materiales ante el paso de las ondas sonoras. Cada medio, sólido, líquido o gaseoso, ofrece una facilidad para la propagación del sonido y es constante para un determinado medio, el cual va desde una capa rocosa en el interior de la Tierra hasta el tejido biológico. Además, el límite o zona de contacto entre dos medios se le conoce como interfase (Beranek, 1969; Kinsler et al., 2000; Andriessen, 2008; Rogel Castellanos, 2011).

Entonces, cuando se tienen dos medios de impedancias acústicas distintas ( $Z_1$  y  $Z_2$ ) (e.g., *aire y columna de agua*), parte de una onda sonora que incida en la interfaz de ambos medios, puede transmitirse y otra parte puede ser reflejada.

#### Figura 4

##### Reflexión y Transmisión de una Onda de Sonido



*Nota.* Cuando una onda sonora incide en la frontera de dos medios diferentes, una parte se refleja y otra se transmite. Tomado de EcuRed (2013).

Cuando una onda sonora alcanza la frontera de dos medios distintos, una parte de su energía se transmite al segundo medio, dando lugar en el segundo medio a otra onda de características semejantes a la de la onda incidente; esta onda recibe el nombre de onda transmitida. Por otro lado, cuando el pulso acústico viaja por un medio ( $Z_1$ ) (e.g., *columna de agua*) y rebota en otro medio ( $Z_2$ ) (e.g., *blancos o dispersores de sonido*), dicho rebote de onda acústica en un objetivo se le conoce como onda reflejada, retrodispersión o eco (Beranek, 1969; MacLennan y Simmonds, 1992; Andriessen, 2008). Cuando los dispersores de sonido son muy pequeños y abundantes en un volumen de muestreo, sus ecos se combinan para formar una señal continua con amplitud variable (MacLennan y Simmonds, 1992). Ya no es posible obtener información de objetos individuales pero la intensidad del eco sigue siendo una medida del conjunto de objetos presentes en ese volumen de muestreo en la columna de agua (MacLennan y Simmonds, 1992). Esto se conoce como volumen de retrodispersión  $S_v$ .

La forma en que se reparte la energía transportada por la onda depende de los coeficientes de reflexión  $R$  y de transmisión  $T$ , dos cantidades útiles para estudiar la propagación de la onda sonora. Para el coeficiente de reflexión es el cociente:

$$R = I_r / I_o$$

Donde  $I_o$  es la intensidad de la onda incidente e  $I_r$  es la intensidad de la onda reflejada.

Para el coeficiente de transmisión es el cociente:

$$T = I_t / I_o$$

Donde  $I_o$  es la intensidad de la onda incidente e  $I_t$  es la intensidad de la onda transmitida.

Ahora bien, se puede demostrar que la intensidad de una onda plana (i.e., *también llamada onda monodimensional, es una onda de frecuencia constante que se propaga en una sola dirección a lo largo del espacio*) es proporcional a su amplitud  $A$ :

$$I = (1/2) Z \cdot \omega^2 \cdot A^2$$

Donde  $Z$  es la impedancia acústica del medio y  $\omega$  es la frecuencia de la onda. Por otra parte, el cociente entre la amplitud transmitida y la amplitud incidente es:

$$A_t / A_o = 2Z_1 / (Z_1 + Z_2)$$

Lo que permite que el cociente  $I_t / I_o$  se exprese en términos de las amplitudes de las ondas incidente y transmitida como:

$$I_t / I_o = Z_2 A_t^2 / Z_1 A_o^2$$

Mediante estas expresiones se obtienen el coeficiente de reflexión  $R$  y el coeficiente de transmisión  $T$  en términos de la impedancia acústica  $Z$ .

Entonces:  $R + T = 1$ , puesto que toda la energía ha de repartirse necesariamente entre la reflexión y la transmisión.

Además, la impedancia acústica de un medio es igual a la densidad del medio multiplicada por la velocidad con la que viaja el sonido a través del medio (i.e., *velocidad con la que se transmite o propaga el sonido por el medio*) (Simmonds y MacLennan, 2005).

$$Z = Vp$$

Donde « $V$ » es la velocidad del sonido que viaja a través del cuerpo y « $p$ » es la densidad del cuerpo.

La proporción reflejada de la energía incidente está determinada por  $R$ , el coeficiente de reflexión (Tucker y Gazey, 1966). Si  $Z_1$  y  $Z_2$  son respectivamente las impedancias acústicas

cas de dos medios (e.g., *interfase del agua y del reflector*), entonces:

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

Donde «*R*» es la interfase que separa dos medios la cual está definida por la relación entre la diferencia y la suma de la impedancia acústica de los medios (Medwin y Clay, 1997).

De igual manera, la proporción transmitida de la energía incidente está determinada por *T*, el coeficiente de transmisión (Beranek, 1969). Si  $Z_1$  y  $Z_2$  son respectivamente las impedancias acústicas de dos medios (e.g., *interfase del agua y del reflector*), entonces:

$$T = (2Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

Donde «*T*» es la interfase que separa dos medios la cual está definida por la relación entre dos veces la impedancia acústica del primer medio y la suma de la impedancia acústica de los medios (Beranek, 1969; Kinsler et al., 2000; Andriessen, 2008).

Mientras mayor sea el contraste de la impedancia acústica, mayor será el coeficiente de reflexión, es decir, para que haya una buena reflexión (i.e., *la mayor parte de la energía sea devuelta*), es necesario que las impedancias acústicas de los medios contiguos sean diferentes. Esta onda reflejada, retrodispersión o eco, es la que contiene información importante acerca del segundo medio (e.g., *en la interfase del agua y sedimento se obtiene información importante del sedimento*).

Por otra parte, Si la impedancia acústica es la misma en ambos medios, el coeficiente de transmisión es igual a 1 (i.e., *toda la energía es transmitida*) (Beranek, 1969; Beléndez, 1992; Kinsler et al., 2000).

Existen otros métodos que aplican el principio de impedancia acústica como por ejemplo la sísmica de reflexión, la cual explica que por cada reflexión hay un contraste de impedancia acústica que controla los cambios producidos en la interfase de dos medios (i.e., *cambio de la amplitud de la onda de retorno*) (Barclay et al., 2008; van der Kruk, 2001).

### 2.1.2 *Plumas de gas*

La expulsión de gas natural es conocida comúnmente como plumas de gas (*gas flares*, en inglés), dado que el conjunto de burbujas de gas natural que es liberado del fondo marino, migra hacia la superficie del mar por boyantez desde horizontes sedimentarios por debajo del

fondo marino y tienen una forma vertical o subvertical que se asemejan a lenguas o llamaradas de fuego en forma de una «pluma» (Judd y Hovland, 2007; Michaud et al., 2016). Estas plumas de gas natural presentan concentraciones elevadas de metano ( $\text{CH}_4$ ) (i.e., *consiste en un átomo de carbono en posición central unido a través de enlaces covalentes a cuatro átomos de hidrógeno*) y, se pueden definir, como la manifestación hidroacústica de la presencia de burbujas de gas metano en la columna de agua, debido a la intensa retrodispersión (*backscatter*) de la señal acústica producida por las burbujas de gas (Greinert et al., 2006; Judd y Hovland, 2007).

El proceso de formación de gas natural inicia con la productividad primaria. La productividad primaria es la producción de materia orgánica que realizan los organismos autótrofos a través de los procesos de fotosíntesis o quimiosíntesis, la cual es producto del afloramiento constante que caracteriza esta zona del Pacífico Oriental (Suess y von Huene, 1990). Gracias a esta productividad, existe depositación de materia orgánica producto del proceso de la productividad primaria (Suess y von Huene, 1990). La cantidad de materia orgánica generada se sedimenta en el fondo marino lo cual genera una metanogénesis (i.e., *formación de metano por microbios*), formándose gas biogénico (Suess y von Huene, 1990). Por otra parte, también existe generación de gas metano a través de una termogénesis (i.e., *capacidad de generar calor*), el cual se produce en lo profundo de los fondos marinos, en rocas sedimentarias de grano fino (e.g., lutitas, arcillas, esquistos y ciertas calizas, como pueden ser calizas algales), donde la materia orgánica es degradada por el calor de la Tierra a presiones elevadas, formándose gas termogénico. La acumulación y degradación de esta materia orgánica ha ocurrido desde hace aproximadamente el Mioceno (~20 millones de años), lo cual ha favorecido a la producción de grandes concentraciones de metano (Suess y von Huene, 1990). Además, existe el proceso abiogénico, por el cual, el gas metano es generado a través de procesos inorgánicos que operan en lo profundo de la corteza terrestre y el manto subyacente, pero la cantidad de metano abiogénico que se genera es pequeña (Welhan y Craig, 1983).

La formación de metano mediante el proceso de metanogénesis está influenciada por la cantidad y calidad de materia orgánica. Por tal razón, se ha observado que las plataformas continentales contienen una mayor producción de gas metano, principalmente a través de la

degradación microbiana de materia orgánica en sedimentos marinos en condiciones anaeróbicas (Emeis et al., 2004; Laier y Jensen, 2007).

Ahora, existen barreras biogeoquímicas que controlan las emisiones de gas metano a partir de sedimentos marinos.

El agua de mar tiene altas concentraciones de sulfato (29 mM), lo que ocasiona que la degradación de materia orgánica en los sedimentos anaeróbicos marinos esté dominada por bacterias reductoras de sulfato. Por lo general en estos ambientes, cuando los sedimentos se encuentran en contacto con el agua de mar, no generan metano, solo se produce a partir de compuestos metilados (Oremland et al., 1982; King, 1984). Entonces, la metanogénesis ocurre principalmente en las capas sedimentarias más profundas y en las que el sulfato ha sido agotado por las bacterias reductoras del sulfato. Por ende, por debajo de la zona donde desaparece el sulfato, existe acumulación de metano que puede migrar hacia la superficie a través de la columna de agua y acumularse en estratos de sedimentos superficiales provocadas mayormente por emisiones antropogénicas (Martens y Berner, 1974).

Esta expulsión de gas metano a partir de sedimentos marinos es regulado por bacterias reductoras de sulfato como por las arqueas anaeróbicas oxidantes de metano, en donde el proceso biogeoquímico de oxidación anaeróbica del metano (*AOM, por sus siglas en inglés*) presenta un papel importante, regulando las emisiones de metano hacia la columna de agua y/o hacia la atmósfera (Knittel y Boetius, 2009).

También se determinó que el sulfato es difundido hacia abajo y el metano hacia arriba en la columna sedimentaria (Martens y Berner, 1974). Por ende, se forma una zona de unos pocos centímetros de profundidad en el sedimento, en la que los flujos de sulfato y metano coexisten y son consumidos entre sí. Este proceso biogeoquímico fue establecido en la ecuación de Barnes y Goldberg, 1976:



Esta zona de coexistencia entre sulfato y el metano recibe el nombre de zona de transición sulfato-metano (*SMTZ, por sus siglas en inglés*) (Iversen y Jorgensen, 1985), donde se constituye el principal nicho para las bacterias reductoras del sulfato y una asociación de arqueas metanotróficas anaeróbicas. Esta zona constituye un sumidero de gas metano en los

sedimentos marinos, además previene los escapes de metano hacia la columna de agua y la atmósfera (Hoehler et al., 1994).

Por otro lado, el gas metano también se relaciona con otros compuestos de formación natural llamados hidratos de gas.

Generalmente, a profundidades mayores de 500 m desde el nivel del mar, las plumas de gas suelen asociarse a las zonas de formación de hidratos de gas en el sedimento subyacente, los cuales pueden actuar como fuente de gas metano ya que este gas es el que domina en la mayoría de dichas filtraciones (Judd et al., 2002; Schneider von Deimling et al., 2007; Michaud et al., 2016). En Perú, evidencia regional sugiere que los hidratos de gas suelen formarse por debajo de los 600 m. Los hidratos de gas quitan gas natural del sistema porque estos se forman en sobresaturación debido a la solubilidad de estos en el agua del poro intersticial del sedimento (Herbozo, 2010).

Por ende, si la expulsión de gas metano tiene lugar en un contexto submarino de poca profundidad de columna de agua (i.e., *algunas decenas de metros*), parte de los gases expulsados podrían pasar la barrera del océano y llegar a la atmósfera (Schmale et al., 2005). Pero, en contextos submarinos de gran profundidad, la mayor parte del gas se disuelve y dispersa en la columna de agua, o bien es incorporado a los hidratos de gas y acumulado en el sedimento (McGinnis et al., 2006; Canet y Prol-Ledesma, 2010).

### **2.1.3 Detección de plumas de gas**

La hidroacústica permite detectar la expulsión de gas natural del fondo marino por su principio básico que es la alta retrodispersión de la onda de presión en los contrastes de impedancia acústica entre el agua de mar y las burbujas de metano (i.e., *interfase agua/gas libre*); además, es una de las mejores maneras de detectar una burbuja de gas natural ascendiendo a través de la columna de agua (Schneider von Deimling et al., 2007; Kubilius, 2015).

Si una burbuja es lo suficientemente grande (i.e., *el radio de la burbuja debe ser considerablemente más grande que la longitud de onda*), gran parte de la onda de energía es retrodispersada (Schneider von Deimling et al., 2007). Esto es acreditado para una esfera ideal ya que cualquier onda incidente golpeará la esfera perpendicularmente a su superficie; por

ende, la detección es factible (Schneider von Deimling et al., 2007).

Sin embargo, hay un problema fundamental. El gas puede estar presente en la columna de agua debido a filtraciones, o porque está dentro de la vejiga natatoria de los peces (Judd y Hovland, 2007). Los peces que llevan vejiga natatoria llenos de gas son los objetos acústicos biológicos más similares a las burbujas de gas (Kubilius, 2015). Desde un punto de vista acústico, los peces que poseen una vejiga natatoria llena de gas reflejan el sonido de una manera bastante similar a una burbuja de gas de dimensiones similares (Foote, 1980). Pequeños, pero abundantes peces con vejiga natatoria, (e.g., *miembros de la familia Myctophidae* y *Sternoptichidae*), pueden ser difíciles de separar acústicamente de una sola burbuja de gas (Kubilius, 2015). Sin embargo, los peces sin vejiga natatoria y los organismos planctónicos también pueden tener cierta similitud con las plumas de gas cuando es observado por ecosondas (Kubilius, 2015).

Un parámetro que interviene en la detección hidroacústica de los peces es la diferencia biológica de su vejiga natatoria (Gutiérrez, 2002). Algunos peces son llamados «fisóstomos» porque su vejiga natatoria tiene un conducto que se comunica con el canal alimentario. Estos peces no pueden producir por sí mismos el gas para regular el volumen de la vejiga natatoria durante sus incursiones profundas; también existen los «fisoclistos», que tienen vejiga natatoria cerrada; sin embargo, estos peces pueden regular el volumen de la vejiga natatoria, lo que les permite boyar a cualquier profundidad; esto influye en la reflectividad de ambas especies (MacLennan y Simmonds, 1992; Gutiérrez, 2002).

Por otra parte, también hay plumas de gas que son fácilmente distinguibles de algunos bancos de peces. Dependiendo de la especie, los peces se unen como cardúmenes por tres razones: alimentación, desove, o como parte de su comportamiento normal (Judd y Hovland, 2007). Después de examinar ejemplos acústicos típicos de cardúmenes, Judd et al. (1997) concluyeron que la mayoría de los bancos de peces están difusos y extendidos horizontalmente. Algunas especies (e.g., «pez espada» *Xiphias gladius*) tienden a formar cardúmenes extendidos verticalmente, pero no tienen una estructura geométrica o de forma consistente. Por el contrario, las filtraciones continuas producen una columna de burbujas que se eleva verticalmente a través de la columna de agua debido a la boyantez natural del gas natural, aunque

las corrientes de agua pueden causar cierta desviación (Judd y Hovland, 2007).

Kubilius (2015) sugiere que se pueden usar diferencias conductuales, de comportamiento en la retrodispersión acústica para separar las plumas de gas de los objetos biológicos más comunes, plancton y peces. El comportamiento de algunos cardúmenes como los miembros de la familia *Myctophidae* y *Sternoptychidae* es sustancialmente diferente al de las plumas de gas (Kubilius, 2015).

Es probable que el uso de la respuesta de frecuencia de retrodispersión y los rasgos de comportamiento espacio-temporal brinden las mejores posibilidades para la detección e identificación acústica de las plumas de gas en el fondo marino (Kubilius, 2015).

Las anomalías acústicas en forma vertical o subvertical parecen representar filtraciones continuas de gas natural tanto en aguas profundas como poco profundas (Judd y Hovland, 2007). En aguas más someras, estas columnas de burbujas de gas pueden extenderse a la superficie del mar, pero a menudo la pluma parece desvanecerse a medida que las burbujas se disuelven o salen del haz acústico (Judd y Hovland, 2007).

La identificación e interpretación de burbujas de gas se basa principalmente en la examinación de datos hidroacústicos que a su vez se complementan con técnicas de muestreo y conocimientos previos (Kubilius, 2015).

#### ***2.1.4 Tecnología de detección de plumas de gas***

Desde la primera expedición oceánica en el siglo XIX, con el avance de la tecnología, también se desarrolló la exploración e investigación del fondo marino.

En la actualidad, existen equipos acústicos de alta y baja frecuencia de sonido (i.e., *la frecuencia representa el número de vibraciones por segundo*) como ecosondas, sonares de barrido lateral y perfiladores de subsuelo que son para uso de detección y están diseñados para emitir sonido en intervalos que se alternan con momentos de «escucha» (MacLennan y Simmonds, 1992).

**2.1.4.1 Ecosonda.** Sonar es un término general para cualquier dispositivo que usa sonido para la detección remota u observación de objetos en el agua (MacLennan y Simmonds, 1992). La ecosonda es un tipo de sonar, cuyo haz acústico se dirige verticalmente ha-

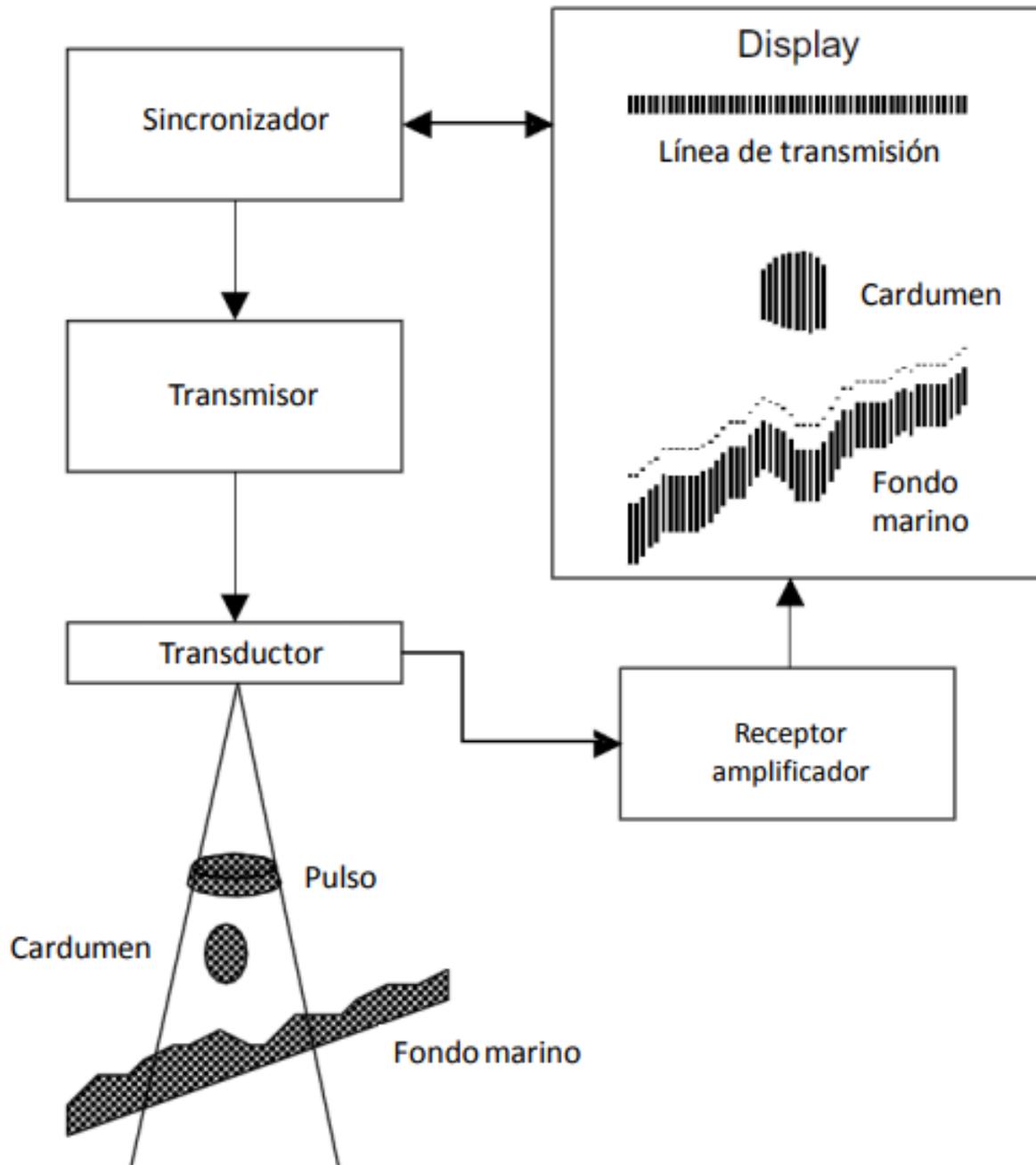
cia abajo (MacLennan y Simmonds, 1992).

Una ecosonda es un instrumento que opera mediante ondas de sonido, utilizado para medir la distancia existente entre la superficie del mar y el fondo marino, así como objetos suspendidos en la columna de agua o que reposan en el fondo (Ballester Mora y García Sala, 2010). Muchos tipos de sonar y ecosonda se utilizan para la detección y observación de peces (MacLennan y Simmonds, 1992).

Este equipo acústico tiene un sistema que consta de una pantalla que se instala en el laboratorio oceanográfico o en muchos casos en el puente de mando y además está compuesto de un registrador (i.e., *display*), un sincronizador, un transmisor, un transductor y un receptor (Simmonds y MacLennan, 2005; Ballester Mora y García Sala, 2010).

**Figura 5**

*Esquema sobre el Funcionamiento de una Ecosonda*



*Nota.* Este esquema se adapta indistintamente al tipo de tecnología utilizado. Tomado de Simmonds y MacLennan (2005).

La ecosonda es utilizada en barcos de investigación científica y de pesca, las cuales poseen un transductor que emite y recibe ondas de sonido que pueden ser usadas para determinar la profundidad calculando el tiempo transcurrido entre la transmisión y la recepción de eco, así como también para la detección de cardúmenes u otros objetos (e.g., *el fondo marino*) (Simmonds y MacLennan, 2005).

El transductor de ecosonda tiene dos funciones. Primero, convierten la energía eléctrica en un pulso acústico llamado *ping*. Segundo, cuando el *ping* es reflejado por un objeto, convierte la energía mecánica (i.e., *el eco*) en eléctrica. El transductor convierte las señales eléctricas en ondas de sonido y viceversa. Por lo tanto, puede cambiar del modo receptor al modo transmisor en cualquier momento (Simmonds y MacLennan, 2005).

Este eco o retrodispersión del sonido puede ser decodificado e interpretado haciendo las correcciones geométricas necesarias en función de la directividad del haz acústico, la velocidad del sonido, la atenuación y la absorción para revelar el perfil de la Fuerza del Volumen de Retrodispersión  $S_V$  (Gutiérrez y Herbozo, 2005).

La ecosonda normalmente va montado en la parte baja del casco del barco, como norma general en el primer tercio de la eslora (i.e., *longitud del barco*), para evitar el ruido de las hélices y las burbujas de aire que se forman en la superficie cuando el barco navega (Ballesterro Mora y García Sala, 2010).

Con la velocidad de sonido de la columna de agua ( $V_s$ ) y el tiempo empleado en regresar la señal ( $\Delta t$ ), se puede conocer la distancia, en este caso la profundidad.

$$\text{Profundidad} = V_s \cdot \Delta t / 2$$

El valor medio de la velocidad del sonido en agua dulce es de 1435 m/s y de 1500 m/s (i.e., *valor estándar*) para agua de mar. La salinidad, la presión y sobretodo la temperatura son las variables que intervienen para conseguir el valor real de la velocidad (Ballesterro Mora y García Sala, 2010).

La ecosonda científica es una herramienta útil para la ubicación y evaluación de biomasa de pesquerías y son ampliamente utilizados para el control de stock de peces (Simmonds y MacLennan, 2005). Sin embargo, hay otros objetos en el mar que pueden causar una retrodispersión acústica significativa como por ejemplo las plumas de gas, que son fáciles de detectar con ecosondas pero la interpretación tiene cierto grado de dificultad (Kubilius, 2015).

**2.1.4.1.1 Tecnología monohaz.** La tecnología monohaz era utilizada en la gran mayoría de levantamientos batimétricos que se realizaban años atrás, en la actualidad con la aparición de la multihaz ha quedado en un segundo lugar.

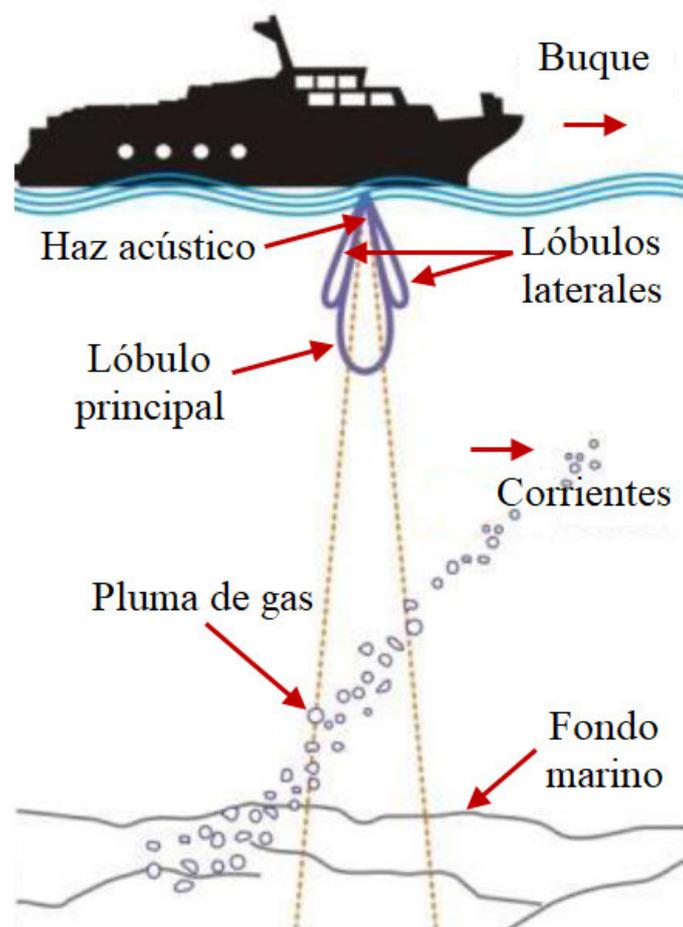
Hoy en día se sigue utilizando en pequeños levantamientos y para detección de peces

(Ballestero Mora y García Sala, 2010).

Este tipo de tecnología utiliza un transductor que genera un solo pulso acústico. El volumen de agua que abarca un pulso, en toda su trayectoria se denomina zona «insonificada» y es comparable con la iluminada por un haz de luz (i.e., *toda la energía acústica que se transmite está confinada a un solo haz que tiene una forma parecida a un cono*) que llega hasta el suelo marino, con lo que no es posible obtener el cien por ciento de cobertura del fondo, siendo necesario hacer líneas a cierta distancia sin poder conocerse lo que hay entre ellas (i.e., *sectores sin información*) (Ballestero Mora y García Sala, 2010).

### Figura 6

*Esquema Básico de Prospección con Ecosonda de Tecnología Monohaz*



*Nota.* El haz acústico emitido por el transductor, está compuesto por un lóbulo principal, el cual es el foco de energía de los transductores; este lóbulo principal se toma de referencia para establecer el ángulo y es el que alcanza las mayores profundidades. También se compone por lóbulos laterales, los cuales son áreas fuera del lóbulo principal en el que se irradia parte de la energía acústica distribuyéndose en estas áreas debido a que no toda la energía se concentra en el lóbulo principal. Dado que esta energía es capaz de producir ecos de retorno de los objetos que encuentra, es posible recibir débiles señales de los lóbulos laterales en aguas poco profundas. Adaptado de Veloso et al. (2015).

**2.1.4.1.2 Tecnología multihaz.** En la década de 1970 se desarrolló la tecnología multihaz debido a la necesidad de conocer y estudiar el fondo marino de una manera más eficiente que con la tecnología monohaz (Schneider von Deimling et al., 2007).

Los ecosondas multihaz han revolucionado nuestra capacidad de resolver geomorfología de los fondos marinos y definir regionalmente su sustrato (Micallef et al., 2017).

Usando un conjunto de haces acústicos en forma de abanico, los rangos oblicuos, los ángulos y la intensidad de la retrodispersión devuelta, se pueden emplear para definir la elevación del suelo marino e inferir el sustrato (Micallef et al., 2017).

Un conjunto de datos batimétricos con un ancho proporcional al sector angular proyectado por el ecosonda son adquiridos a lo largo de la trayectoria del barco (Micallef et al., 2017).

El desarrollo de la tecnología multihaz permitió que el cartografiado marino sea más preciso al interpretar la morfología del suelo marino (Schneider von Deimling et al., 2007).

En comparación con la proyección de imagen convencional mediante ecosondas con tecnología monohaz, el amplio ángulo de cobertura de los haces de los sistemas multihaz permite mapear grandes áreas en un tiempo mucho más corto y se minimizan los costos de operación (Schneider von Deimling et al., 2007; Ballester Mora y García Sala, 2010).

Hasta ahora, las aplicaciones multihaz se han utilizado principalmente para recopilar información sobre el lecho marino; debido a limitaciones de almacenamiento de computadora y datos la información de la columna de agua no pudo registrarse en el pasado (Schneider von Deimling et al., 2007).

Mientras tanto, la tecnología informática actual permite grabar y almacenar grandes cantidades de datos e información de imágenes de columna de agua (*water column imaging: WCI*) (Schneider von Deimling et al., 2007). El creciente interés en datos de columna de agua con sistemas de tecnología multihaz se muestra en la creciente implementación de *WCI* en sistemas multihaz modernos (e.g., *Kongsberg EM302*) (Schneider von Deimling et al., 2007).

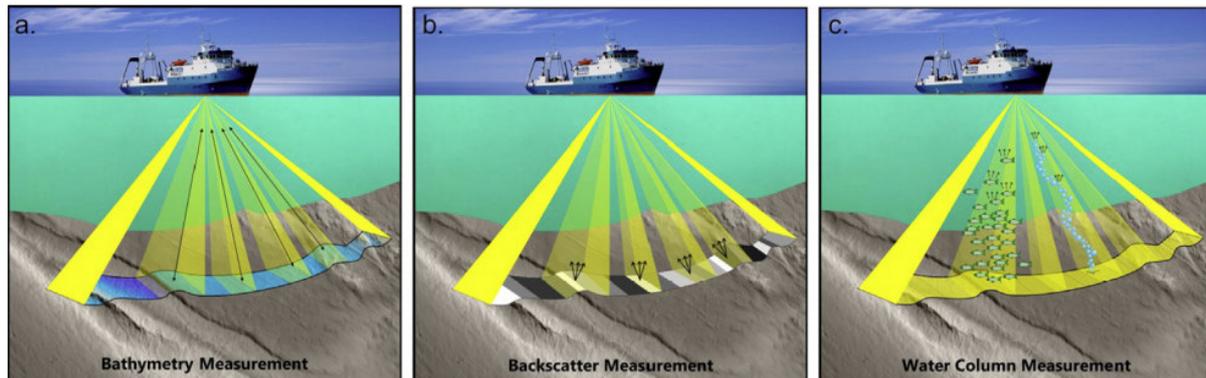
La tecnología multihaz permite la detección hidroacústica del escape de gas natural, que es un fenómeno que se produce globalmente en entornos de deposición costera, deltas principales o cuencas sedimentarias portadoras de hidrocarburos en las plataformas continen-

tales y laderas (Hovland y Judd, 1988; Judd y Hovland, 2007).

La técnica multihaz proporciona exactitud de la posición de las emanaciones e información sobre la dimensión de las plumas de gas en el agua (Schneider von Deimling et al., 2007).

### Figura 7

#### *Tipos de Información Hidroacústica Recibida por el Sistema Multihaz*

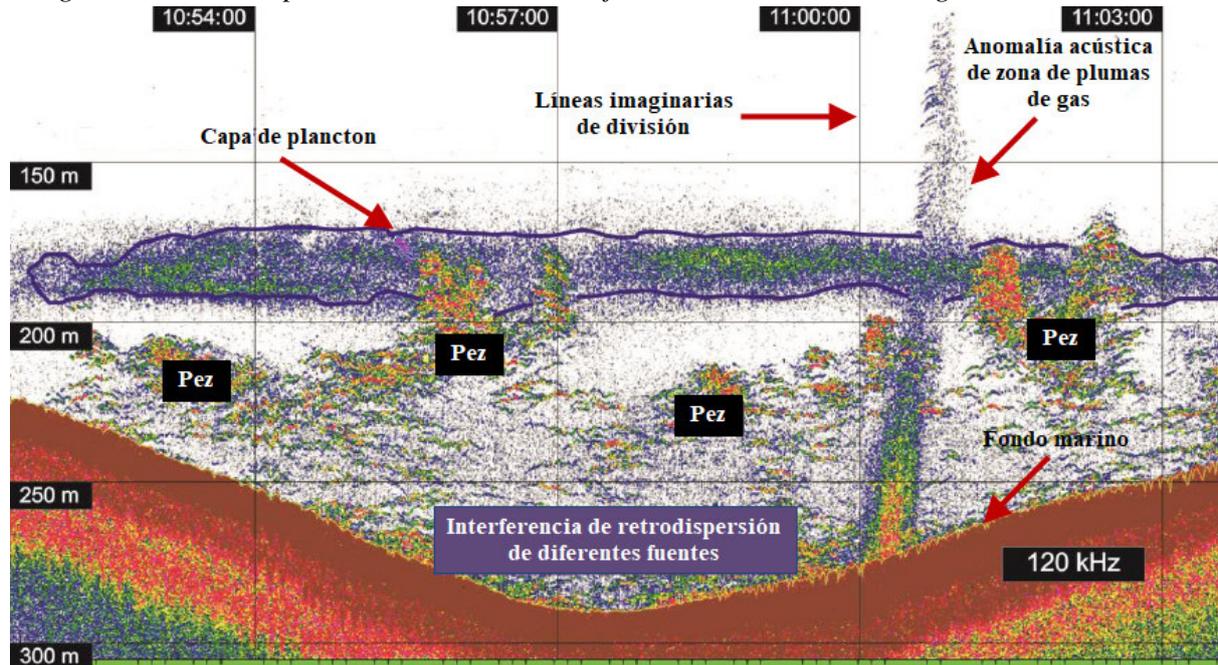


*Nota.* (a) Mediciones batimétricas que describen la distancia entre el nivel del mar y el fondo marino, (b) mediciones de reflectividad del fondo marino que se relacionan con las texturas distribuidas sobre el relieve submarino, y (c) mediciones en la columna de agua que son producto de dispersores de energía acústica tales como peces y burbujas de gas. Tomado de Colbo et al. (2014).

**2.1.4.1.3 Ecograma digital.** Un ecograma es la decodificación de la información que encierra la retrodispersión del sonido y se presenta generalmente como una gráfica en dos dimensiones (X-Y) que presenta la variabilidad de la magnitud del eco de acuerdo con la profundidad, que es en realidad una matriz de datos que presenta, en escala de colores, ciertas características inherentes a los blancos o dispersores de sonido que se encuentran en la columna de agua, como por ejemplo las plumas de gas, que son visualizadas como anomalías acústicas en un ecograma digital con datos de columna de agua, las cuales son identificadas e interpretadas a través de una inspección manual de ecogramas (Merewether et al., 1985; Hornafius et al., 1999; Gutiérrez y Herbozo, 2005; Greinert et al., 2006; Kubilius, 2015).

**Figura 8**

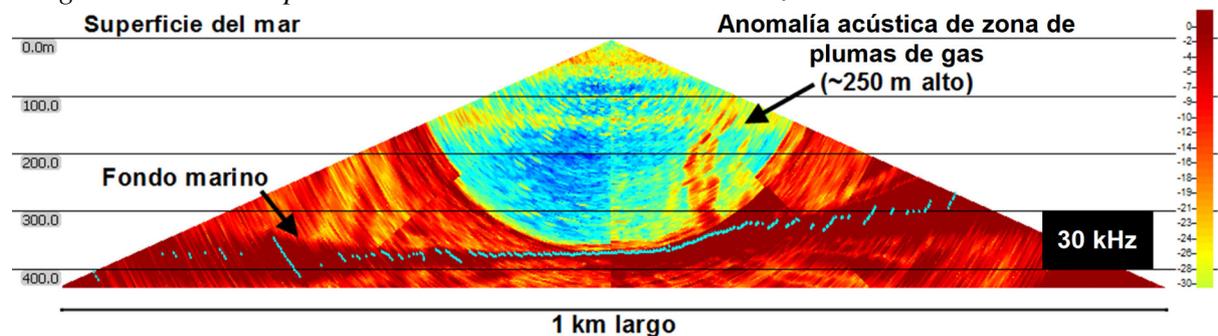
*Ecograma Generado por una Ecosonda Científica de Pesca con Tecnología Monohaz*



*Nota.* A una frecuencia de 120 kHz, este ecograma muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas y diferentes dispersores de sonido (peces y plancton). Aquí, la capa de plancton se muestra claramente debido a la frecuencia utilizada. Adaptado de Veloso et al. (2015).

**Figura 9**

*Ecograma Generado por una Ecosonda de Sistema Multihaz*



*Nota.* A una frecuencia de 30 kHz, este ecograma muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas aproximadamente a 350 m de profundidad de columna de agua con una altura aproximada de 250 m. Adaptado de INGEMMET (2018).

**2.1.4.1.4 Ecotrazos y clasificación.** El análisis de un ecograma de cualquier ecosonda o sonar revelará una serie de características propias del océano (ICES, 2000). Normalmente habrá un fondo (i.e., *suelo marino*) con un aparente eco fuerte debido a la alta retrodispersión de la onda de presión en los contrastes de impedancia acústica de la interfase agua/sedimento; y entre el fondo y la superficie del ecograma habrá una variedad de características discretas (i.e., *valores exactos contables*); estas características se consideran energía

acústica reflejada de uno o varios objetos en la columna de agua (ICES, 2000). Estos rasgos acústicos que pueden considerarse procedente de un solo organismo, de un conjunto de organismos, de objetos sumergidos, discontinuidades oceanográficas, burbujas de gas o incluso ecos de un falso fondo se denominan ecotrazos (ICES, 2000).

Entonces, la clasificación de ecotrazos es el proceso mediante el cual extraemos estas características u objetos del ecograma y describimos cada objeto individual con un conjunto de descriptores.

La clasificación de estos descriptores según ICES (2000) son:

- **Posicional.** La posición del objeto en el tiempo y el espacio, por ejemplo, longitud, latitud, profundidad, hora del día y estación, etc.
- **Morfométrica.** La forma del objeto tal como se ve en el ecograma, por ejemplo, altura, anchura, área, longitud del perímetro, circularidad, etc.
- **Energética.** La energía acústica en el objeto, por ejemplo, la energía total, media o máxima, la variabilidad espacial de la energía u otros descriptores más detallados, como las estadísticas de la ecofase o la dependencia de frecuencia.
- **Ambiental.** Parámetros que describen el entorno inmediato del objeto insonificado, por ejemplo, temperatura, salinidad, sustrato del fondo marino y topografía, etc.
- **Biológica.** La taxonomía de los objetos y las variables asociadas, como la talla, el peso, la edad, etc.

### **2.1.5 Comparación acústica entre organismos hidrobiológicos y plumas de gas**

En el estudio hecho por Kubilius (2015), se realiza una comparación entre la biota marina y la expulsión de gas, como también la presentación de algunos parámetros que pueden ser utilizados en la discriminación de plumas de gas, las cuales se explican a continuación:

**2.1.5.1 Burbujas en resonancia.** Una característica relevante de la retrodispersión es la resonancia (i.e., *es un fenómeno en el que un sistema acústico amplifica las ondas sonoras cuya frecuencia coincide con una de sus propias frecuencias naturales de vibración*), en

la que, a una frecuencia acústica específica, el tamaño de la burbuja oscila y genera una retrodispersión acústica mucho mayor. La frecuencia acústica a la que se produce este pico de retrodispersión es predecible dado el tamaño de la burbuja, la presión ambiental, la densidad del fluido y la relación de los calores específicos del gas en la burbuja (Kubilius, 2015).

Generalmente, el tamaño de la burbuja en la resonancia aumenta con el incremento de la profundidad para una frecuencia acústica fija (Feuillade y Werby, 1994).

Asimismo, la amortiguación del pico de resonancia es diferente para las burbujas encerradas dentro del cuerpo de un organismo en comparación con las burbujas de tamaños comúnmente reportados para plumas de gas metano a partir de sedimentos marinos (Kubilius, 2015).

También, los tamaños de burbuja generalmente observados en las plumas de gas natural son de 1-10 mm (Rehder et al., 2002; Heeschen et al., 2003; Leifer y Boles, 2005; McGinnis et al., 2006; Ostrovsky et al., 2008).

Entonces, consideremos una burbuja de 2 mm de diámetro y sus rasgos básicos de dispersión acústica en dos casos: (1) burbuja libre, una cavidad llena de gas en el agua, contenida por fuerzas de tensión superficial y (2) burbuja sumergida en un cuerpo viscoso de un organismo, contenido y rodeado por ella (e.g., *sifonóforos*, *larvas de peces*, *mictófidos*) (Kubilius, 2015).

La retrodispersión de una burbuja de gas libre es razonablemente predecible para varios tipos de gas, condiciones ambientales, profundidades del agua y frecuencias acústicas (Leighton, 1997; Medwin y Clay, 1997).

Una superficie «limpia» de burbujas de metano de 2 mm de diámetro a 100 m de profundidad, por ejemplo, tendría una frecuencia de resonancia de aproximadamente 10,4 kHz (Medwin y Clay, 1997; Leblond et al., 2014). Por otro lado, la retrodispersión de una burbuja contenida dentro del cuerpo de un organismo se ve afectado, en gran parte debido a la diferente viscosidad del material rodeando la burbuja. Además, la gran variabilidad en las propiedades corporales del organismo y las estructuras que rodean la inclusión del gas, que también afectan la forma de la burbuja, hace que sea más difícil predecir con precisión la retrodispersión de dicha burbuja (Kubilius, 2015).

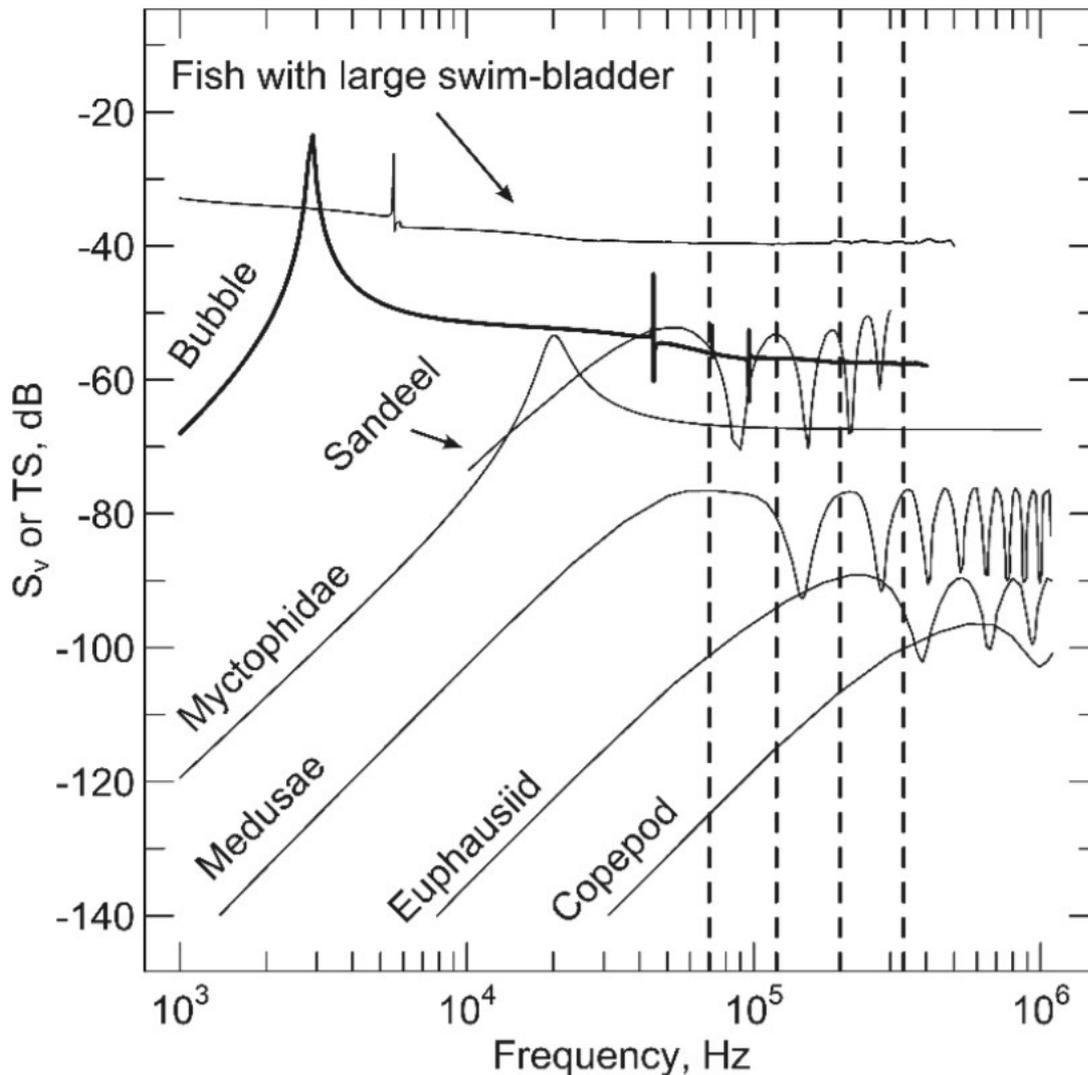
Por ejemplo, un sifonóforo que posee neumatóforo con una única inclusión de gas (elipsoide de tamaño 3 mm x 1 mm) tiene una frecuencia de resonancia que se calcula que está entre 7 y 27 kHz a 100 m de profundidad (Medwin y Clay, 1997) que también está algo amortiguado por la viscosidad del material que rodea la burbuja. Esto también se aplica a los peces. Citando un caso, el pez mesopelágico linterna oscura (*Benthoosema glaciale*) tiene un pico de resonancia de vejiga natatoria diferente (20 kHz para vejiga natatoria de 2.9 mm x 1.3 mm) (Scoulding et al., 2015) que una burbuja de gas libre de tamaño equivalente (Kubilius, 2015).

Las características de retrodispersión acústica asociadas con las frecuencias de resonancia de las burbujas de gas libres y los organismos portadores de inclusión de gas podrían ser potencialmente utilizados con fines de discriminación (Kubilius, 2015).

**2.1.5.2 Burbujas y plancton.** La retrodispersión acústica del aspecto dorsal de los organismos planctónicos similares a los fluidos, como las medusas, los eufáusidos y los cópodos, tiene un patrón distintivo (Figura 10) con una tendencia general de aumento a través de la banda de frecuencia acústica comúnmente utilizada en ecosondas de pesca (18-333 kHz) (Kubilius, 2015).

**Figura 10**

*Modelado de Reflejo Acústico de Aspecto Dorsal de Algunos Objetos Biológicos Comunes y una Burbuja de Gas*



*Nota.* Se considera objetos biológicos comunes: un copépodo (1.5 mm de longitud), un eufáusido (9.8 mm), una medusa (16.5 mm), una anguila de arena (140 mm), un mictófidido que lleva vejiga natatoria (37.4 mm *Benthosema glaciale* con vejiga natatoria elipsoidal de 2.9 mm de largo a 30 m de profundidad) y una burbuja que representa la retrodispersión de una burbuja de gas metano de 2,5 mm de diámetro calculada utilizando lo propuesto por Anderson (1950). Tomado de Kubilius (2015).

La retrodispersión de aspecto dorsal de un pez con gran vejiga natatoria se aproxima a la retrodispersión de la burbuja de gas (i.e., *equivalente a 4 cm de diámetro de burbuja de gas*), el pico de 5.5 kHz se debe a la resonancia que crea la burbuja de orden superior. Las líneas discontinuas verticales indican 70, 120, 200 y 333 kHz.

En la investigación hecha por Kubilius y Pedersen (2016) se utilizó emisión de pulsos de sonido en forma lateral. Con mayor frecuencia, la retrodispersión acústica de zooplancton se evalúa o mide desde buques y con ecosondas orientados verticalmente hacia abajo (Kubi-

lius, 2015).

Las diferencias de la tendencia de la retrodispersión acústica que dependen de la frecuencia de organismos comunes (i.e., *plancton*) y las burbujas de gas, es un buen candidato para la discriminación. Además, la gran diferencia en el nivel de retrodispersión entre los organismos planctónicos y una burbuja de gas de tamaño moderado, significa que la retrodispersión del volumen también podría usarse como un parámetro para discriminar entre las plumas de burbujas y el zooplancton. Finalmente, el zooplancton se observa a menudo en capas dispersas, es decir, con un patrón de distribución fundamentalmente diferente en comparación con las plumas de gas, que a menudo forman una apariencia distinta en la columna de agua (Kubilius, 2015).

**2.1.5.3 Burbujas y peces.** Los peces como objetos acústicos se pueden considerar como dos grupos amplios basados en la presencia o ausencia de una vejiga natatoria llena de gas (Kubilius, 2015).

Los peces son objetos de dispersión de sonido más complejos que muchos de los organismos planctónicos (Kubilius, 2015). Esto se debe a que el cuerpo del pez incluye estructuras adicionales de diferente densidad (e.g., *vejiga natatoria*, *huesos*, *hígado*) y el gran tamaño de algunos peces conduce al aumento significativo de la directividad acústica en las frecuencias de ecosondas relevantes (Kubilius, 2015). Mientras que lo anterior es cierto para ambos peces con y sin vejiga natatoria llena de gas, la media de la retrodispersión acústica de los peces que llevan vejiga natatoria está dominada por el reflejo de este órgano (Foote, 1980).

La respuesta de frecuencia para cardúmenes comunes sin vejiga natatoria observadas transversalmente tiene un patrón general de aumento en gran parte del rango común de frecuencias de ecosondas (70, 120, 200 y 333 kHz) (Kubilius, 2015). Las plumas de gas, sin embargo, generan una retrodispersión acústica que disminuye dentro del mismo rango de frecuencia (Kubilius, 2015). Entonces, la respuesta de frecuencia acústica es un candidato fuerte para separar acústicamente las plumas de gas y los peces sin vejiga natatoria (Kubilius, 2015).

Por otra parte, se genera confusión al observar cardúmenes con vejigas natatorias considerables, ya que tienen una tendencia similar a la respuesta de frecuencia de las plumas de gas (Gorska et al., 2004; Pedersen y Korneliussen, 2009; Kubilius, 2015).

Los peces mesopelágicos con vejigas natatorias llenas de gas generalmente se observan como capas de densidad variable (Luo et al., 2000; McClatchie y Dunford, 2003; Godø et al., 2009). Estos peces también realizan migraciones verticales (i.e., *migración nictimeral*), a veces más de cientos de metros (Godø et al., 2009), mientras que en otras ocasiones las corrientes generan cierta desviación, de manera similar al plancton (Kaartvedt et al., 2009).

En el caso del zooplancton heterotrófico y algunos animales más grandes, no requieren luz para su crecimiento (i.e., *aunque algunos mixótrofos poseen endosimbiontes que requieren luz*), pero por motivo de defensa ante sus depredadores, algunos toman el patrón opuesto a la migración vertical diaria, viajando a la superficie durante la noche, y descendiendo a profundidades más oscuras y seguras durante el día (Brierley, 2014). Este comportamiento se puede utilizar para discriminar plumas de gas detectadas durante el día e inferir zonas de expulsión por diferencia de horarios (Herbozo, comunicación personal, 15 de abril de 2016).

Cardúmenes mesopelágicos tienen una estructura y un comportamiento morfológico bastante diferente en comparación con las plumas de gas (Kubilius, 2015). Para peces más grandes, la postura corporal en relación con la onda acústica entrante es particularmente importante (Love, 1971; Haslett, 1977; Nakken y Olsen, 1977).

La capacidad de observar objetos a lo largo del tiempo proporciona un discriminador adicional para separar las plumas de gas de los objetos biológicos (Kubilius, 2015).

Las fugas sostenidas de gas producirían una anomalía acústica en la columna de agua que es persistente en el tiempo y se detectarían aproximadamente en el mismo lugar (Kubilius, 2015).

Tales expulsiones de gas al ser observadas a lo largo del tiempo serían bastante fáciles de identificar y separar de los cardúmenes o plancton, ya que estos tienen más probabilidad de moverse y cambiar su posición a lo largo del tiempo (Kubilius, 2015). Sin embargo, de igual manera que ocurre con peces mesopelágicos con vejigas natatorias llenas de gas y el plancton, también se espera cierta variabilidad en las plumas de gas debido a las corrientes marinas, alterando su comportamiento al empujar las burbujas en forma horizontal (Judd y Hovland, 2007; von Deimling et al., 2010).

La detección e identificación de escapes de gas más efímeras también podría bene-

ficiarse de dicho discriminador ya que tales escapes reaparecerían en la misma posición con el tiempo (Kubilius, 2015). La probabilidad del comportamiento de las plumas de gas en el fondo marino, es que permanezcan más o menos en un mismo lugar a lo largo del tiempo o vuelvan a aparecer con frecuencia (Kubilius, 2015).

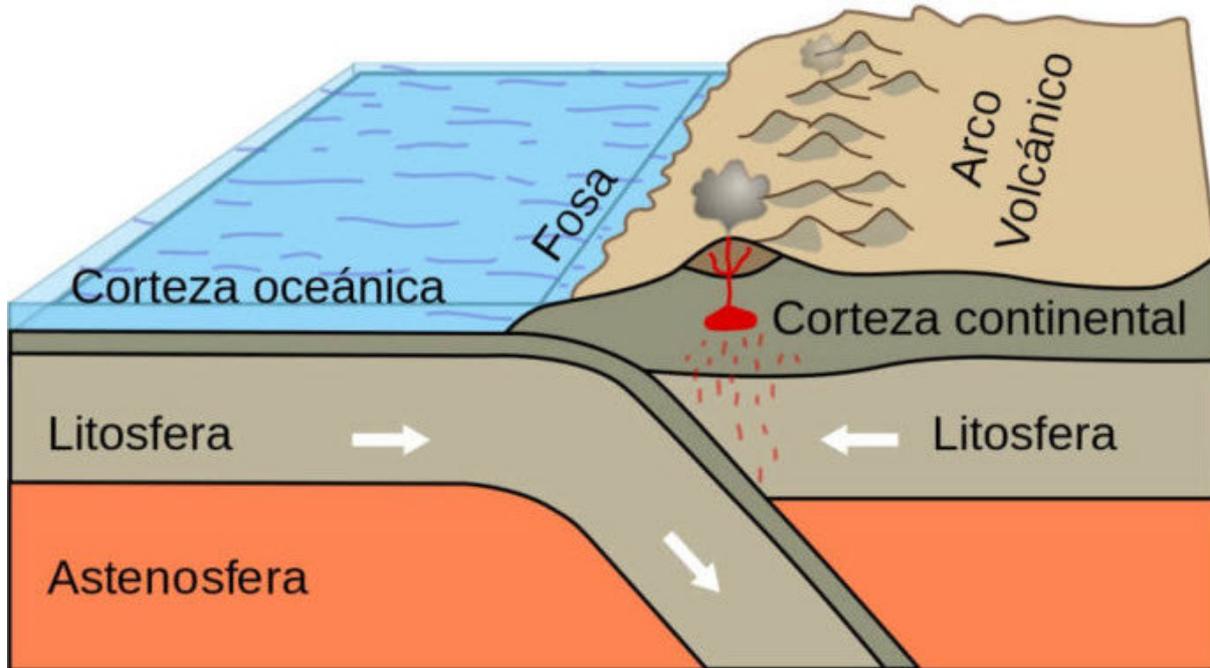
Por otra parte, otro potencial discriminador de plumas de gas es usar sistemas acústicos estacionarios para observar lateralmente y monitorear las emanaciones en los fondos marinos (Kubilius, 2015).

**2.1.5.4 Burbuja ascendente.** Se han discutido algunos rasgos de comportamiento que se pueden usar para fines de discriminación: Forma y patrón de distribución de cardúmenes, capas de plancton y plumas de gas (Kubilius, 2015). Sin embargo, otro discriminador de comportamiento potencialmente fuerte entre plumas de gas y objetos biológicos es la tendencia de las burbujas de gas a ascender por la columna de agua (Kubilius, 2015). Este ascenso de burbujas de metano de origen natural, es debido a su densidad ( $0,657\text{kg}/\text{m}^3$ ) y también, generalmente, a la sobrepresión del metano que se acumula continuamente a medida que aumenta la altura del depósito o la acumulación; el cual es liberado a través de fallas y rocas fracturadas, volcanes de fango tanto en tierra como en el fondo del mar, escapes de gas submarino, micro-escapes en las tierras secas y escapes geotérmicos (Etiope y Klusman, 2002; Etiope, 2004; Kvenvolden y Rogers, 2005; Judd y Hovland, 2007; Etiope, 2009).

### **2.1.6 Concepto de margen convergente**

Cuando dos placas colisionan entre sí y una de las placas se hunde debajo de la otra, se produce un movimiento convergente de las placas (Falvey, 1974; Judd y Hovland, 2007).

Este proceso se denomina subducción y puede ocurrir entre una placa tectónica oceánica (i.e., *más delgada y densa*) y continental (i.e., *más gruesa y menos densa*), por lo que la placa continental se ve obligada a integrarse con el manto y la placa oceánica, inevitablemente de su hundimiento, desprenderá actividad sísmica y volcánica. Por otro lado, cuando ocurre la subducción, se da paso a la formación de cordilleras y cambios en la topografía de la tierra (NOAA, 2013).

**Figura 11***Movimiento Convergente de Placas*

*Nota.* Una placa continental y una placa oceánica colisionan una hacia la otra, en el cual, una placa oceánica se subduce bajo otra placa continental creando montañas y modificaciones en su geomorfología. Tomado de Mejia Jervis (2017).

Bajo el concepto de tectónica de placas, el margen oeste de Sudamérica es buen ejemplo de la colisión entre la placa continental y oceánica. Por lo tanto, la Cordillera de los Andes es un ejemplo típico de deformación que ocurre en el borde de la placa continental mediante la subducción. Variaciones en la estructura, distribución de sedimentos, vulcanismo, sismicidad en la cuesta continental y en la fosa; y además, orogénesis de la Cordillera de los Andes, son interpretadas como probables consecuencias de esta colisión (Masias, 1976).

### **2.1.7 Morfología del margen convergente peruano**

Debido a la ocurrencia del proceso de subducción por la colisión de la Placa de Nazca (i.e., *placa oceánica*) y la Placa Sudamericana (i.e., *placa continental*), la evolución geodinámica de esta zona ha colocado al margen continental peruano (i.e., *extensión del territorio continental, que se expande hasta una profundidad aproximada de 7000 m alcanzando la fosa oceánica*), en un margen convergente (Falvey, 1974; Masias, 1976; Judd y Hovland, 2007).

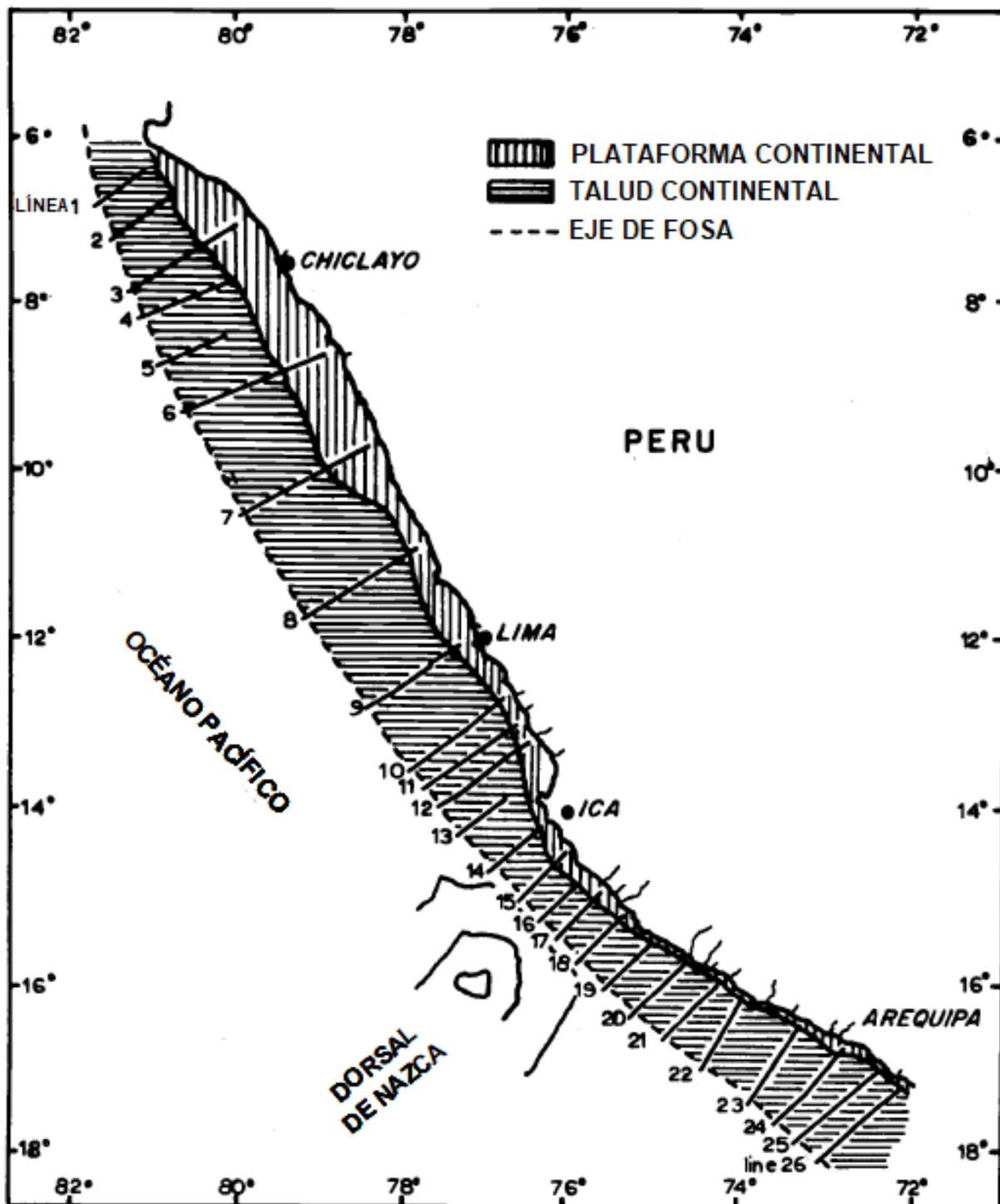
El margen convergente peruano se encuentra en el oeste del continente sudamericano entre las latitudes 3°30'S y 18°, a su vez, limita con la Placa de Nazca al oeste y por el este,

limita con la costa peruana, las elevaciones costeras y las montañas de la Cordillera de los Andes (Masias, 1976).

Macharé et al. (1986) describió el margen continental peruano desde la perspectiva morfoestructural. La fosa oceánica y parte de la región de antearco se hayan por debajo del nivel actual del mar, donde la región de antearco se extiende entre la fosa y la cordillera occidental (i.e., *arco magmático*). Morfológicamente, en esta región se pueden distinguir cuatro sectores elongados y paralelos a la fosa tales como: plataforma continental, el alto estructural cartografiado por Thornburg y Kulm (1981), el talud superior y el talud medio e inferior.

Figura 12

Margen Convergente Peruano



*Nota.* Constituido por la plataforma continental, talud continental y el eje de fosa, los cuales cuentan con información de 26 líneas de seguimiento que muestran la ubicación de los perfiles de reflexión batimétrica y sísmica entre el 6° y 18°S. Adaptado de Masias (1976).

**2.1.7.1 Descripción general de la plataforma continental peruana.** La plataforma continental se extiende desde la línea de costa peruana hacia el quiebre de la plataforma, el cual ocurre entre las isóbatas de 100 m y 200 m (Masias, 1976).

Es la prolongación del continente bajo el mar, por definición es la zona del fondo marino que se extiende desde la línea de costa hasta una profundidad de 200 m o donde ocurre un cambio brusco de la pendiente (Teves y Evangelista, 1974).

La plataforma continental tiene relación con las tres zonas de la costa descritas por Schweigiger (1947) que son: zona norte, centro y sur del margen continental peruano.

Por lo general, la plataforma continental muestra una superficie casi horizontal. Se observan cambios leves en el relieve del fondo cerca de algunas cadenas de islas que están alineadas próximas al borde de la plataforma continental cerca de la plataforma norte (6-7°S) y Lima (12°S) (Masias, 1976).

Masias (1976) describe que, a las afueras del norte del Perú, la parte más estrecha de la plataforma se encuentra alrededor de los 6°S. Su ancho en promedio es de 98 km (i.e., *aproximadamente 53 millas náuticas*) entre los 6°40'S y 10°30'S.

La zona norte abarca desde el Ecuador hasta Punta Aguja perteneciente a los departamentos de Tumbes y Piura; además, incluye parte del área de estudio de esta tesis. Los rasgos de la costa actual han sido adquiridos en el Plio-Pleistoceno (i.e., *aproximadamente 5.3 millones de años*), la paleografía terciaria se extendía por el norte hasta los 05°S y por el sur hasta los 16°S (Macharé et al., 1986).

Samamé (1985) estimó el área de la plataforma hasta la isóbata de 100 brazas, la cual indica un área de 26800 mn<sup>2</sup> y por debajo de esta, incluyendo la extensión del fondo hasta 200 brazas, indica un área de 43400 mn<sup>2</sup>.

Al norte se extiende hasta las 35 millas frente a Puerto Pizarro y Máncora, prolongándose hacia el oeste con el Banco del Perú (i.e., *Banco de Máncora*), hacia el sur se estrecha hasta casi desaparecer entre Cabo Blanco y Punta Pariñas (i.e., *Negritos*), entre este lugar y Punta Aguja se encuentran las bahías Paita y Sechura, donde la plataforma se extiende hasta las 15 y 20 millas respectivamente (Samamé, 1985).

En la zona centro que comprende entre Punta Aguja e isla Gallán entre los departamentos de Piura e Ica, la plataforma continental es más amplia entre los 07°S y los 14°S y varía con relación estrecha con las zonas de la costa. Frente a Pimentel es de 55 millas y casi 70 millas en Chimbote; a las afueras de Trujillo y Salaverry, el ancho máximo es de 126 km

(i.e., *aproximadamente 68 millas náuticas*). hacia el sur se reduce, teniendo unas 40 millas en la latitud del Callao y solo 5 millas en la Península de Paracas (Masias, 1976; Macharé et al., 1986).

En la zona sur, la cual va desde Pisco hasta Morro Sama entre los departamentos de Ica y Tacna, la longitud promedio de la plataforma continental es de 5 millas, y cuando se expande en la desembocadura de los ríos Majes y Tambo, hasta la frontera con Chile, la longitud máxima es de 13 millas (Teves y Evangelista, 1974; Masias, 1976).

**2.1.7.2 Descripción principal del alto estructural.** El alto estructural, que es una estructura positiva originada por procesos tectónicos, separa las cuencas de antearco (i.e., *depressiones producto de la subducción que actúan como trampas sedimentarias y retienen grandes cantidades de sedimentos*) externas e internas. Las cuencas externas, presentes en el talud entre 200 y 2000 m de profundidad son: Cuenca Talara (Tumbes incluida), Cuenca Trujillo (Yaquina incluida), Cuenca Pisco Oeste y Cuenca Camaná. Las cuencas internas, presentes en la plataforma hacia continente son: Cuenca Tumbes-Progreso, Cuenca Sechura, Cuenca Trujillo, Cuenca Salaverry y Cuenca Pisco oriental (Thornburg y Kulm, 1981; Macharé et al., 1986; Miall, 2013).

Al norte de los 06°S, el alto estructural reaparece en la costa formando los macizos de Illescas, según Caldas (1979), pertenecerían al mismo conjunto.

En el margen central, las islas Chincha, Hormigas, Lobos de Tierra, tienen similares rocas metamórficas.

Al sur de los 14°S, este alto está representado por la Cordillera de la Costa. Entre 14°S y 06°S se halla sumergido y forma el borde externo de la plataforma continental. Thornburg y Kulm (1981), quienes cartografiaron esta estructura, le asignaron el nombre de Alto Borde de la Plataforma (*Outer Shelf High: OSH*, en inglés).

**2.1.7.3 Características del talud continental peruano.** El talud continental se refiere al área entre el borde externo de la plataforma continental y la llanura abisal, y es reconocido por su mayor pendiente en relación con las zonas que conecta. Esta zona de pendiente, se caracteriza por cañones submarinos que en ocasiones llegan a la plataforma continental (Teves y Evangelista, 1974).

El talud continental se divide en tres secciones: talud superior, talud medio y talud inferior (Masias, 1976).

Las gradientes en el talud continental superior van desde 1:45 hasta 1:35.

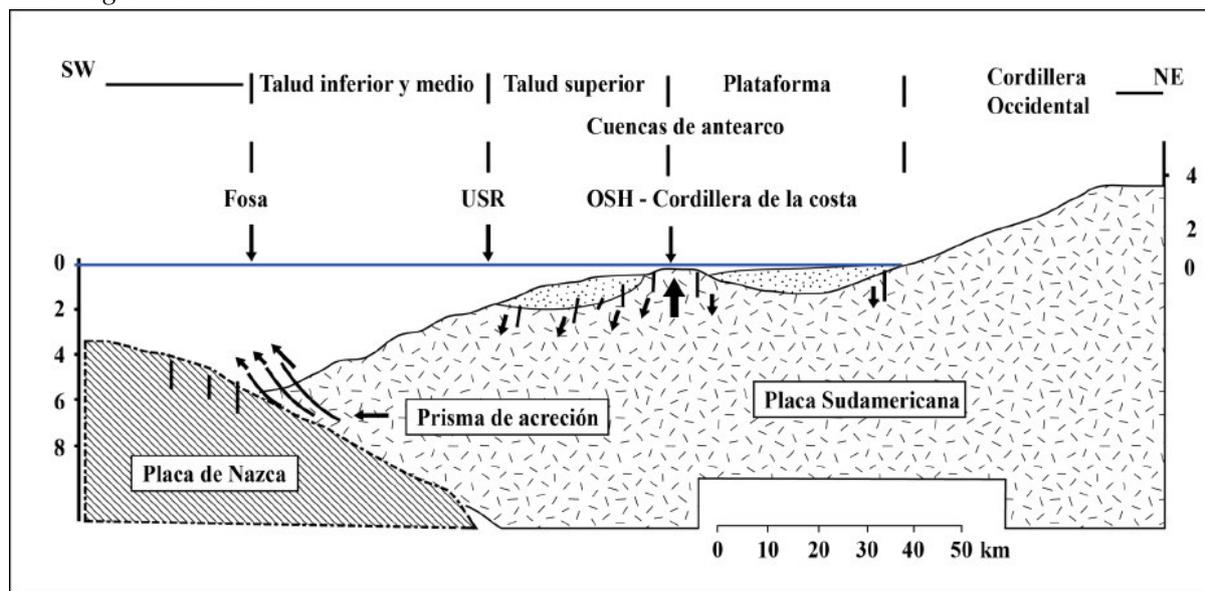
El talud superior, zona submarina de menor pendiente y tiene presencia de cuencas (Thornburg y Kulm, 1981).

El promedio del talud continental medio es de 1:16, mientras que el talud continental inferior de mayor pendiente, cae abruptamente hacia la fosa con una gradiente promedio de 1:6 (Masias, 1976).

El talud inferior y medio casi no tienen cobertura de sedimentos, se limita hacia arriba por una ruptura de pendiente llamada según Thornburg y Kulm (1981): Umbral del Talud Superior (*Upper Slope Ridge: USR, en inglés*).

### Figura 13

*Corte Transversal Este-Oeste que Muestra las Características Morfoestructurales del Margen Convergente Peruano*



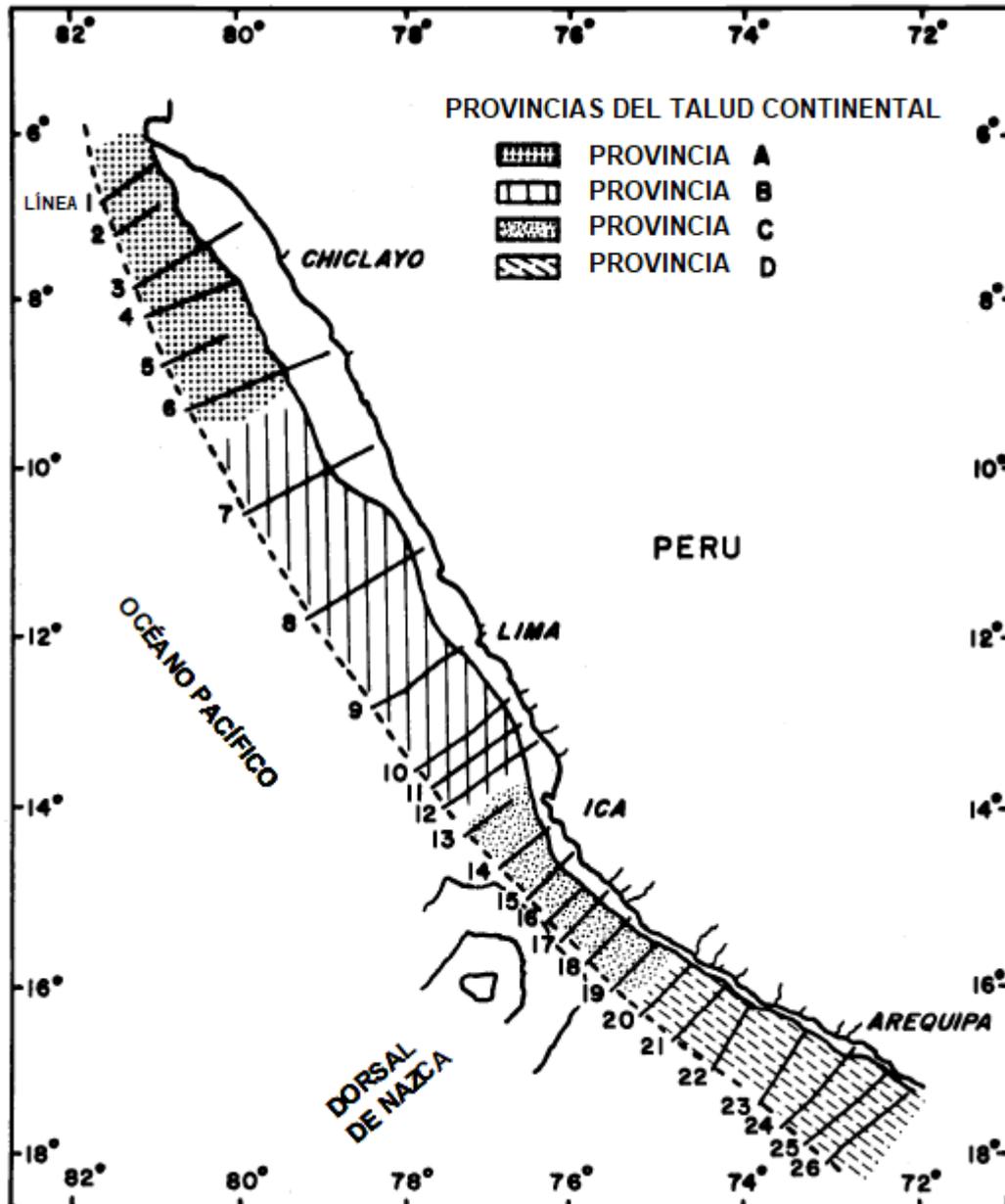
*Nota.* Se observa la cordillera occidental, la plataforma continental, el Alto Borde de la Plataforma OSH que separa las cuencas de antearco externas e internas, el talud continental superior, el talud continental inferior y medio y el eje de fosa. Tomado de Macharé et al. (1986).

El estudio de Masias (1976) divide el talud continental en cuatro provincias fisiográficas (A,B,C y D) (Figura 14). La provincia A es el punto más septentrional y contiene parte del área de estudio de esta tesis. Se encuentra entre los 6°S hasta los 9°30'S. Su ancho promedio es 90 km (i.e., *aproximadamente 48.6 millas náuticas*) y el fondo marino es extremadamente irregular (Figura 15). Existen varios cañones submarinos prominentes en esta región,

los cuales tienen sus cabezas cerca del borde exterior de la plataforma continental. El cañón más llamativo y profundo ahora conocido como el Cañón Submarino de Talara, se encuentra en la parte norte de la Provincia A; por ejemplo, la línea 2 (Figura 15 y 16) muestra un cañón de 900 metros de profundidad y 14 km de ancho en la pendiente superior.

**Figura 14**

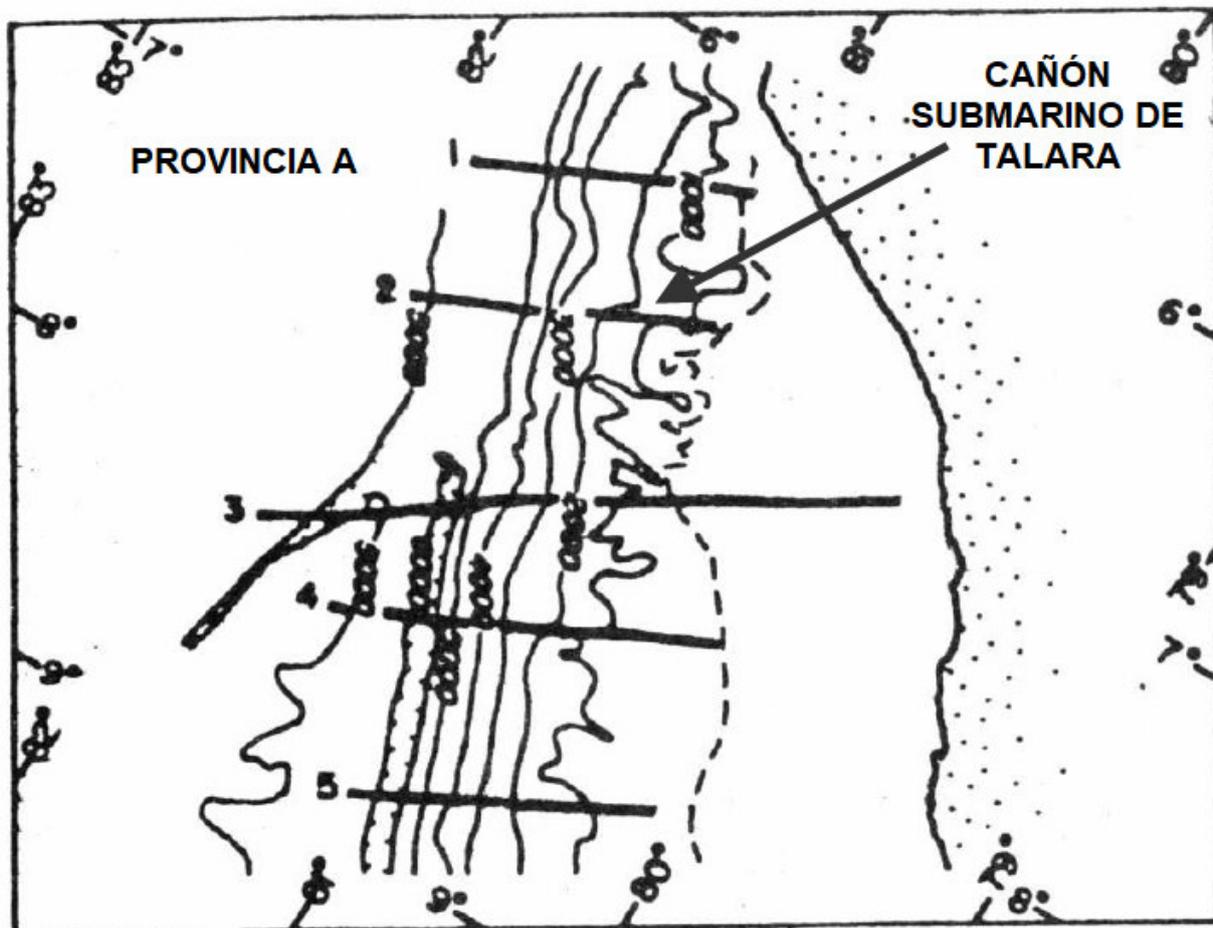
*Vista en Planta de las Provincias Fisiográficas del Talud Continental*



*Nota.* División del talud continental en 4 provincias fisiográficas diferentes (A,B,C y D) entre el 6° y 18°S. Adaptado de Masias (1976).

Figura 15

Líneas o Transectos de Rastreo de la Provincia A



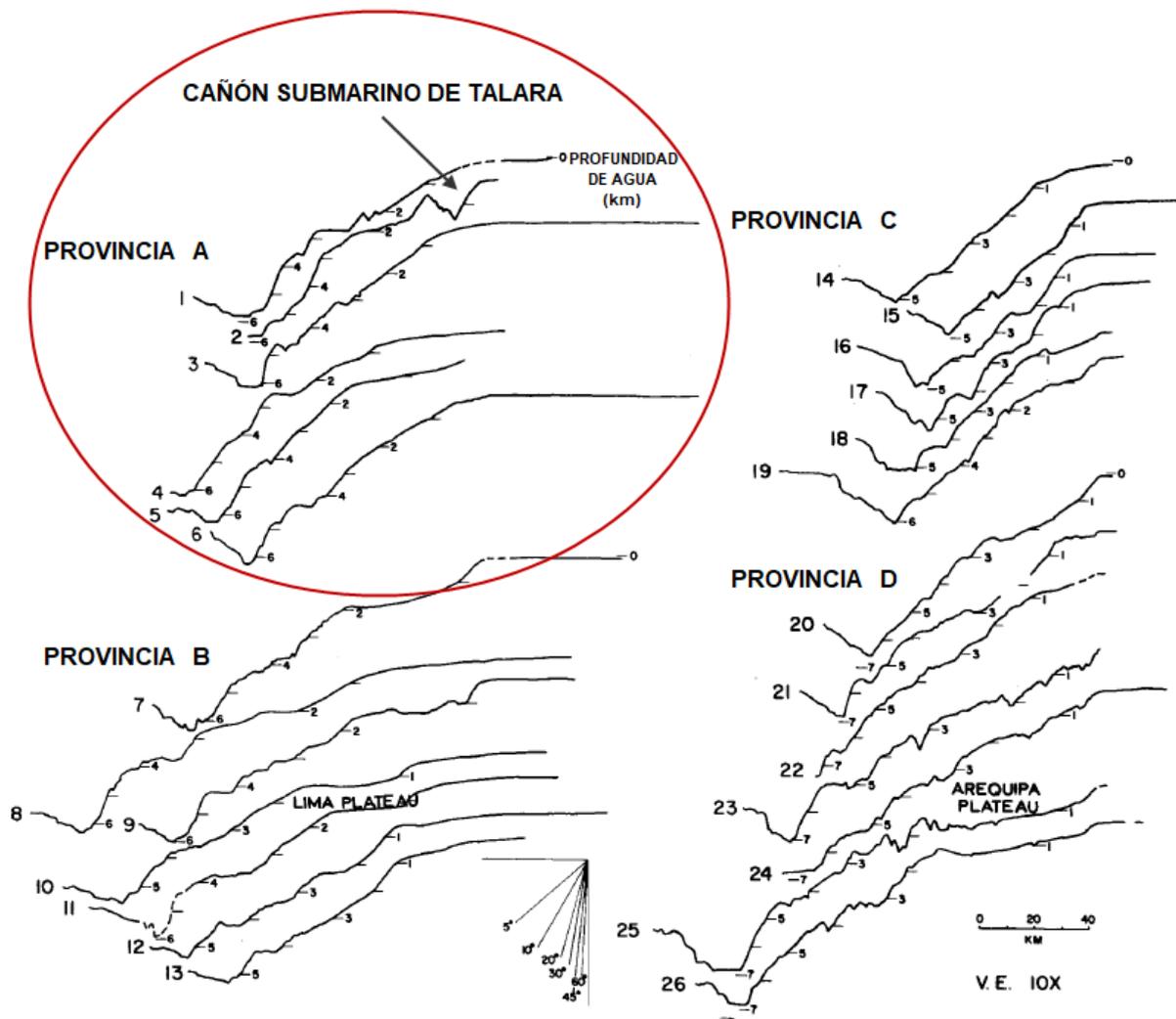
Nota. Ubicación de los perfiles batimétricos y de reflexión sísmica. Adaptado de Masias (1976).

En la provincia A, el talud continental inferior exhibe numerosos bancos que interrumpe (i.e., *rompe*) la continuidad del talud inferior. Las gradientes entre los bancos son generalmente de 1:8 hasta 1:7, pero ellos pueden ser más grandes cerca de la interfase talud continental-fosa (Prince et al., 1974).

El ancho de los bancos varían de 0.5 hasta 10 km. Un número de bancos pueden ser trazados de forma paralela al talud continental por distancias mayores a 60 km. Algunos bancos declinan hacia el norte y algunos hacia el sur.

**Figura 16**

*Fisiografía y Perfil Batimétrico de las Provincias A, B, C y D del Talud Continental*



Nota. Adaptado de Masias (1976).

**2.1.7.4 Fisiografía de la fosa.** La Fosa Peruana es una depresión que se encuentra en la articulación de la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca (Masias, 1976).

Se determinó que el punto más somero del eje de la Fosa Peruana tiene aproximadamente unos 4.800 m de profundidad, alrededor de los  $15^{\circ}15'S$  y  $76^{\circ}W$  (i.e., casi frente a San Juan, donde se ubica actualmente la Dorsal de Nazca) (Couch y Whitsett, 1981).

La fosa oceánica se encuentra saturada hacia el norte, frente al Golfo de Guayaquil, debido a la red hidrográfica y las condiciones climáticas. La red hidrográfica y las condiciones climáticas determinan el aporte adecuado de sedimentos que apenas sobrepasa los 4000 m. (Macharé et al., 1986).

**2.1.7.5 Rasgos principales de la Placa de Nazca.** La Placa de Nazca constituye el fondo del Océano Pacífico frente a nuestras costas (Teves y Evangelista, 1974).

Se ubica a continuación de la Fosa Perú-Chile y limita al oeste con la Cordillera Submarina del Pacífico Este; se extiende aproximadamente 5000 km de largo y 4000 km de ancho; además, en la parte central a partir de la latitud de Nazca, se encuentra una cordillera submarina en dirección oblicua a la costa denominada Dorsal de Nazca, la cual presenta formas suaves; al norte se halla la Dorsal de Galápagos que mantiene una orientación este-oeste y la Dorsal de Carnegie, que está inclinada hacia el sureste (Macharé et al., 1986).

El espesor de los sedimentos de la Placa de Nazca varía entre 100 y 200 m predominando los carbonatos. Desde la actualidad hasta el Plioceno, los sedimentos superficiales varían en edad (Macharé et al., 1986; Delgado, 1988; Delgado y Gomero, 1995).

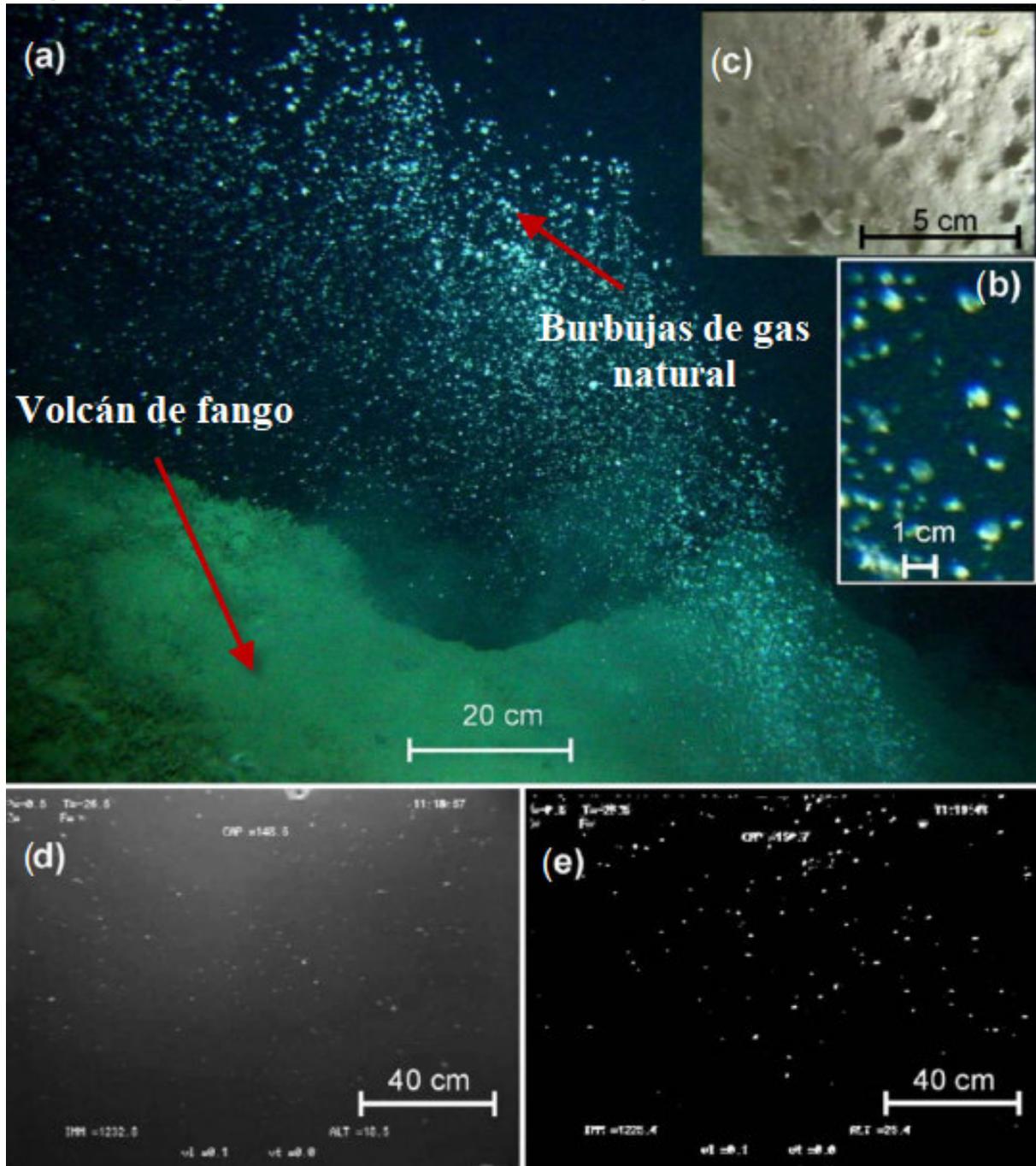
### **2.1.8 Rasgos morfológicos predominantes en las zonas de expulsión de gas natural**

Los rasgos morfológicos son estructuras relacionadas al relieve del fondo marino (e.g., *volcanes de fango, pockmarks*). Según Hampton et al. (1996) y Judd y Hovland (2007), los rasgos morfológicos que predominan en la expulsión de fluidos (líquidos y gases), son los volcanes de fango, los pockmarks, zonas de fractura (i.e., *asociados a cañones submarinos, escarpes, fiordos, deltas fluviales, taludes, islas oceánicas volcánicas, cordilleras*) y fallas geológicas que también tienen relación con zonas de fractura. Se definen a continuación:

**2.1.8.1 Volcán de fango.** Un volcán de fango es una elevación con forma de cono, de perfil batimétrico generalmente redondeado, del que fluye material sólido (i.e., *comúnmente lodo y clastos de roca sólida en una matriz de lodo*) y fluidos (e.g., *agua, salmuera, gas, petróleo*) (Judd y Hovland, 2007). Un ejemplo es el volcán de fango *Håkon Mosby* (Figura 17), tiene una estructura aproximada de 1,5 km de diámetro situado en el margen continental noruego-Barents-Spitzbergen. Sauter et al. (2006) presentaron evidencia hidroacústica, visual y geoquímica de la liberación de burbujas de metano recubiertas de hidratos de gas que se extienden desde 1250 m de profundidad del fondo marino hasta 750 m de altura de columna de agua.

## Figura 17

*Imágenes de Expulsión de Gas Natural del Volcán de Fango Håkon Mosby*



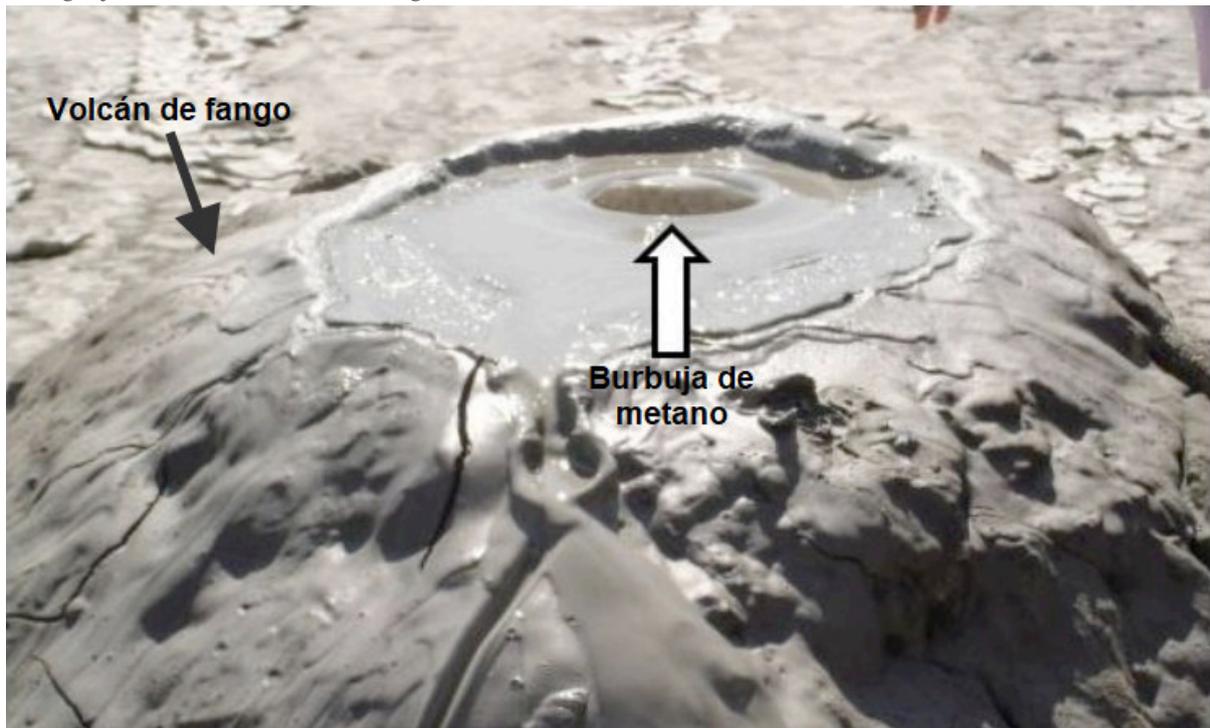
*Nota.* Situado en el Ártico, en el margen continental noruego-Barents-Spitzbergen a 1250 m de profundidad de columna de agua. (a) Fotografía del volcán de fango Håkon Mosby expulsando burbujas de gas natural. (b) Fotografía ampliada que muestra la expulsión de burbujas de metano ~1 m por encima del suelo marino. (c) Imagen de video de los sedimentos perforados por la liberación de burbujas de metano. (d) y (e) Imágenes de burbujas de gas natural a 18,5 y 25,4 m por encima del lecho marino (e) Imagen de cambio de color para reconocimiento de burbujas de metano. Adaptado de Sauter et al. (2006).

Estos rasgos tienen una superficie montuosa e irregular, suelen estar atravesada por coladas de fango y localmente presentan estructuras menores de escape de fluidos; además, estas estructuras también se encuentran en tierra (Figura 18), existen alrededor de 1000 volcanes

de fango en tierra y 5500 en la costa, la mayoría en aguas profundas. La actividad varía entre emisiones suaves y erupciones violentas acompañadas de la liberación de enormes volúmenes de gas, principalmente (85 %+) metano y dióxido de carbono. Se considera que el gran número de volcanes fango contribuyen significativamente a los depósitos de metano submarino (Milkov, 2000; Milkov et al., 2003; Judd, 2005).

### Figura 18

*Fotografía de un Volcán de Fango Terrestre*



*Nota.* Ubicado en el Complejo de Volcanes de fango *Salse di Nirano* (Módena). Se observa la formación de burbujas en la superficie del cráter (flecha blanca) debido a la emisión de gas metano. Adaptado de Rejas (2009).

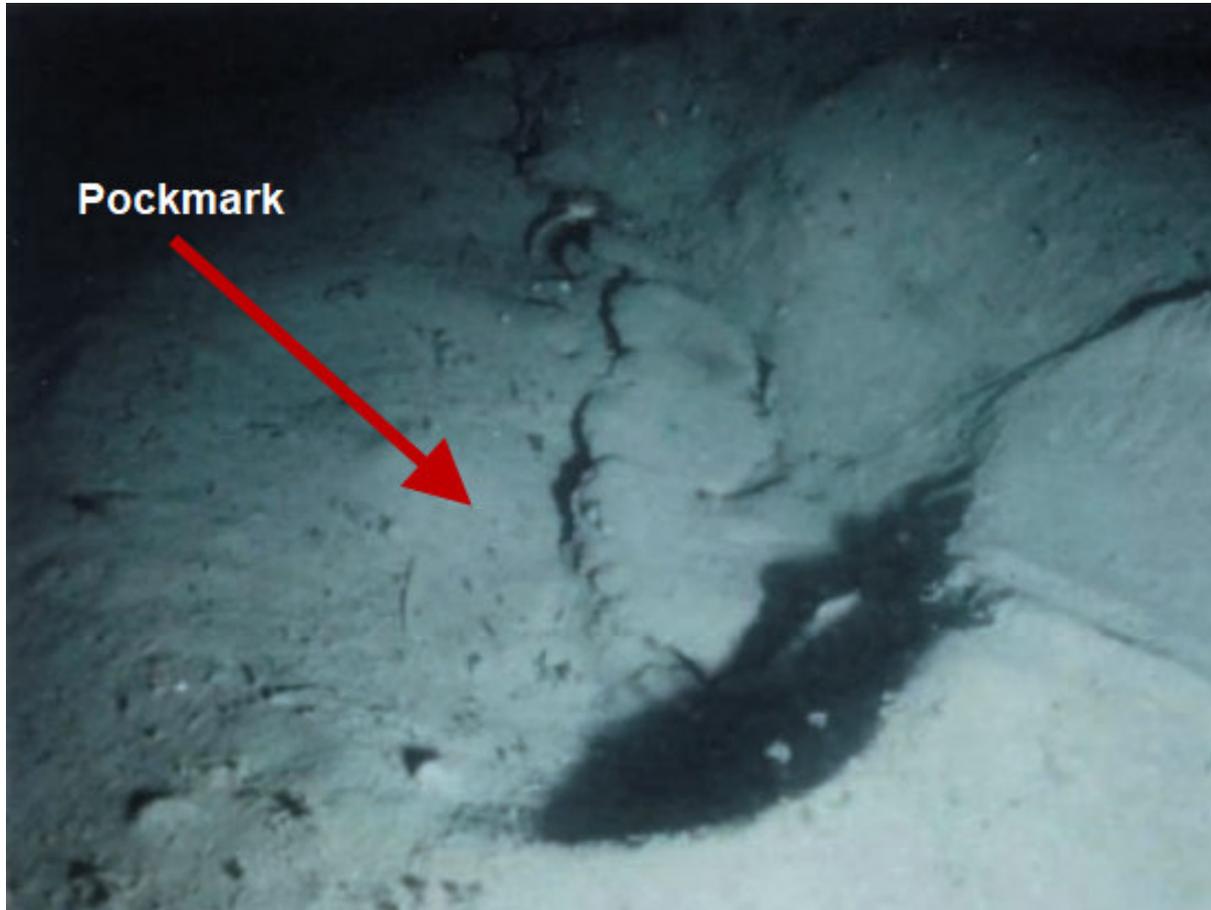
Los volcanes de fango no son de ninguna manera «volcánicos» en el sentido estricto, pero derivan su nombre por la forma similar de formación que es por extrusión o erupción de material de abajo hacia arriba; además, los volcanes de fango suelen estar rodeados por una depresión delimitada por fallas circulares y los sedimentos que hay debajo de ellos están saturados de gas. Por otro lado, estas estructuras se diferencian de los diapiros de lodo por el material que atraviesa el suelo marino y les da forma cónica, lo que no es el caso de los diapiros de lodo (Milkov, 2000; Micallef et al., 2017).

**2.1.8.2 Pockmark.** Los pockmarks son depresiones de forma circular a oval, similares a pequeños cráteres, típicamente de dimensiones métricas a decamétricas, desarrolladas

sobre fondos marinos fangosos, tanto de forma aislada como en pequeños grupos en ocasiones alineados (King y MacLean, 1970).

### **Figura 19**

*Fotografía de un Pockmark (Noruega-Mar del Norte)*



*Nota.* Adaptado de Hovland y Judd (1988).

Mata et al. (2009) describen a los pockmarks como depresiones de decenas de metros de largas y unos pocos metros de profundidad que se forman en sedimentos marinos de grano fino; son estructuras erosivas y el agente erosivo es el fluido subyacente.

El modelo conceptual de Judd y Hovland (2007) que describe la formación de un pockmark puede resumirse de la siguiente manera: La presión de los fluidos se acumula en una capa porosa poco profunda debajo de una capa de sellado y después, debido al exceso de presión, se alivia mediante la formación de una cúpula en el lecho marino. Los fluidos hacen erupción debido a la sobrepresión en los sedimentos marinos, fluidificando los sedimentos. Finalmente, el gas, el agua y los sedimentos son expulsados a la columna de agua. Parte del sedimento suspendido es transportado por las corrientes.

Los fluidos que intervienen en la formación de pockmarks por lo general son gases, en su mayoría es gas metano de origen microbiano o termogénico (Micallef et al., 2017). Sin embargo, pueden producirse filtraciones submarinas, por ejemplo, vertidos de aguas subterráneas y deshidratación de sedimentos (Whiticar, 2002; Harrington, 1985; Loncke et al., 2015).

Los pockmarks son indicadores de eventos de escape de gas, pero no en todos los pockmarks existen emanaciones de gas activas, es decir, las emanaciones de gas pueden ocurrir o no con la formación de pockmarks, lo cual indica que no todos los pockmarks están formados por la emisión de gases (Mata et al., 2009).

La geometría puede ser circular, elíptica y/o alargada, asimétricos y, asimismo, se han descrito formando cadenas (Judd y Hovland, 2007; Mata et al., 2009).

El perfil característico de los pockmarks es en forma de «U» y normalmente están ligados a comunidades quimiosintéticas, altas concentraciones de metano, burbujas de gas, anomalías de metano en el agua intersticial, plumas de metano en la columna de agua y concreciones carbonatadas (Judd y Hovland, 2007; Mata et al., 2009).

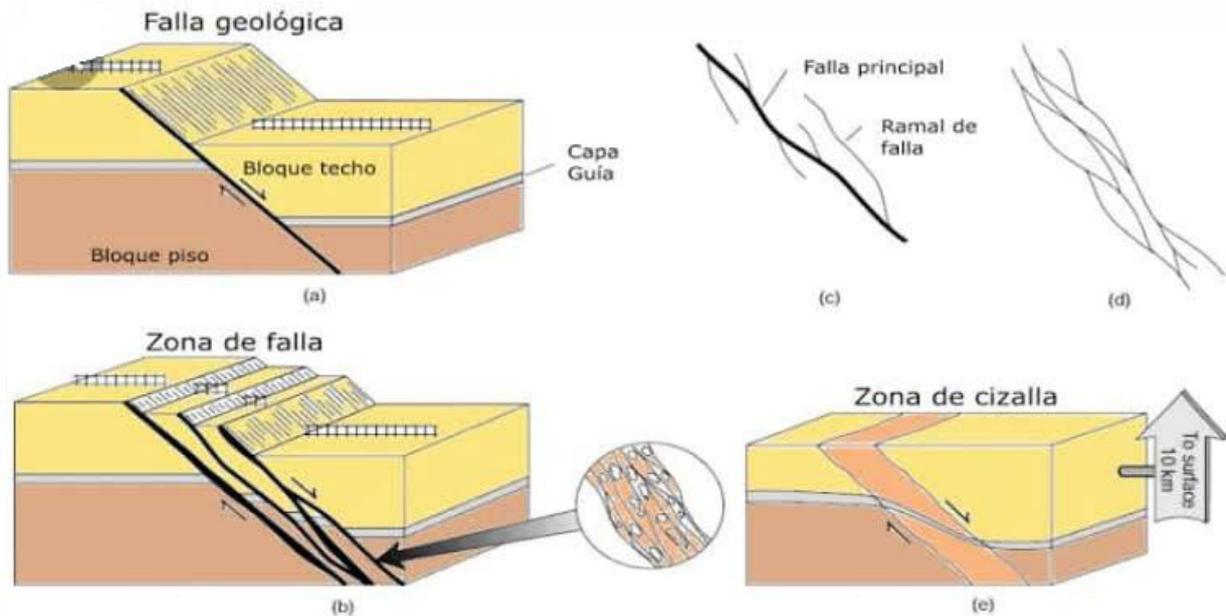
**2.1.8.3 Zona de fractura y falla geológica.** Una zona de fractura es una zona larga y estrecha de topografía irregular formada por el movimiento de las placas tectónicas asociadas con la separación del eje de apertura de una dorsal, caracterizado por lados de pendientes abruptas y/o dorsales asimétricas, surcos o escarpes (IHO-IOC, 2019).

Una falla geológica es una fractura o zona de fractura a través de la cual dos bloques se han deslizado; el desplazamiento de los bloques adyacentes es paralelo al plano de la falla (Bates y Jackson, 1980).

Las fracturas y fallas son prominentes en la parte superior de la litosfera continental y oceánica, donde a menudo se asocian con la actividad sísmica (Rey, 2005).

## Figura 20

### Descripción General de Fallas Geológicas



*Nota.* (a) Falla geológica normal que tiene un bloque piso (i.e., es el bloque de roca que se mantiene estable), un bloque techo (i.e., es el bloque de roca que se desplaza) y un plano de falla (i.e., es el plano por donde se desliza el bloque de roca con respecto al otro bloque). (b) Zona o sistema de falla que consiste en muchas superficies de falla anastomosadas (i.e., de estructura trenzada, se ramifican y agrupan de forma irregular). (c) Falla principal con ramal de falla. (d) Ramales de falla. (e) Zona de cizalla que es una estructura ancha formada bajo condiciones dúctiles (i.e., que sufre grandes deformaciones antes de fracturarse) a dúctiles-frágiles (i.e., transición hacia condición frágil o quebradiza). Una zona de cizalla tiene relación con una zona de falla, ya que una zona de falla es a menudo la prolongación en superficie de una ancha zona de cizalla dúctil en profundidad. Tomado de Geologíaweb (2020).

Sandwell y Smith (1997) nos explica de manera didáctica la formación de fracturas en la cresta del Atlántico medio. La línea curva que va de norte a sur a mitad de camino entre África y las Américas es la ubicación de la cresta del Atlántico medio. Las placas tectónicas de la Tierra se separan a lo largo de esta línea y el contenido de origen magmático sale por la abertura, creando nuevo fondo marino. La distancia entre un punto en América del Norte y un punto en África aumenta aproximadamente en una pulgada por año. La trayectoria de la cresta se desplaza de un lado a otro en las desviaciones llamadas fallas de transformación. Estas fallas de transformación dejan cicatrices en el fondo del océano que son denominadas zona de fractura, y los movimientos de las placas pueden ser rastreados siguiendo esta zona de fractura.

### III. MÉTODO

#### 3.1 Tipo de investigación

En esta tesis se utilizó la investigación mixta (i.e., *cualitativa y cuantitativa*). Se cualifica los ecogramas digitales y se cuantifica las zonas detectadas de expulsión de gas natural.

#### 3.2 Ámbito temporal y espacial

La expedición científica denominada INGEMAR I se realizó en los meses de mayo y junio del año 2016 donde se recolectaron datos hidroacústicos actualizados de tecnología multihaz de alta resolución que fueron utilizados para el desarrollo de esta tesis.

El área de estudio comprende la plataforma y talud continental frente al departamento de Piura, entre Punta Sal ( $80^{\circ}57'W$ ,  $03^{\circ}53'S$ ) y Punta Pariñas ( $81^{\circ}37'W$ ,  $04^{\circ}51'S$ ) con una extensión aproximada de  $4800 \text{ km}^2$  a profundidades de columna de agua de 50 m a 3300 m aproximadamente.

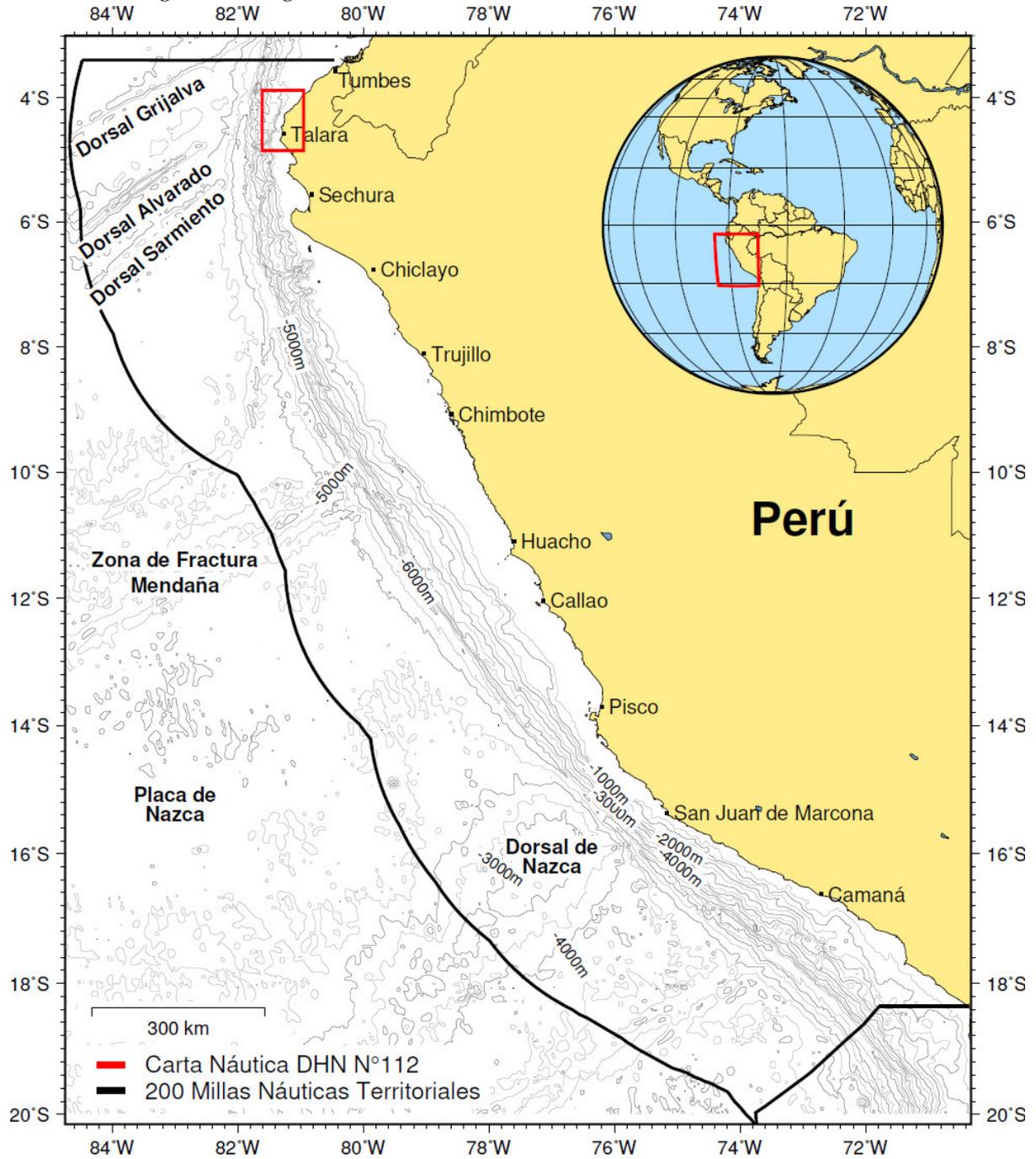
Pertenece al área de la Carta Náutica Recalada n.º 112, escala 1:100,000 de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV) de la Marina de Guerra del Perú (MGP).

Tiene un acceso exclusivamente por vía marítima por medio de embarcaciones desde puertos, caletas y puntos cercanos ubicados en el litoral del departamento de Piura.

Para esta investigación se utilizó la plataforma de trabajo del Buque de la Armada Peruana (B.A.P.) ZIMIC, el cual tuvo tres días de tránsito desde el puerto del Callao al puerto de Paita y un día de tránsito desde el puerto de Paita hacia el área de estudio. El B.A.P. ZIMIC tiene una autonomía de ocho días.

**Figura 21**

*Ubicación del Área de Estudio Pertenciente a la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112 en el Margen Convergente Peruano*



### 3.3 Variables

#### 3.3.1 Independientes

- Plumas de gas.
- Rasgos morfológicos.

### 3.3.2 Dependientes

- Distribución de zonas de expulsión de gas natural.
- Relación entre plumas de gas y rasgos morfológicos.

### 3.4 Población y muestra

- Población: Plumas de gas y rasgos morfológicos existentes en el margen convergente peruano.
- Muestra: Plumas de gas y rasgos morfológicos detectados en el área de estudio entre Punta Sal y Punta Pariñas en el norte del Perú.

### 3.5 Instrumentos

- 500 gigabytes (GB) de datos hidroacústicos en formato *ALL* y 120 gigabytes (GB) de datos hidroacústicos en formato *WCD* recolectados por una ecosonda multihaz *Kongsberg EM302* a una frecuencia de 30 kHz adquiridos en el marco de la expedición *INGEMAR I* liderado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en cooperación con la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV) de la Marina de Guerra del Perú (MGP).
- Softwares: *Echoview 5.2*, *The Generic Mapping Tools (GMT) 5.4.2220*, *QGIS Madeira 3.4.13*, *MB-System 5.7.5* y  $\text{\LaTeX}$ .

### 3.6 Procedimientos

Esta investigación se dividió en tres (3) etapas:

#### 3.6.1 Etapa de pre-campo

- Revisión bibliográfica de artículos científicos sobre la presencia de plumas de gas en diferentes márgenes continentales del mundo.

### 3.6.2 *Etapa de campo*

- Mediante la plataforma de investigación del buque de la Armada Peruana (B.A.P.) ZI-MIC se recolectaron datos de columna de agua y de batimetría multihaz del fondo marino utilizando un ecosonda *Kongsberg EM302* con tecnología multihaz de alta resolución en el marco del crucero geocientífico INGEMAR I. Este crucero de investigación se realizó entre el 26 de mayo y el 29 de junio del año 2016 (35 días de navegación) y representó el crucero geocientífico de inauguración de la cooperación INGEMMET-MGP.

Esta ecosonda multihaz trabaja con una frecuencia de 30 kHz y con una resolución de 10 m permitiendo reunir información que encierra la retrodispersión del sonido (i.e., *eco*), con una emisión de 432 haces de sonido por disparo y una recepción de 288 haces de sonido por disparo, a una distancia angular de 1° y una apertura máxima de 150°. El sistema acústico consistió en un transductor múltiple para transmisión y recepción, una unidad de control y procesado y una unidad de operador formada por un PC con discos duros accesorios, grabador de *DVDs* y conexiones *USB*.

Estos datos nos permiten ver formas en 3D del fondo marino, textura del fondo marino y los dispersores de sonido (e.g., *burbujas de gas, peces u otros objetos sumergidos*) que se encuentran en la columna de agua.

El levantamiento batimétrico se realizó bajo las normativas de la *International Hydrographic Organization (IHO)*.

### 3.6.3 *Etapa de post-campo*

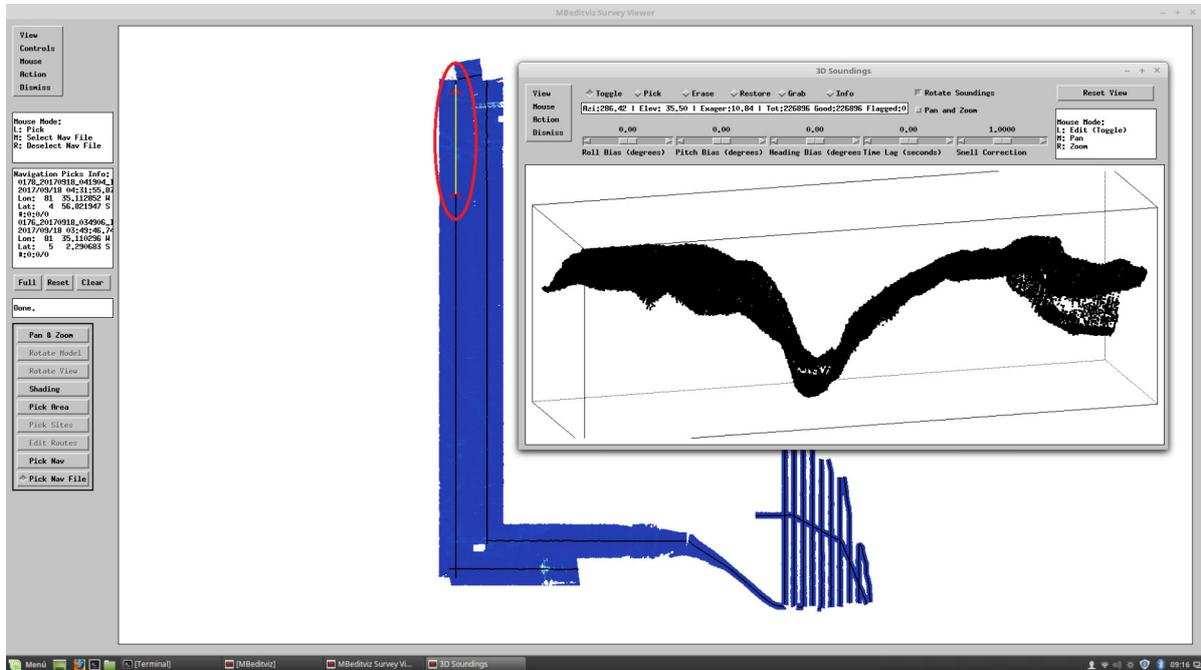
- Procesamiento de batimetría, utilizando los datos recolectados en formato *ALL* para determinar la morfología del área de estudio definida por la distancia entre la superficie del mar y el fondo marino.

El procesamiento de la batimetría multihaz se realizó con el software de código libre *MB-System* bajo el entorno del sistema operativo *Linux* (Figura 22).

La corrección de la batimetría multihaz consistió en el filtrado de *spikes* y luego de manera interactiva a través del módulo de edición del software *MB-System*.

**Figura 22**

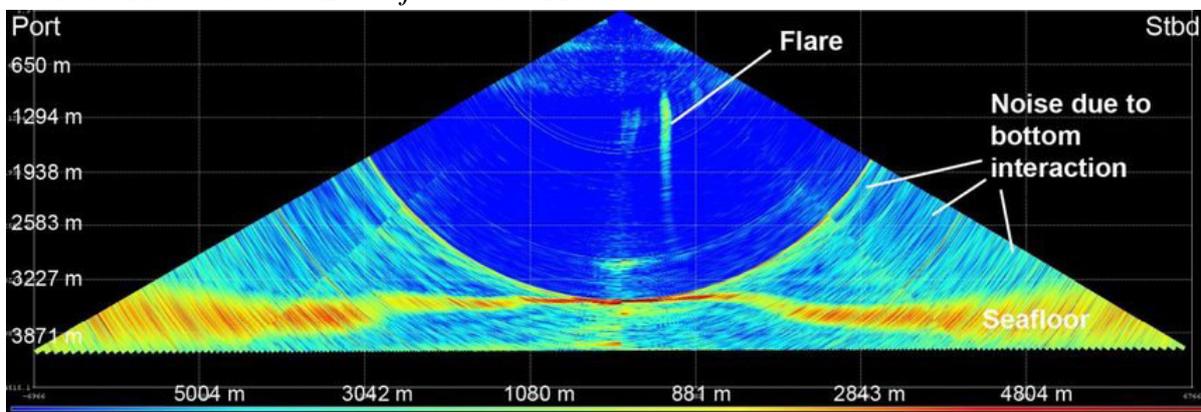
*Post-Procesamiento Batimétrico*



- Revisión e interpretación de registros acústicos de columna de agua recolectados en formato *WCD* para la localización y caracterización de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural en ecogramas digitales de tecnología multihaz (Figura 23).

**Figura 23**

*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalía Acústica en Forma de Pluma Causada por una Nube Ascendente de Burbujas de Gas Metano*



Nota. Tomado de Sahling et al. (2016).

La revisión de datos acústicos de columna de agua se realizó con el software *Echoview* bajo el entorno del sistema operativo *Windows*.

Cada anomalía acústica de zona de plumas de gas natural detectada en un ecograma digital representa información acústica recibida de un *ping* y el conjunto de *pings* representa una zona de expulsión de gas natural. Estos ecotrazos deben cumplir con ciertos patrones específicos mencionados a continuación.

Para considerar la existencia de una zona de expulsión de gas natural se tomó en cuenta las siguientes características específicas:

- Anomalías acústicas o ecotrazos con forma de pluma.
  - Anomalías acústicas o ecotrazos con un comportamiento ascendente desde el fondo marino.
  - Anomalías acústicas o ecotrazos con una continuidad en profundidad de columna de agua.
  - Anomalías acústicas o ecotrazos con una repetibilidad por cercanía (i.e., *con características similares por cada pulso acústico entre ecogramas*).
  - Anomalías acústicas o ecotrazos con forma de pluma asociados a rasgos morfológicos (i.e., *el analista acústico interpreta los rasgos morfológicos por su forma geométrica en el ecograma digital*).
  - Discriminación por migración vertical nocturna, de organismos hidrobiológicos.
  - Discriminación por comportamiento distinto a cardúmenes (i.e., *la mayoría de los cardúmenes están difusos y extendidos horizontalmente*).
  - Discriminación por anomalías acústicas o ecotrazos con formas geométricas no consistentes.
- Generación de una base de datos de zonas de expulsión de gas natural, con datos de longitud y latitud, profundidad en metros desde donde las anomalías acústicas de zona de plumas de gas se elevan hacia la columna de agua, su altura máxima en metros para la elaboración de histogramas de frecuencia y un rango aproximado de decibeles (dB)

de cada anomalía acústica de zona de plumas de gas natural identificada. Para la ubicación de zonas de expulsión de gas natural se consideró el promedio de cada posición de anomalías acústicas de zona de plumas de gas natural pertenecientes a cada zona de expulsión.

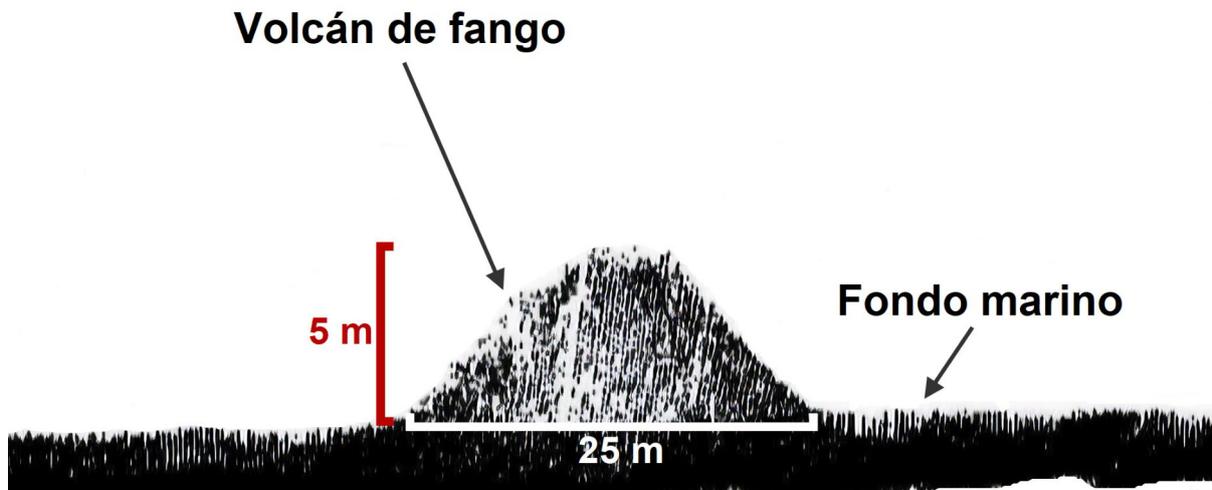
- Generación de un mapa batimétrico para la caracterización de perfiles y distribución de zonas de expulsión de gas natural del área de estudio.

El diseño de mapas se realizó con el software de código libre *GMT* y *QGIS* bajo el entorno del sistema operativo *Linux* y *Windows*.

- Generación de una base de datos de las principales formaciones identificadas (e.g., *elevaciones, depresiones*) (Figura 24) con información de posición y distancia de las zonas de expulsión de gas natural más cercanas para la elaboración de histogramas de frecuencia. Para la información de posición de rasgos morfológicos, se consideró el punto más alto en el caso de rasgos morfológicos de relieve positivo (e.g., volcanes de fango, afloramientos rocosos) y el punto más bajo en el caso de rasgos morfológicos de relieve negativo (e.g., pockmarks, canales de cañón submarino) en el Modelo de Elevación Digital (*DEM, por sus siglas en inglés*). Para la información de distancia, se consideró la distancia desde la posición de cada anomalía acústica de zona de plumas de gas natural (i.e., *que pertenecen a una zona de expulsión de gas natural*) hasta la posición del rasgo morfológico más cercano en el *DEM*. En el caso de fallas, se consideró el promedio de la distancia inicial y la distancia final (i.e., *el promedio de la distancia más cercana de un punto extremo de la falla con la distancia del otro punto extremo*) en el *DEM*.

## Figura 24

*Identificación de un Volcán de Fango en la Edición de Batimetría*



*Nota.* Volcán de fango identificado costa afuera de Talara con una altura de 5 m y un diámetro de 25 m. Adaptado de Herbozo et al. (2017).

- Análisis geoestadístico sobre la distribución espacial de las zonas de expulsión de gas utilizando el software de código libre *GMT* bajo el entorno del sistema operativo *Linux*.
- Interpretación de la relación que tienen las zonas de expulsión de gas con los rasgos morfológicos encontrados en el área de estudio.

### 3.7 Análisis de datos

Para el análisis de datos de la distribución espacial de zonas de expulsión de gas natural en el área de estudio, se utilizaron representaciones gráficas de histogramas de frecuencias por conteo utilizando el software de código libre *GMT* bajo el entorno del sistema operativo *Linux*.

## IV. RESULTADOS

### 4.1 Morfología regional del fondo marino

La expedición INGEMAR I proporcionó datos acústicos digitales en 35 días efectivos de trabajo con batimetría multihaz de alta resolución. El levantamiento batimétrico cubrió el 0.42 % del relieve submarino de las 200 millas náuticas del Mar Peruano (1141 millones de km<sup>2</sup>). Se encuentran entre 50 m de profundidad de columna de agua hasta el límite oeste del área de estudio donde se encuentra el talud superior con una profundidad de columna de agua máxima de 3300 m. Después del procesamiento se obtuvo un mapa batimétrico a escala 1:100,000 que sirvió de base para realizar los perfiles del área de estudio (Figura 25) y la ubicación de 66 zonas de expulsión de gas natural detectadas en el presente trabajo de tesis (Figura 32).

La plataforma continental se extiende desde la línea de costa hasta los 200 m de profundidad de columna de agua (i.e., *considera el área entre la línea de costa y los 100 m de profundidad de columna de agua que no fue levantada por el crucero INGEMAR I*).

La existencia del cañón submarino de Talara, el desconocido cañón de El Alto y otros canales submarinos que eran desconocidos previo al crucero INGEMAR I; interceptan la plataforma continental modificando la morfología del fondo marino tanto en la plataforma como en el quiebre de la plataforma. Estos rasgos morfoestructurales presentan profundidades máximas de 3000 m de profundidad de columna de agua como es el caso del Cañón submarino de Talara.

El quiebre de la plataforma se presenta entre 200 m y 250 m de profundidad de columna de agua.

El talud continental se encuentra entre 250 m y 3300 m de profundidad de columna de agua. Se diferencian zonas de aporte en el talud del área de estudio debido a la presencia de cañones submarinos y canales que erosionan el talud continental. Cerca de la zona de quiebre de plataforma, estos canales y cañones poseen pendientes abruptas donde la mayor pendiente se encuentra en el sector centro del área de trabajo en el Cañón de Talara.

Los canales son sedimentos recientes que forman conos de deyección hacia la cuenca

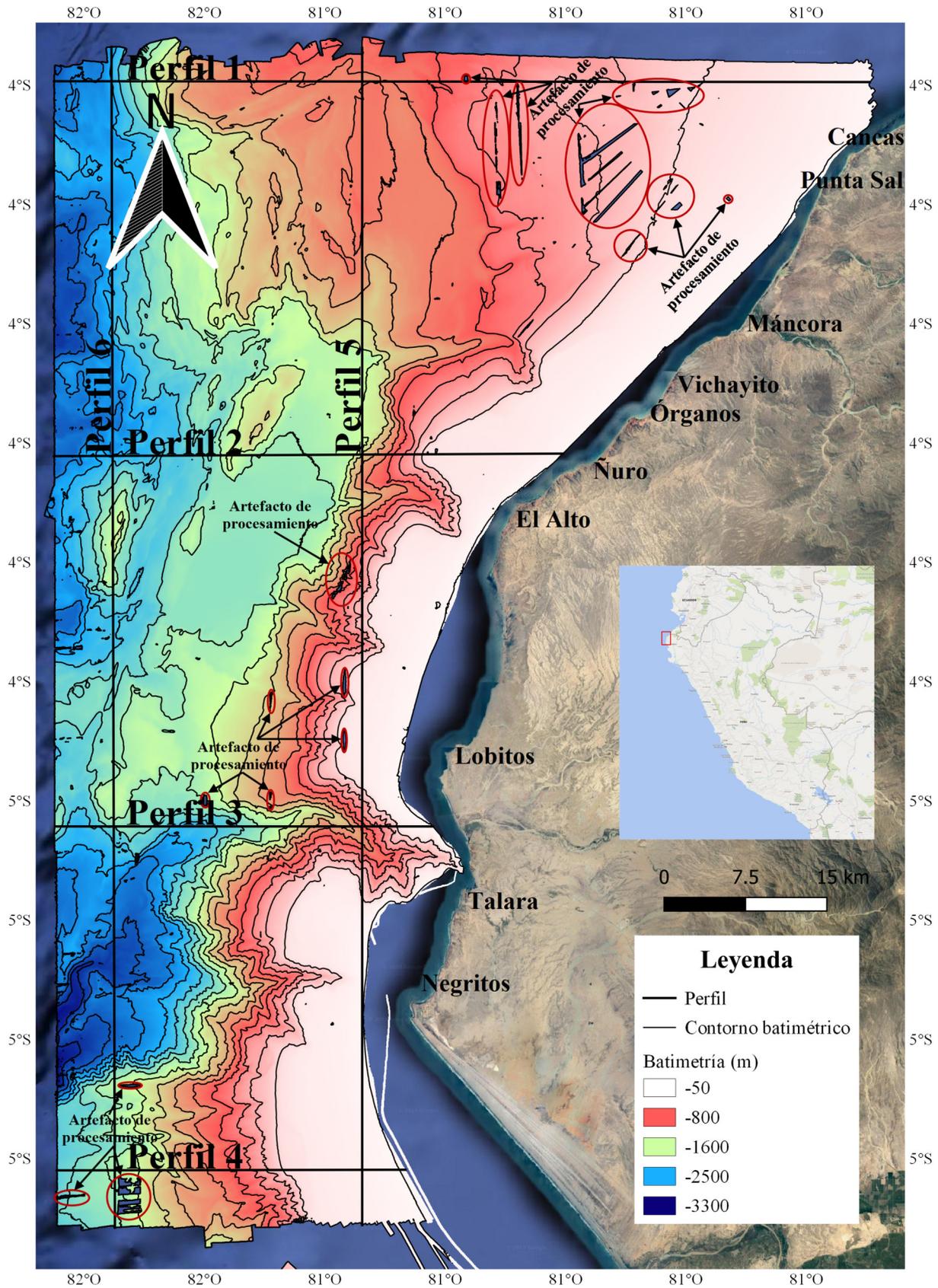
de talud con dirección N70°E producto de la erosión de plataforma y talud continental. Estos rasgos se observan en la zona de plataforma, talud y cuenca, pero con mayor presencia en el talud continental.

La cuenca de talud se encuentra entre 900 m y 1800 m de profundidad de columna de agua, tiene un área de 500 km<sup>2</sup> y pendiente entre 1° y 2°. Esta zona corresponde a la región más distal de la costa, se encuentra en contacto con la base del talud y la desembocadura de los canales que provienen de los sedimentos erosionados en el talud. Alrededor de la cuenca se observan montes submarinos con alturas máximas de 800 m de alto respecto del fondo marino circundante.

Perfiles batimétricos (Figura 25) muestra una representación gráfica vertical de la disposición en profundidad de las unidades y estructuras geológicas del área de estudio. Se muestran 6 perfiles, los cuales 4 perfiles son de este-oeste: Perfil 1 (Figura 26), perfil 2 (Figura 27), perfil 3 (Figura 28) y perfil 4 (Figura 29) que cubren zonas de plataforma y talud continental; y 2 perfiles de norte-sur: Perfil 5 (Figura 30) y perfil 6 (Figura 31) que cortan zonas de talud-plataforma continental y talud continental respectivamente.

**Figura 25**

*Mapa de Perfiles Batimétricos del Área de la Carta Náutica Recalada n.º 112 de la DIHIDRONAV*



En los perfiles batimétricos se observa el quiebre de plataforma continental que se da por un aumento marcado en la pendiente, los cuales, según Zinck (2012) se pueden describir en seis rangos o grados de pendiente: zonas llanas ( $<3^\circ$ ), zonas con pendiente suave ( $3^\circ$  a  $10^\circ$ ), zonas con pendiente moderada ( $10^\circ$  a  $20^\circ$ ), zonas con pendiente fuerte ( $20^\circ$  a  $30^\circ$ ), zonas con pendiente muy fuerte ( $30^\circ$  a  $50^\circ$ ) y zonas escarpadas ( $>50^\circ$ ).

El perfil 1 este-oeste (Figura 26) se encuentra a las afueras de la zona norte de Cancas, capital del distrito de Canoas de Punta Sal en Tumbes, con una distancia de 66 km que cubre una zona de plataforma continental de 21 km y otra zona de talud continental de 45 km. Tiene una profundidad mínima de columna de agua de 60 m y una profundidad máxima de columna de agua de 2757 m. Entre las principales unidades geomorfológicas se observa el quiebre de plataforma continental y dos cuencas, además, abarca zonas con pendiente suave en la plataforma continental, zonas con pendiente fuerte en el talud superior y zonas con pendiente muy fuerte en el talud medio.

### Figura 26

*Perfil 1 Este-Oeste (Sector Norte) del Área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112*

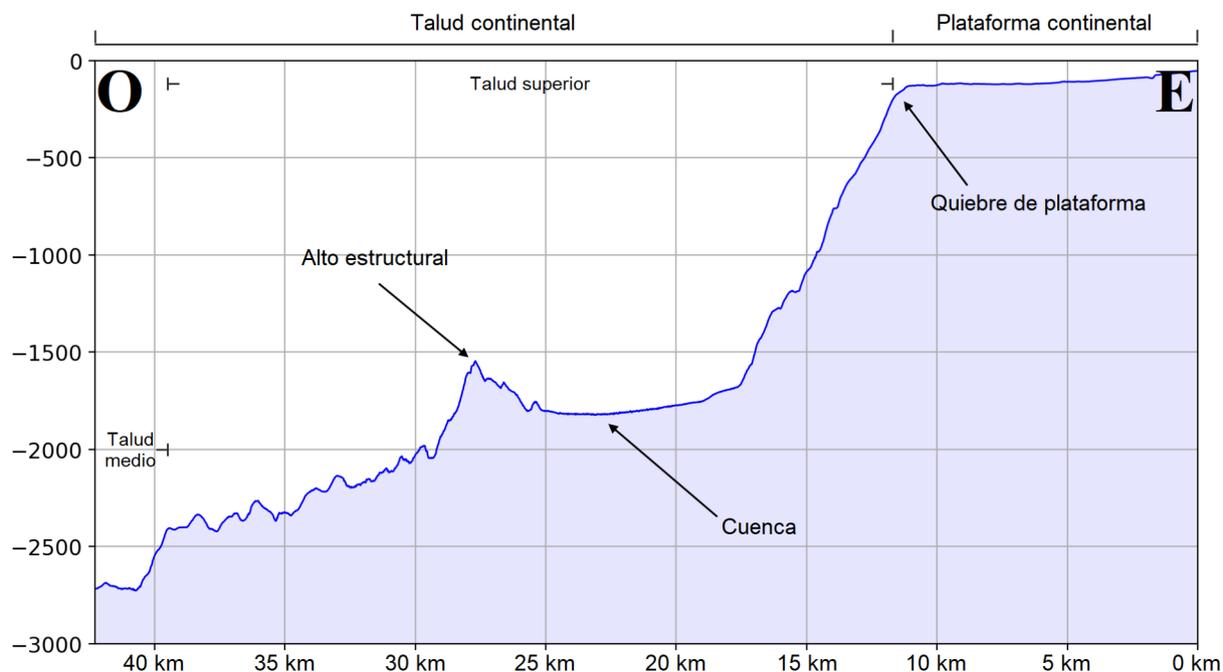


A las afueras del norte del distrito El Alto en el departamento de Piura se encuentra el perfil 2 este-oeste (Figura 27), el cual tiene una distancia de 43.5 km que cubre una zona de plataforma continental de 11.5 km y otra zona de talud continental de 32 km. Posee una profundidad mínima de columna de agua de 54 m y una profundidad máxima de 2726 m. Entre las principales unidades geomorfológicas se observa el quiebre de plataforma continental, una cuenca y un alto estructural, además, abarca zonas con pendiente suave en la plataforma con-

tinental, zonas con pendiente muy fuerte en el talud superior y zonas con pendiente fuerte y muy fuerte en el talud medio.

### Figura 27

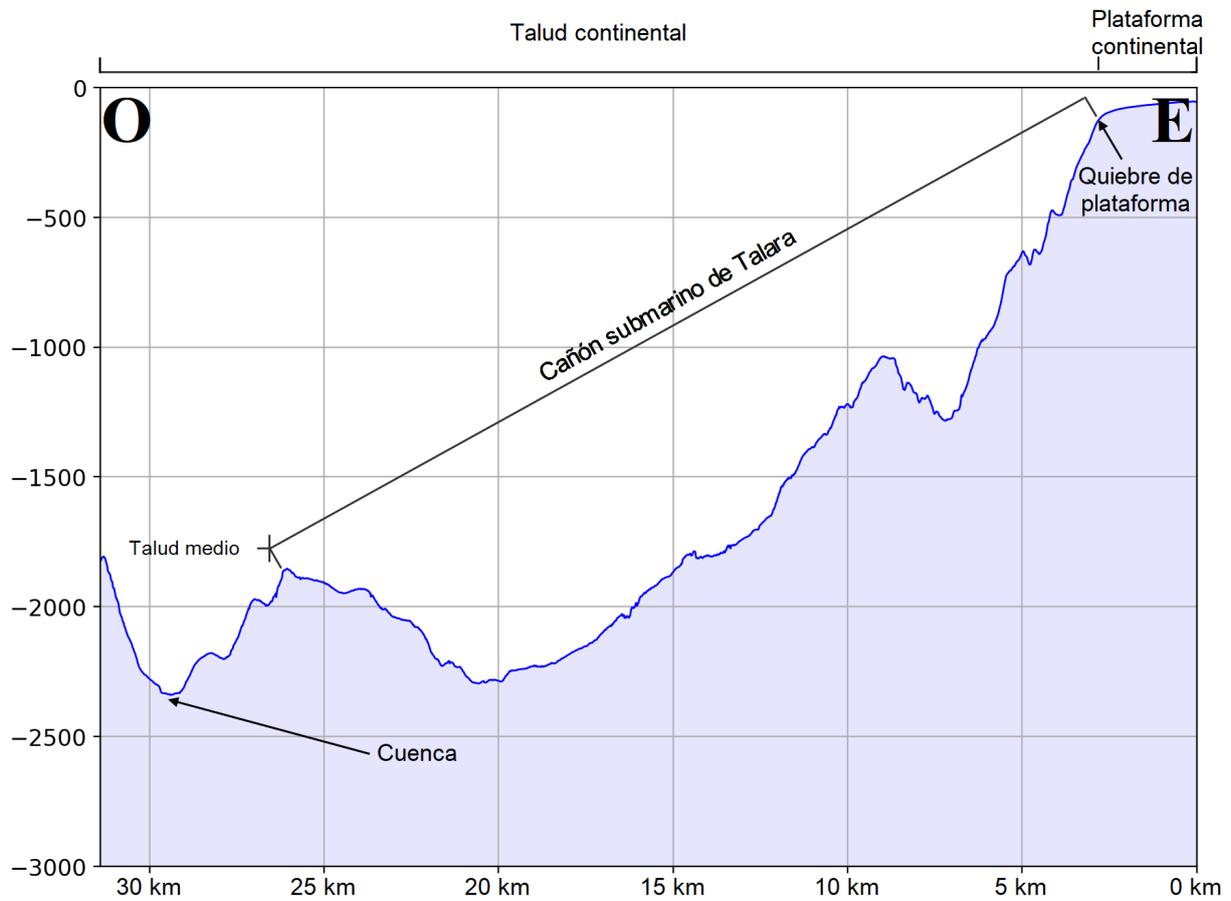
*Perfil 2 Este-Oeste (Sector Norte-Centro) del Área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112*



Costa afuera, entre el distrito de Lobitos y la ciudad de Talara en Piura, se encuentra el perfil 3 este-oeste (Figura 28), el cual tiene una distancia de 32 km que cubre una zona de plataforma continental de 2.5 km y otra zona de talud continental de 29.5 km. Cuenta con una profundidad mínima de columna de agua de 53 m y una profundidad máxima de 2341 m. Entre las principales unidades geomorfológicas se observa el quiebre de plataforma continental y una cuenca, además, abarca zonas con pendiente suave en la plataforma continental, zonas escarpadas en la sección que corta el Cañón Submarino de Talara y zonas con pendiente muy fuerte en el talud medio.

**Figura 28**

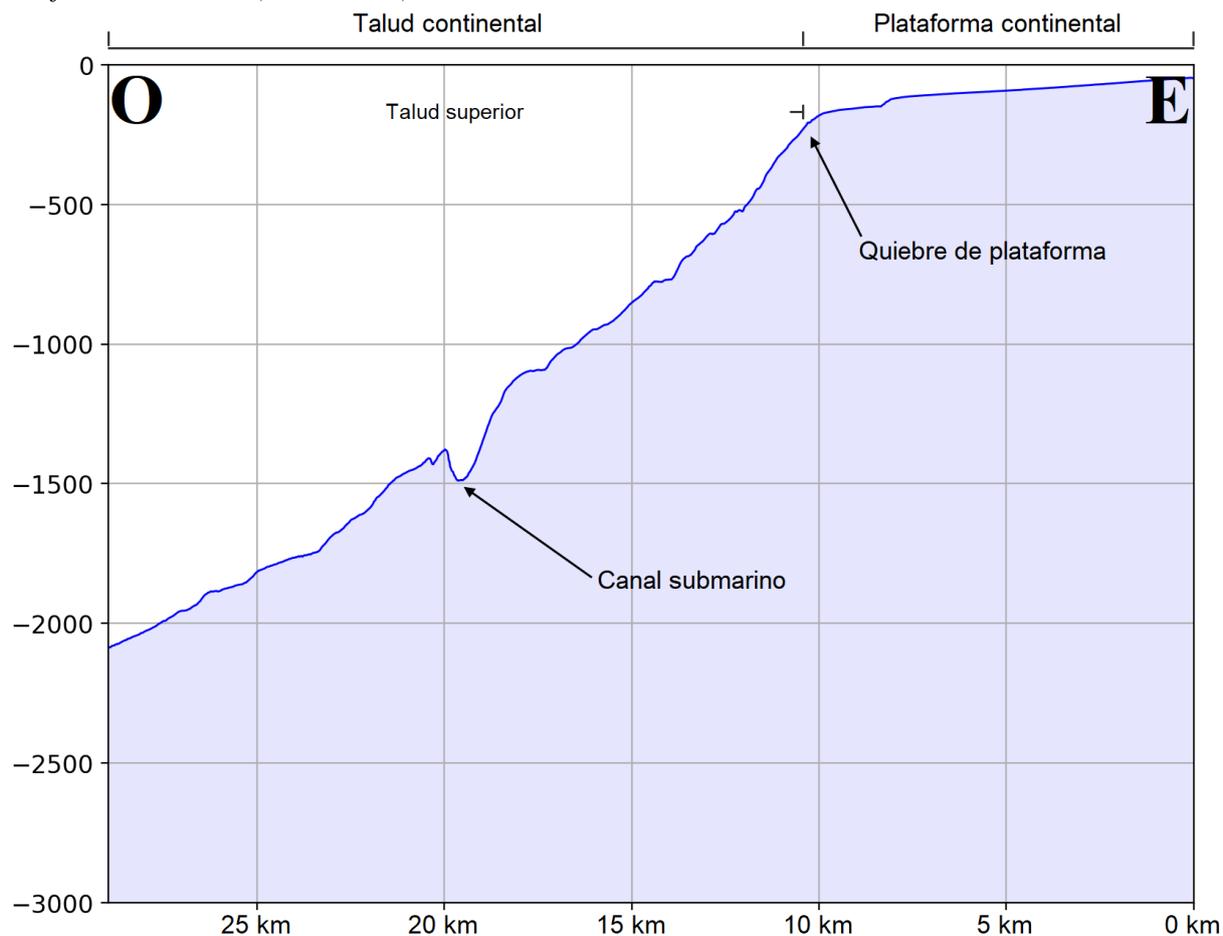
*Perfil 3 Este-Oeste (Sector Sur-Centro) del Área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112*



El perfil 4 este-oeste (Figura 29) se encuentra a las afueras del norte del centro poblado de La Bocana, en Piura, el cual tiene una distancia de 66.5 km que cubre una zona de plataforma continental de 8.5 km y otra zona de talud continental de 58 km. Posee una profundidad mínima de columna de agua de 46 m y una profundidad máxima de 2086 m. Entre las principales unidades geomorfológicas se observa el quiebre de plataforma continental y un canal submarino, además, abarca zonas con pendiente suave en la plataforma continental y zonas con pendiente fuerte en el talud superior.

**Figura 29**

*Perfil 4 Este-Oeste (Sector Sur) del Área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112*



El perfil 5 norte-sur (Figura 30) cubre toda el área. Tiene una distancia de 99 km, corta zonas de plataforma y talud continental. Este perfil cuenta con una profundidad mínima de columna de agua de 52 m y una profundidad máxima de 1678 m. Entre las principales unidades geomorfológicas se observa una cuenca, el Cañón Submarino de El Alto, el Cañón Submarino de Lobitos y el Cañón Submarino de Talara.

**Figura 30**

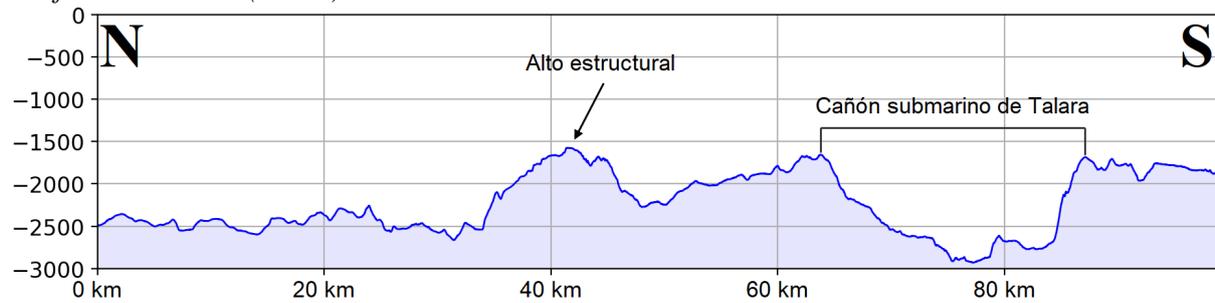
*Perfil 5 Norte-Sur (Plataforma-Talud) del Área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112*



El perfil 6 norte-sur (Figura 31) cubre toda el área. Tiene una distancia de 99 km, corta zonas de talud continental. Este perfil posee una profundidad mínima de 1573 m y una profundidad máxima de 2932 m. Entre las principales unidades geomorfológicas se observa un Alto estructural y el Cañón Submarino de Talara.

### Figura 31

*Perfil 6 Norte-Sur (Talud) del Área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112*

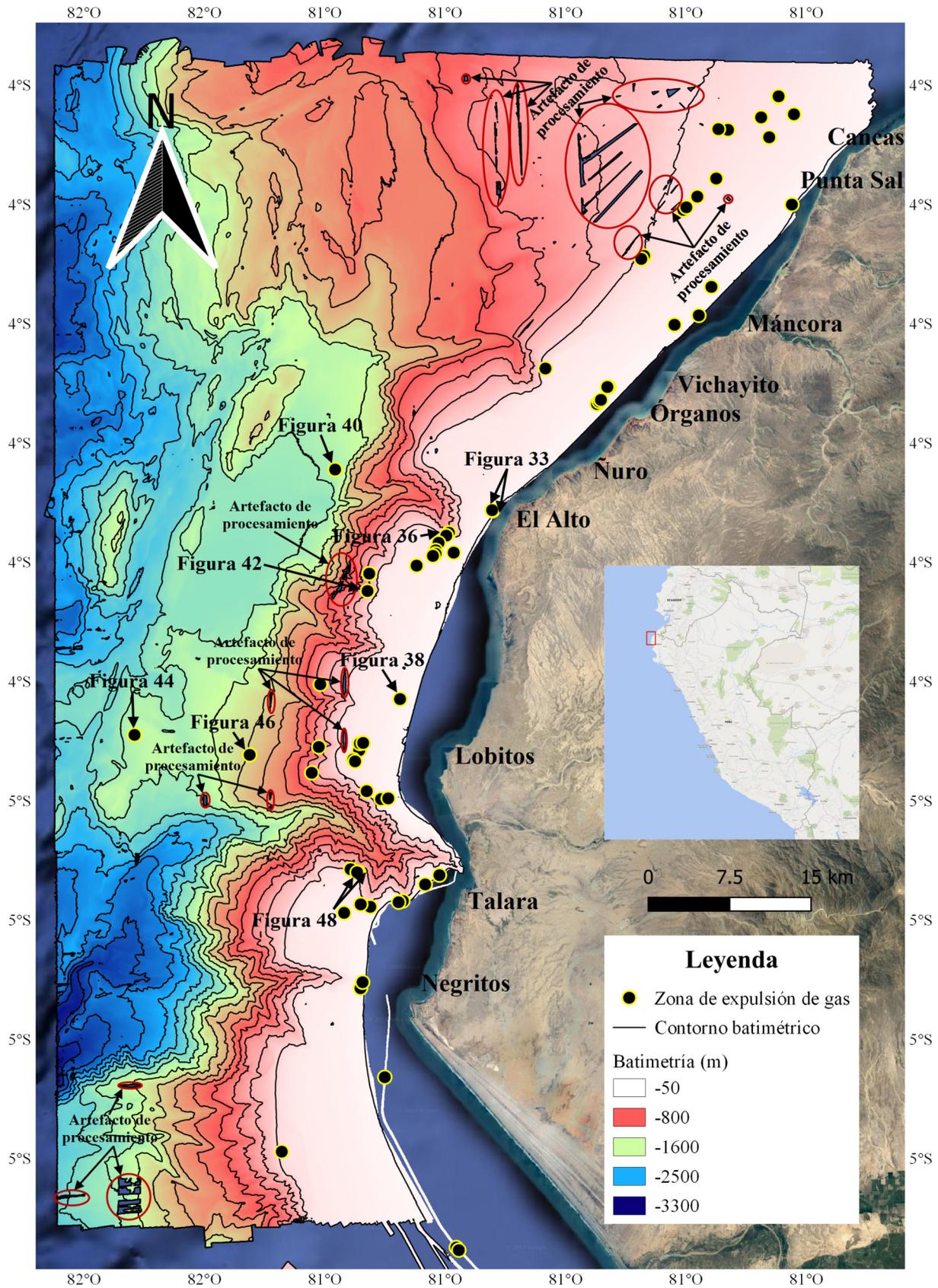


## 4.2 Zonas de expulsión de gas natural y rasgos morfológicos

Se identificaron 66 zonas de expulsión de gas natural de acuerdo a su distribución espacial a escala 1:100,000 en la zona norte del margen convergente peruano (Figura 32).

**Figura 32**

*Mapa de Distribución de Zonas de Expulsión de Gas Natural del Área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112*



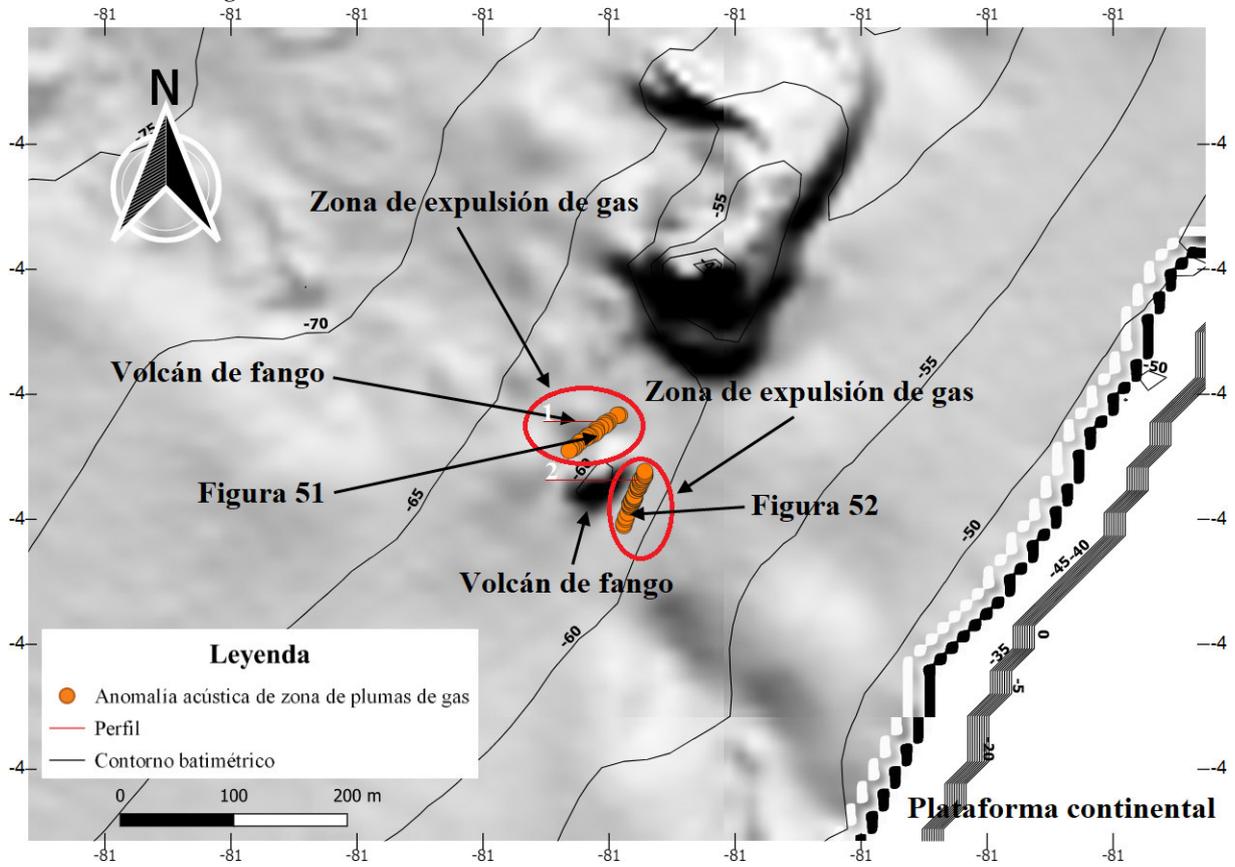
Asimismo, la batimetría muestra la presencia de distintos rasgos morfológicos de entre los cuales se identificaron quince (15) pockmarks, dos (2) pockmarks con volcanes de fango en el interior, doce (12) volcanes de fango, una (1) cadena de volcanes de fango dentro de un pockmark, una (1) cadena de volcanes de fango, seis (6) fallas, doce (12) afloramientos rocosos, diez (10) canales de cañón submarinos y tres (3) canales submarinos que se encuentran en sitios cercanos a las zonas de expulsión de gas natural detectadas en el área de estudio.

Los principales tipos de rasgos identificados fueron pockmarks, volcanes de fango, afloramientos rocosos, canales de cañón submarinos y fallas. Se observaron que algunas de estas estructuras del relieve submarino (i.e., *pockmarks*, *volcanes de fango*, *fallas*) encuentran una relación con zonas de expulsión de gas natural. Por otro lado, algunas plumas de gas también están ubicadas en zonas de escarpe que probablemente tendrían un vínculo con algunas fallas geológicas.

A continuación, se presentan 10 zonas de expulsión de gas que guardan una relación con cinco principales tipos de rasgos morfológicos identificados en las zonas de expulsión (i.e., *pockmarks*, *volcanes de fango*, *afloramientos rocosos*, *canales de cañón submarinos* y *fallas*) con sus respectivos perfiles batimétricos. De las 10 zonas de expulsión de gas, cuatro zonas de expulsión se encuentran en la plataforma continental (Figura 33, 36 y 38) y seis zonas de expulsión en el talud continental (Figura 40, 42, 44, 46 y 48). Son las siguientes:

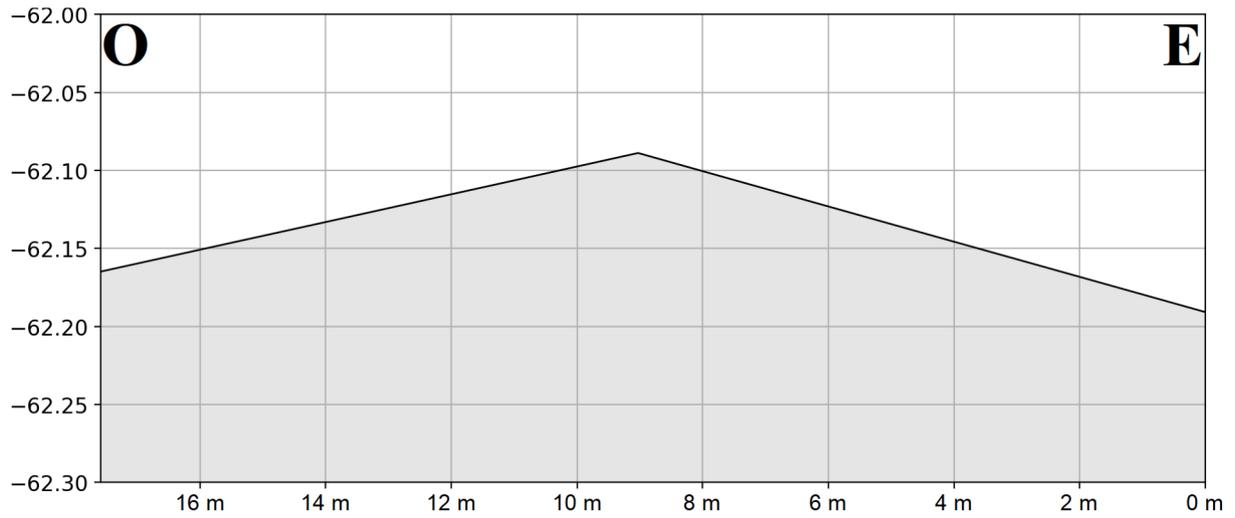
**Figura 33**

*Dos Zonas de Expulsión de Gas en la Plataforma Continental que Guardan una Relación con Volcanes de Fango*



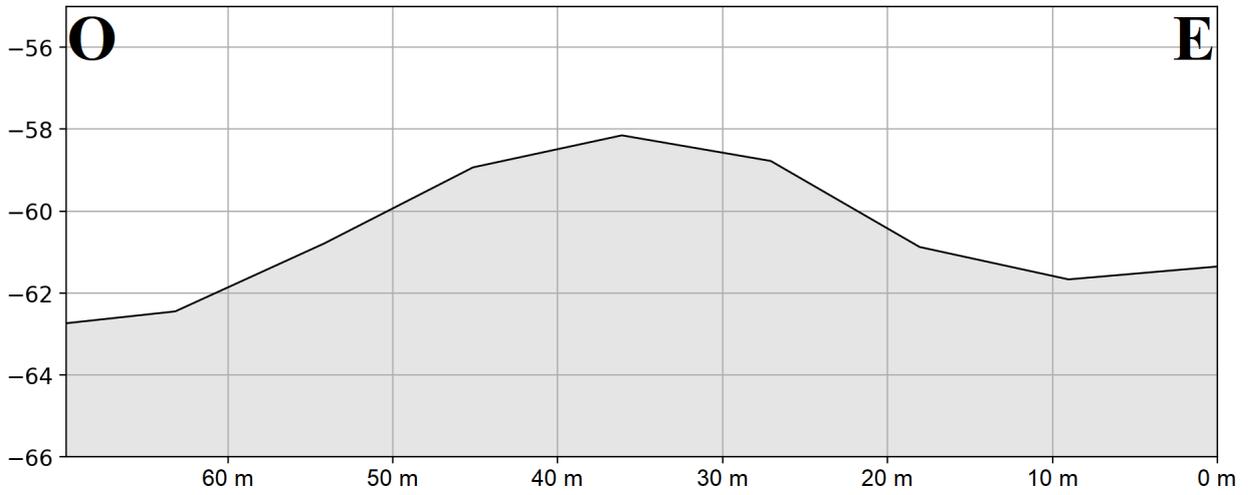
**Figura 34**

*Perfil 1 Este-Oeste del Volcán de Fango en la Plataforma Continental*



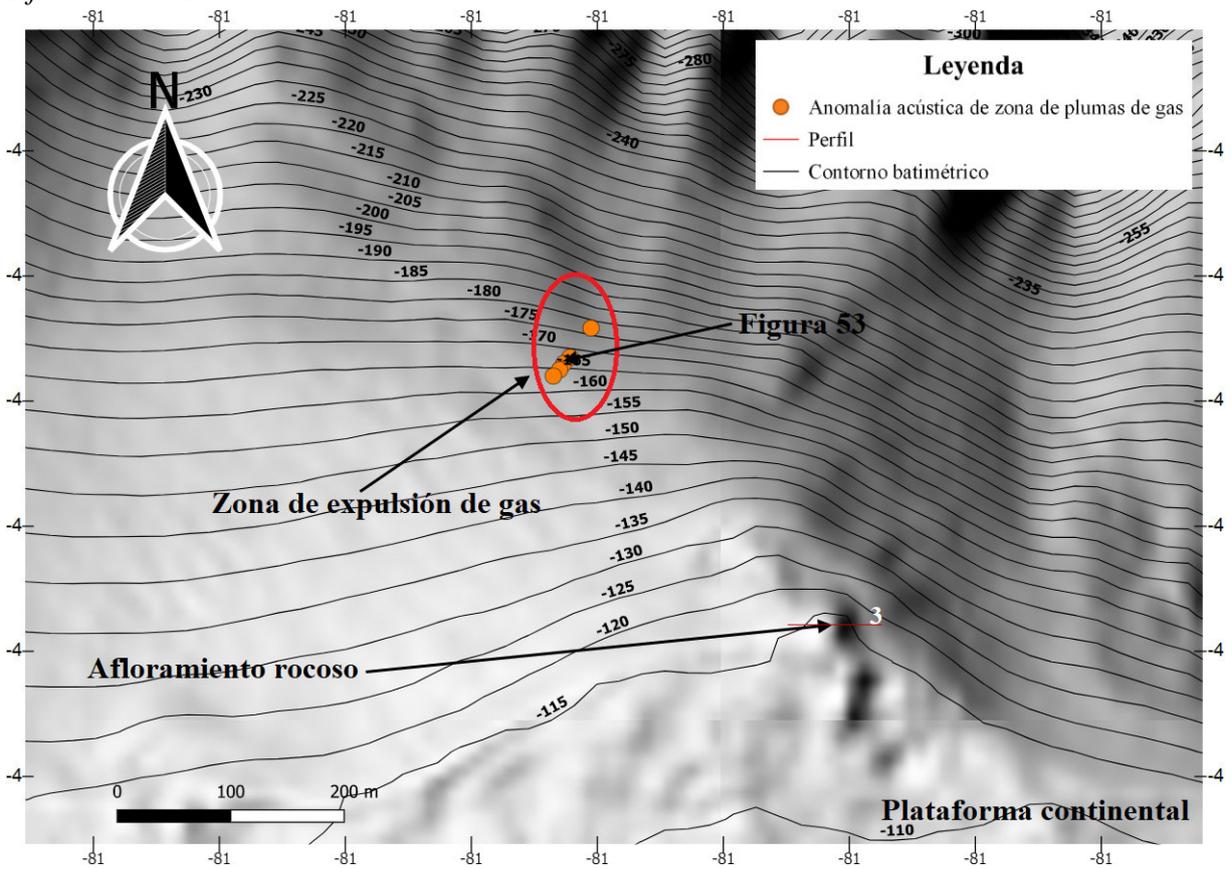
**Figura 35**

*Perfil 2 Este-Oeste del Volcán de Fango en la Plataforma Continental*



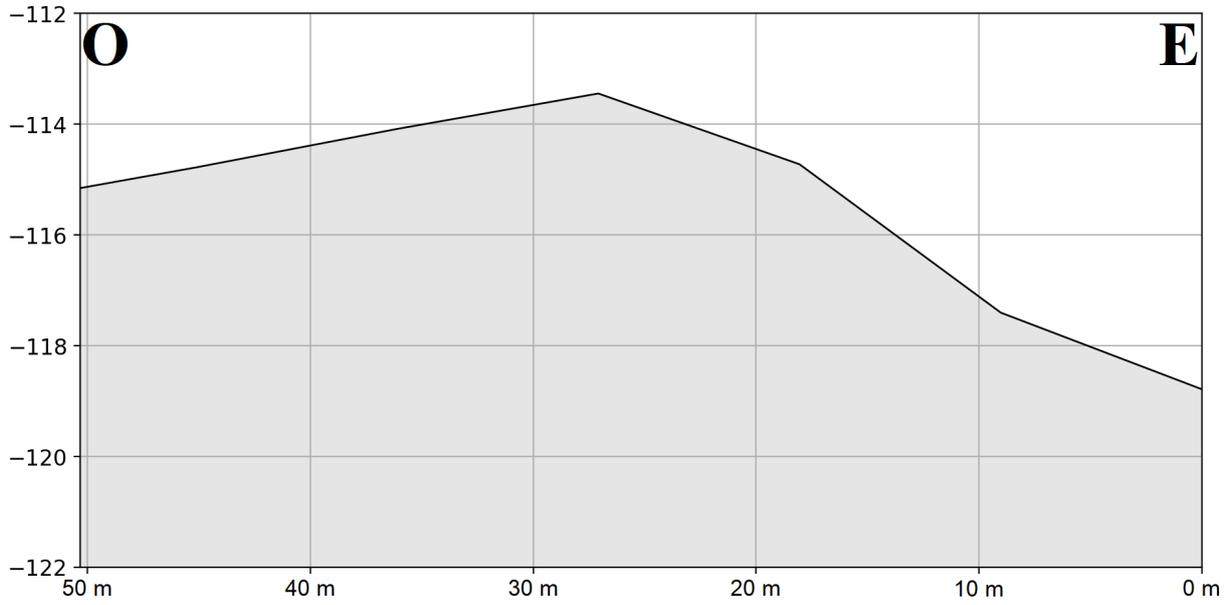
**Figura 36**

*Zona de Expulsión de Gas en la Plataforma Continental que Guarda una Relación con un Afloramiento Rocoso*



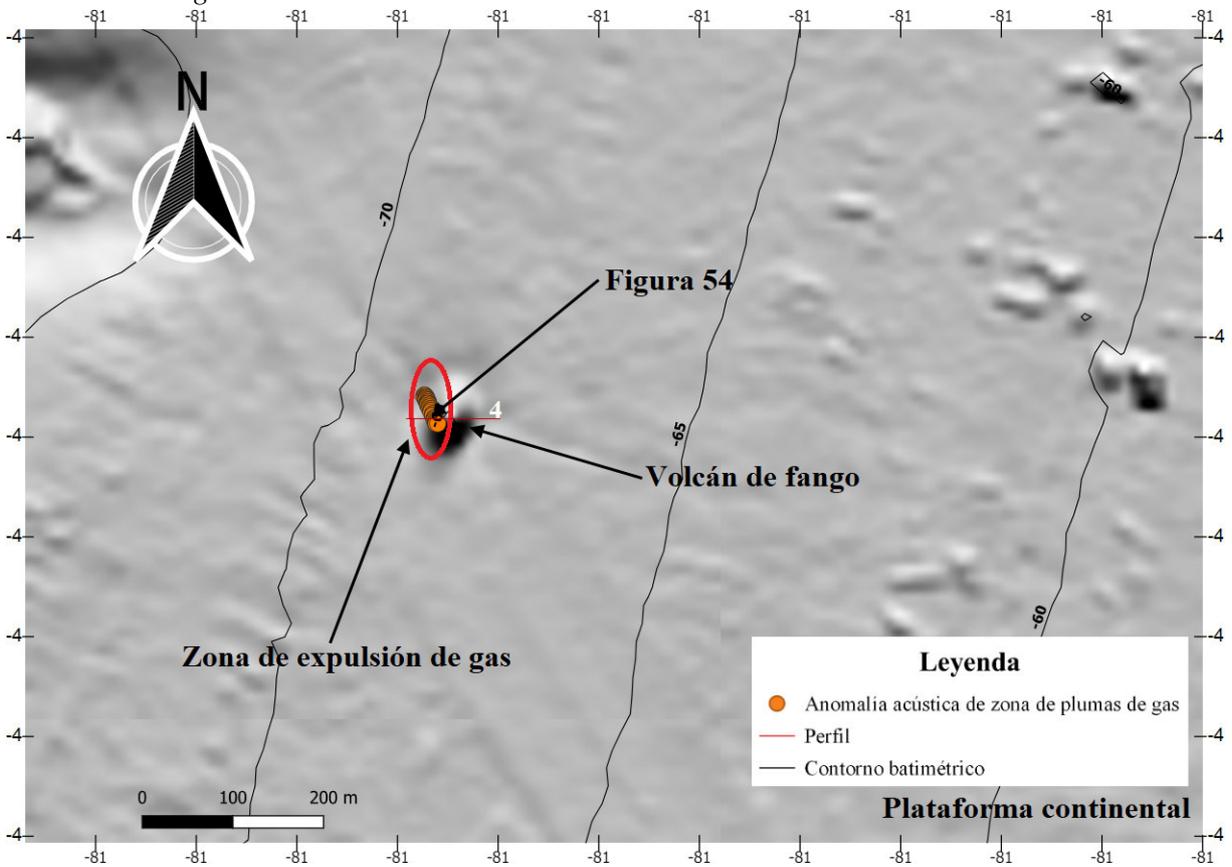
**Figura 37**

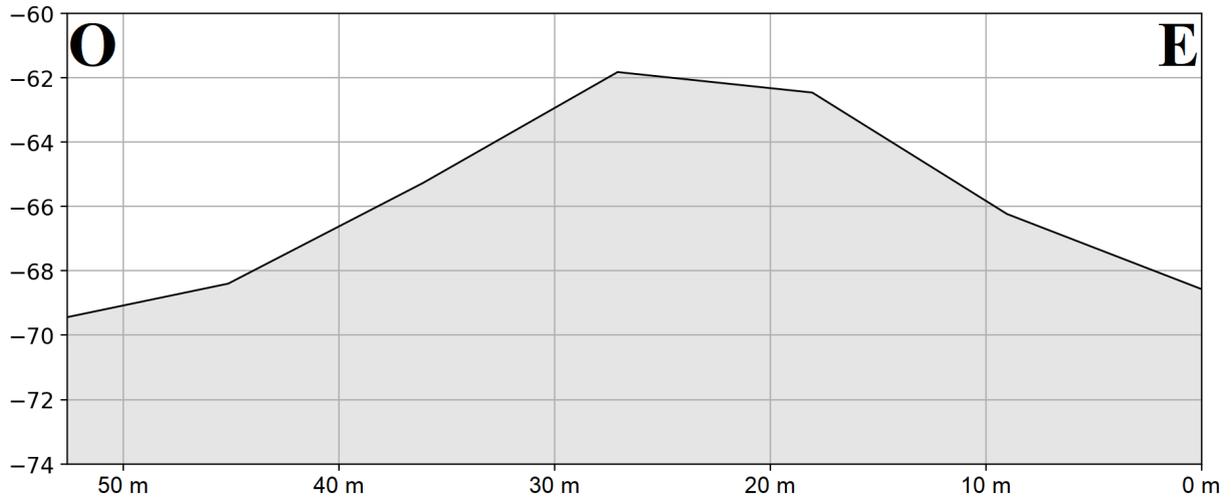
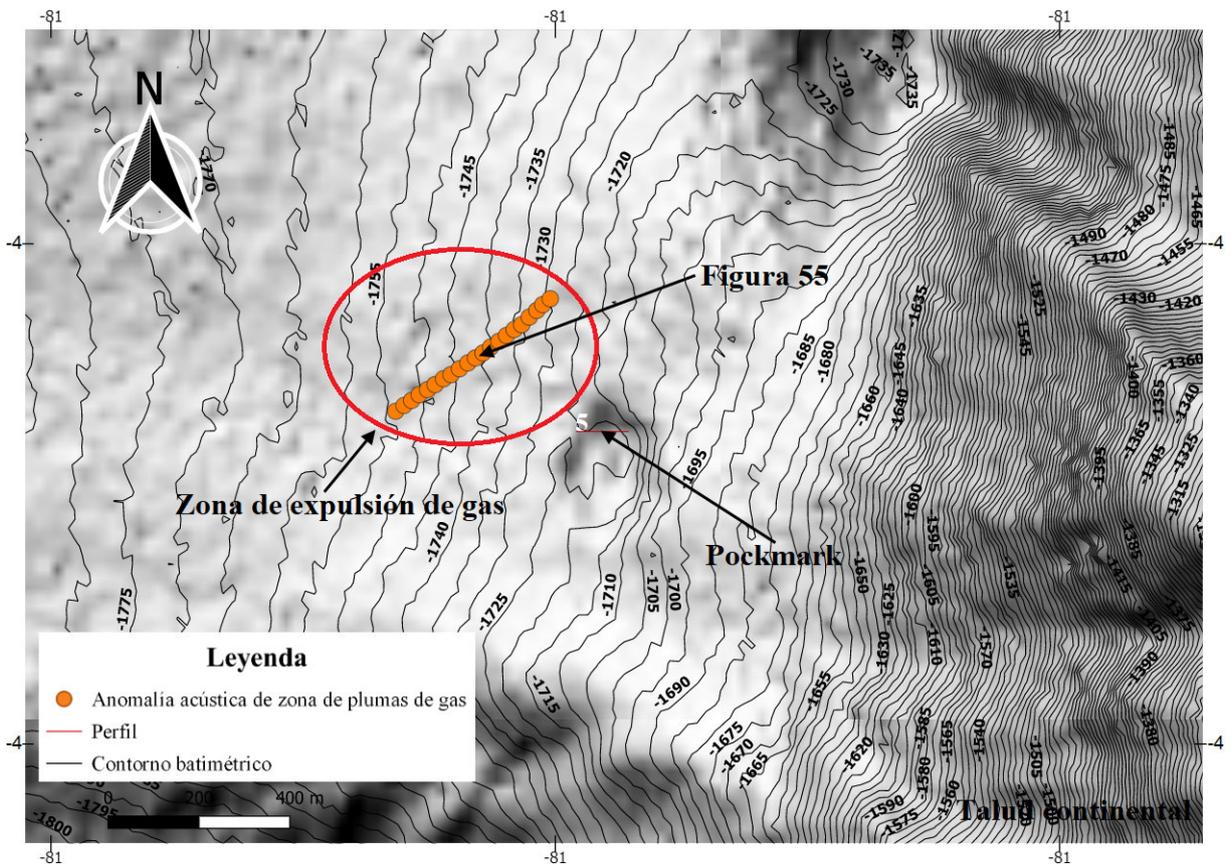
*Perfil 3 Este-Oeste del Afloramiento Rocoso en la Plataforma Continental*



**Figura 38**

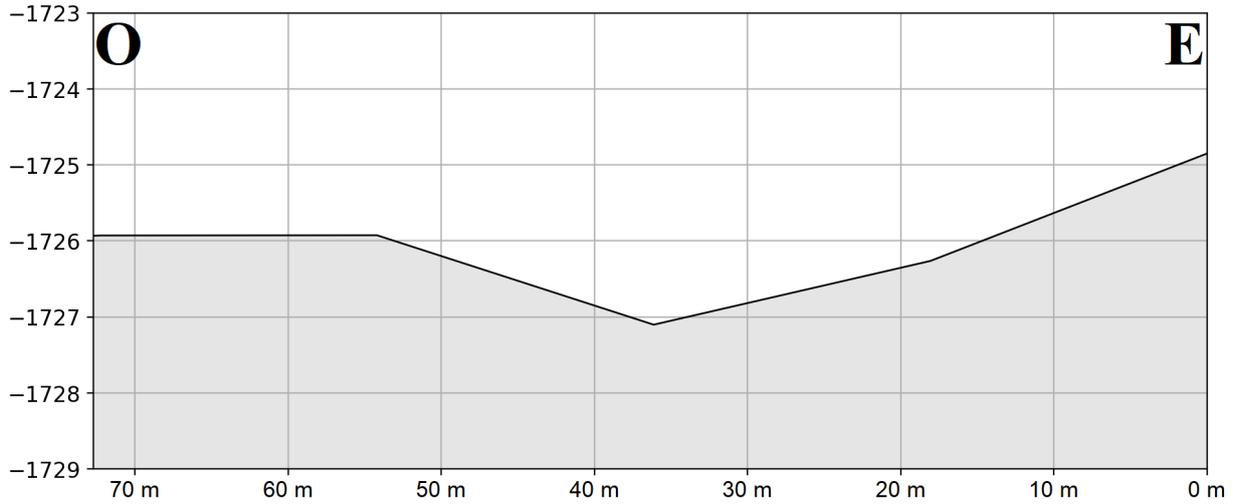
*Zona de Expulsión de Gas en la Plataforma Continental que Guarda una Relación con un Volcán de Fango*



**Figura 39***Perfil 4 Este-Oeste del Volcán de Fango en la Plataforma Continental***Figura 40***Zona de Expulsión de Gas en el Talud Continental que Guarda una Relación con un Pockmark*

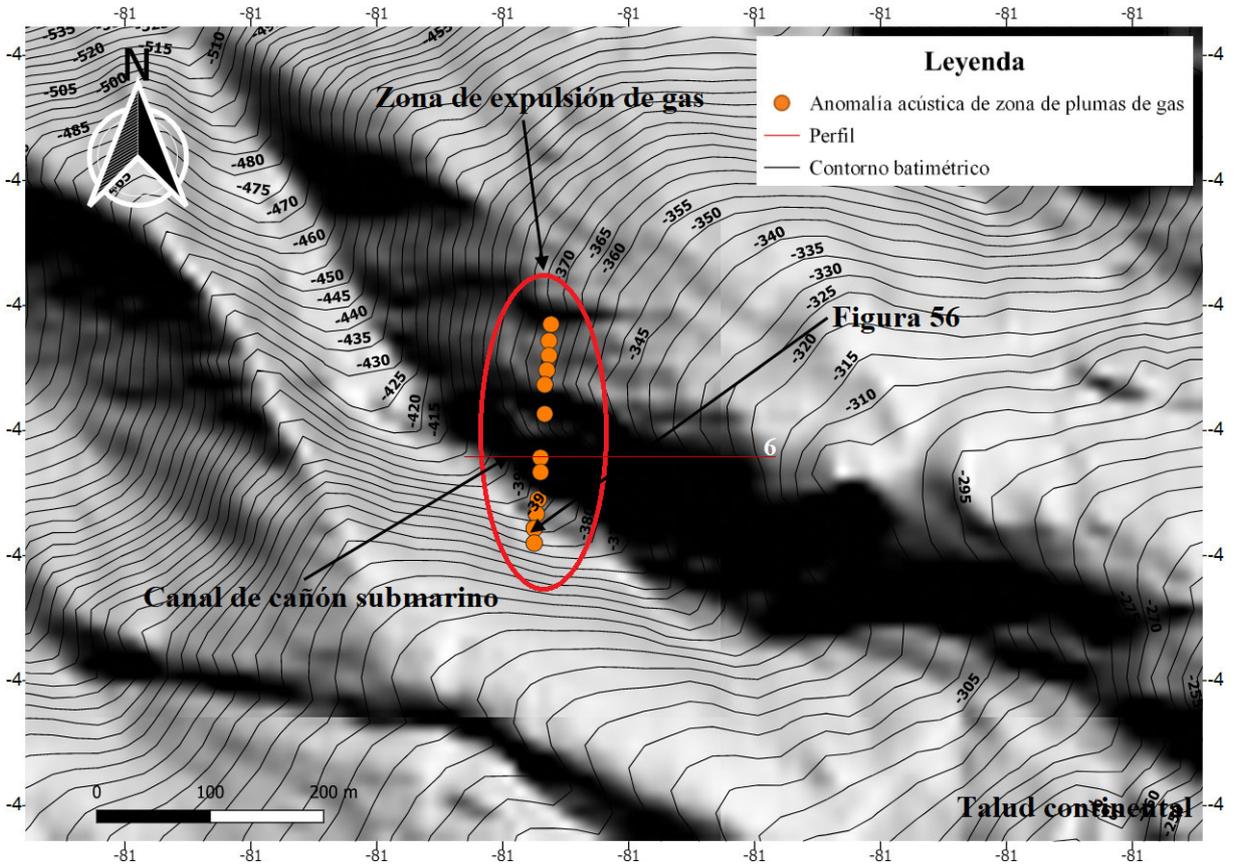
**Figura 41**

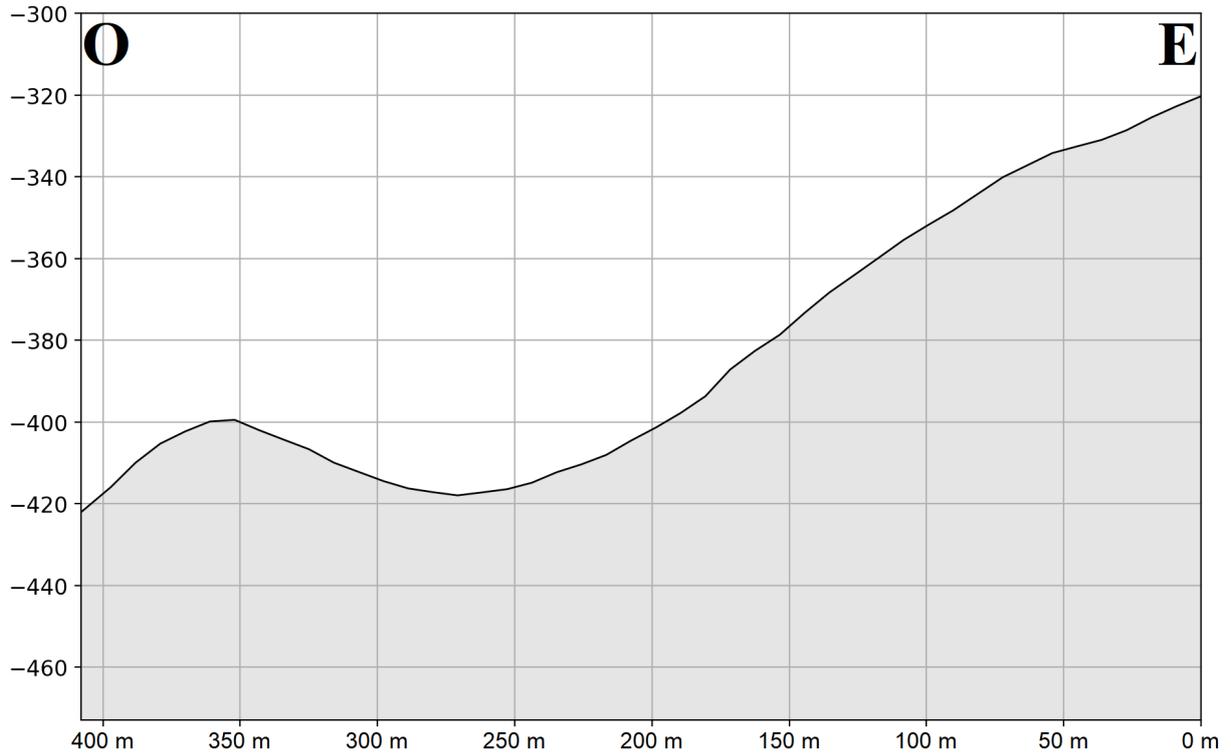
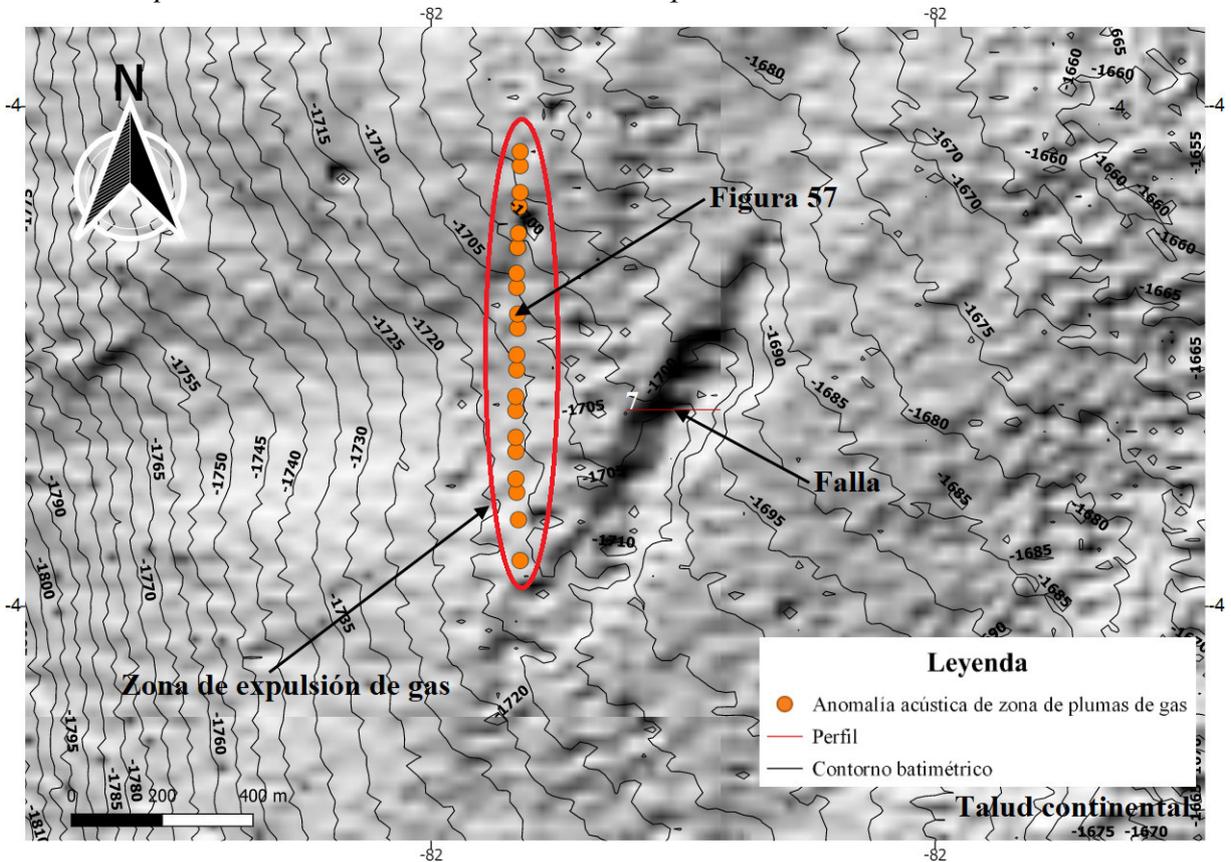
*Perfil 5 Este-Oeste del Pockmark en el Talud Continental*

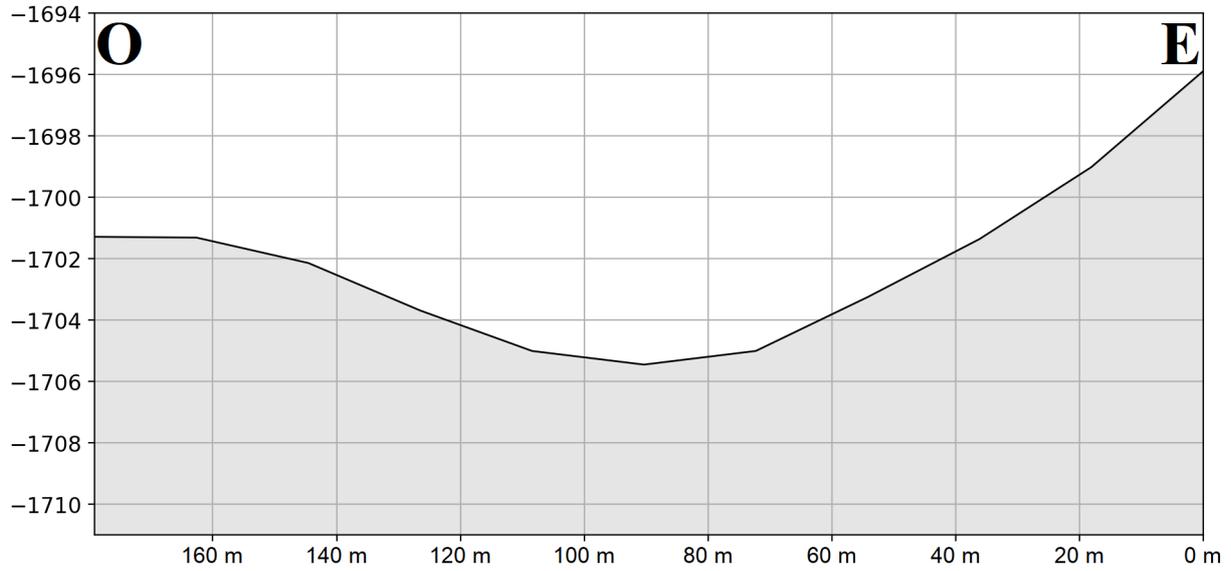
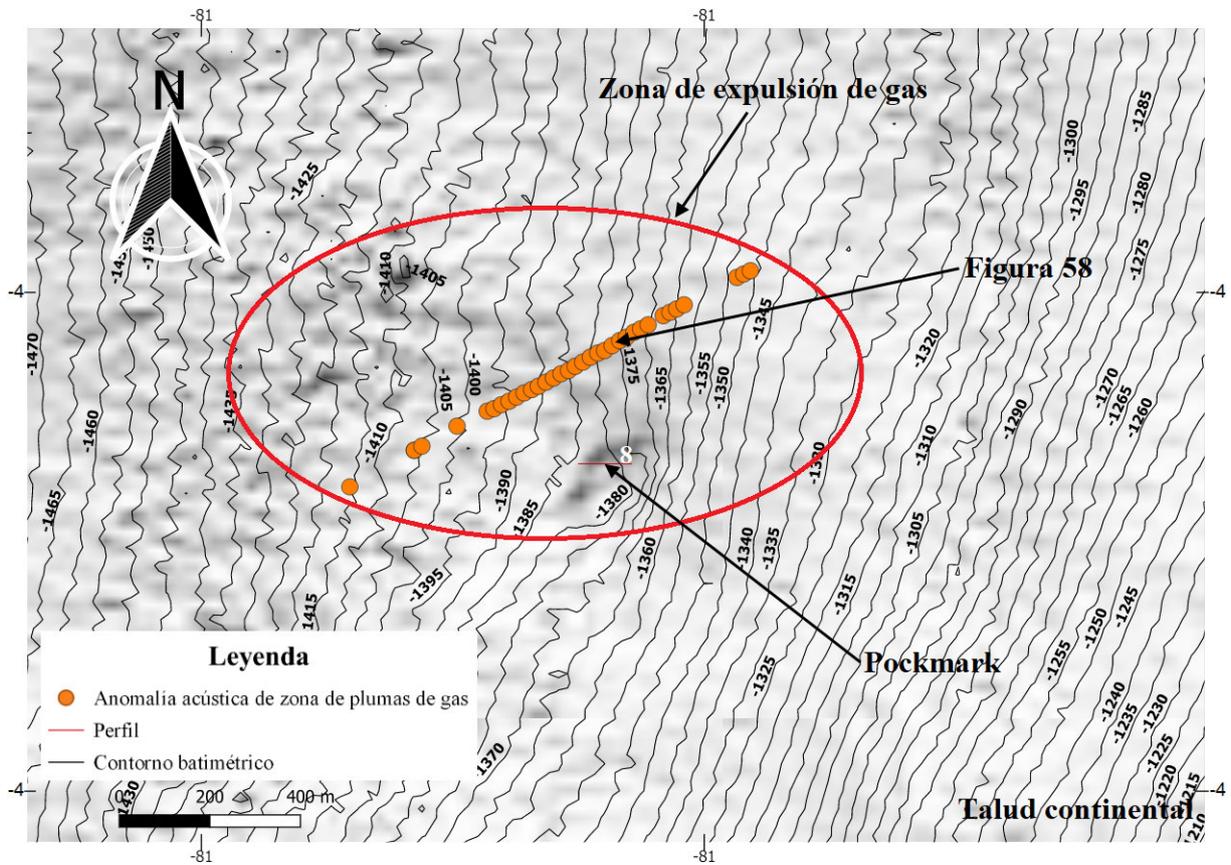


**Figura 42**

*Zona de Expulsión de Gas en el Talud Continental que Guarda una Relación con un Canal de Cañón Submarino*

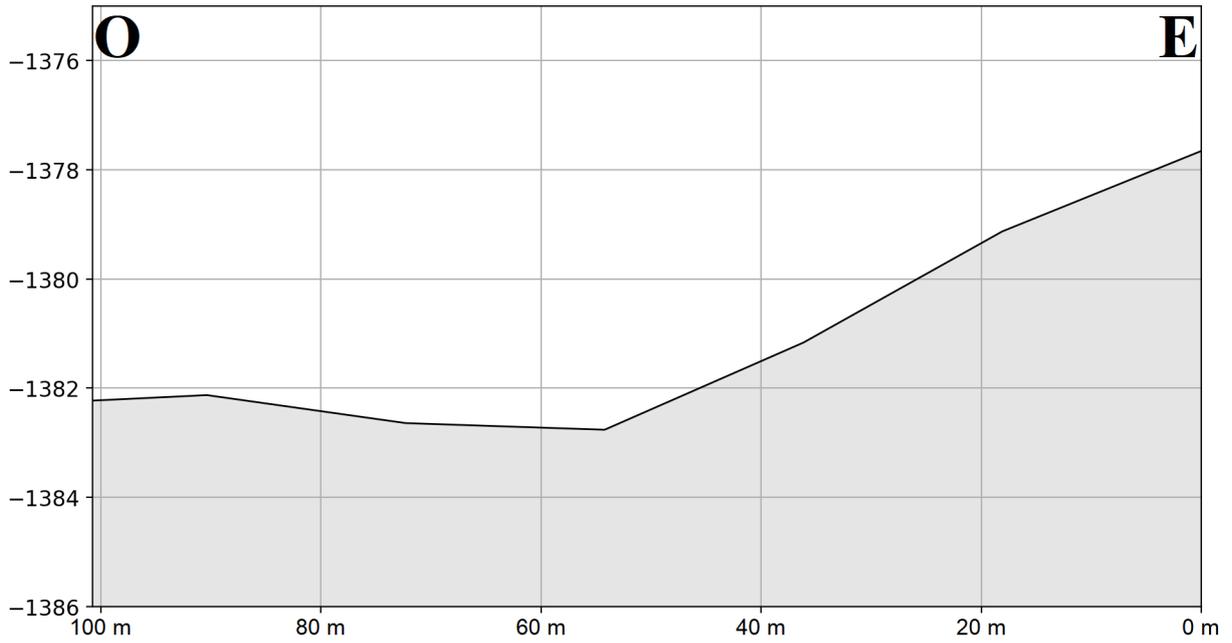


**Figura 43***Perfil 6 Este-Oeste del Canal del Cañón Submarino en el Talud Continental***Figura 44***Zona de Expulsión de Gas en el Talud Continental que Guarda una Relación con una Falla*

**Figura 45***Perfil 7 Este-Oeste de la Falla en el Talud Continental***Figura 46***Zona de Expulsión de Gas en el Talud Continental que Guarda una Relación con un Pockmark*

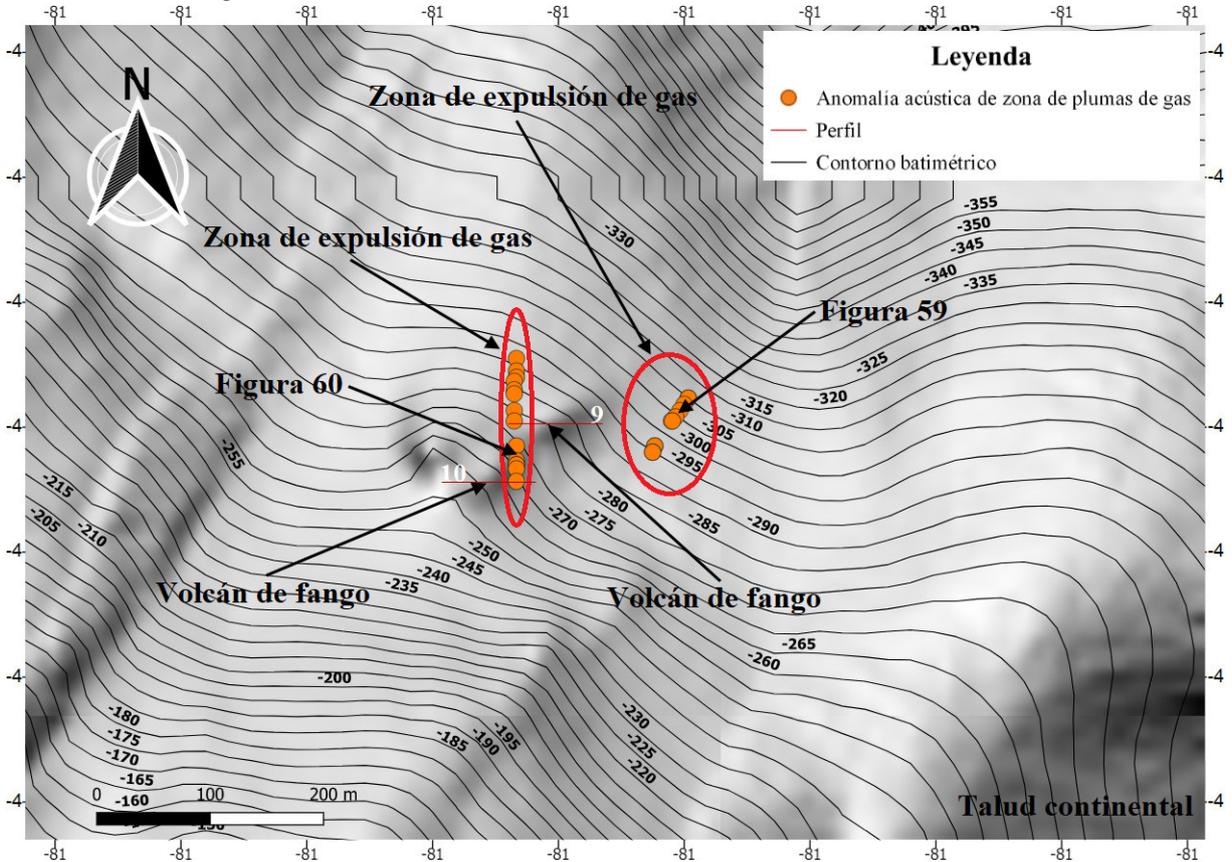
**Figura 47**

*Perfil 8 Este-Oeste del Pockmark en el Talud Continental*



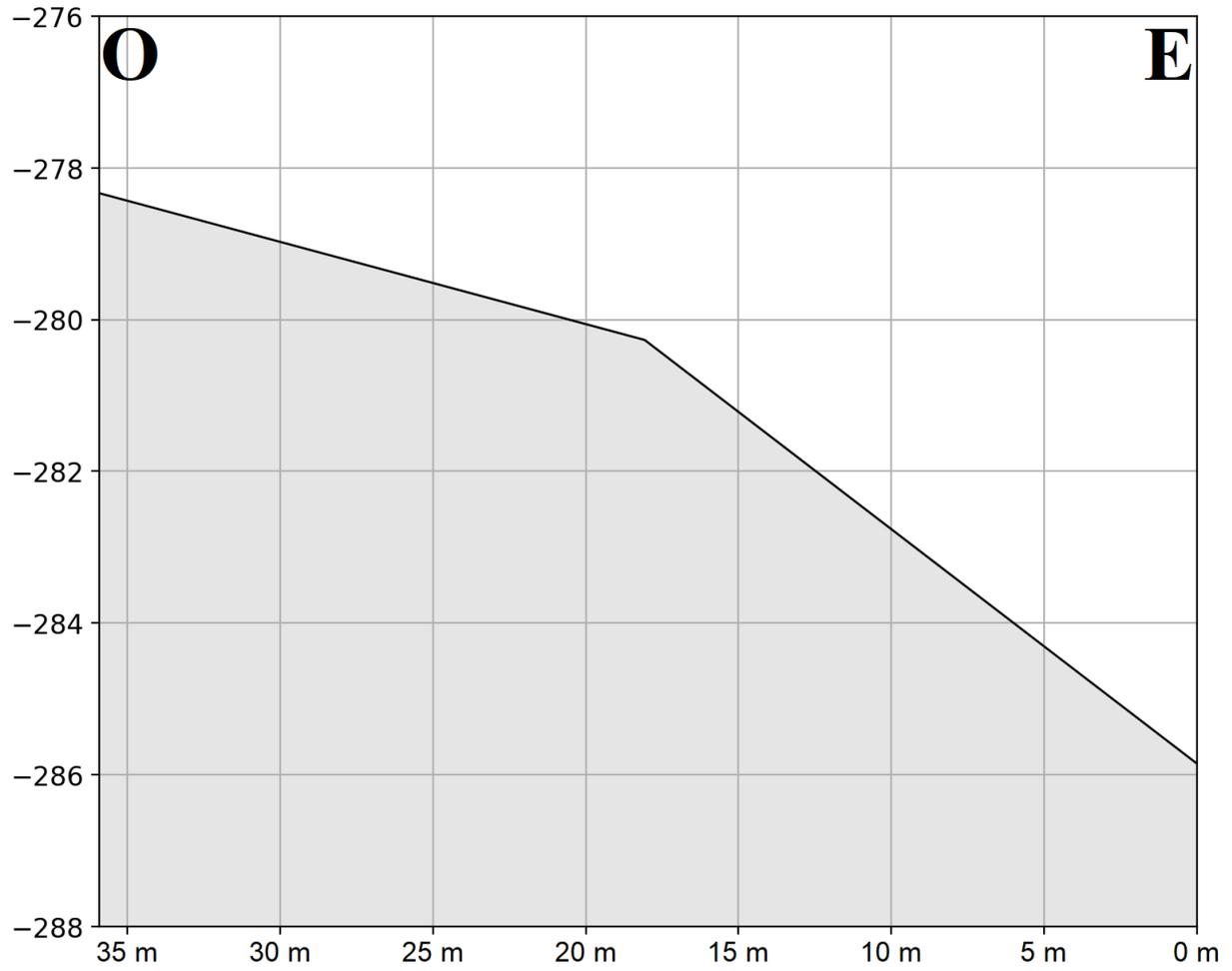
**Figura 48**

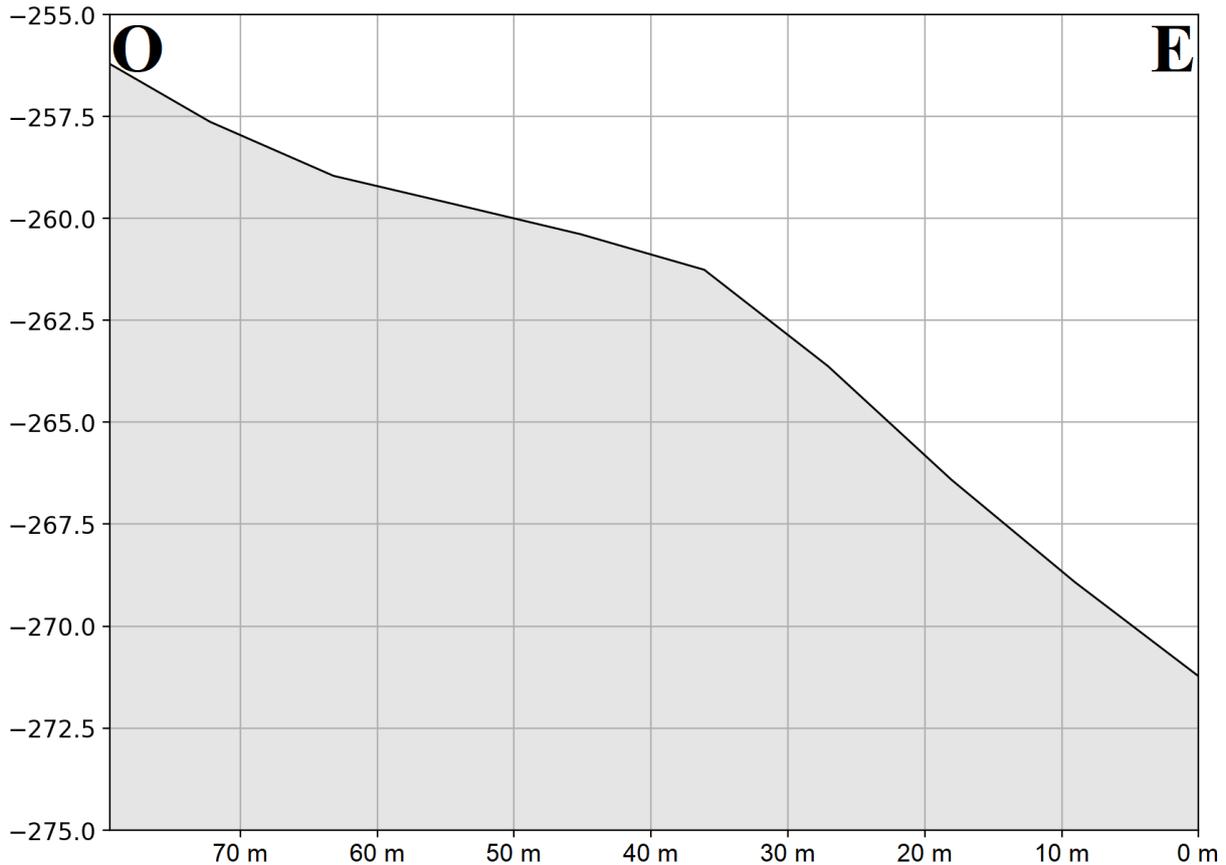
*Dos Zonas de Expulsión de Gas en el Talud Continental que Guardan una Relación con Volcanes de Fango*



**Figura 49**

*Perfil 9 Este-Oeste del Volcán de Fango en el Talud Continental*



**Figura 50***Perfil 10 Este-Oeste del Volcán de Fango en el Talud Continental*

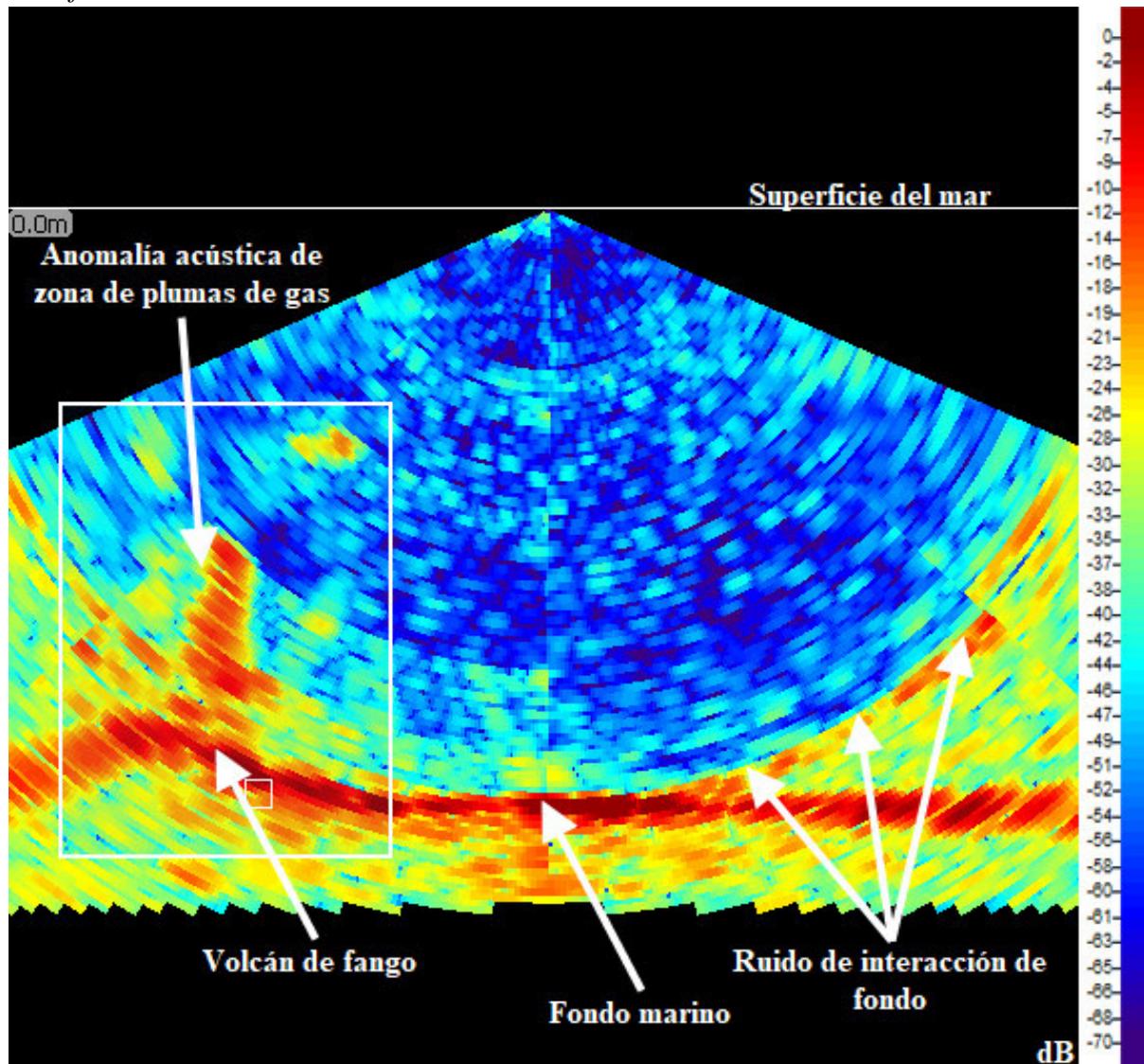
### 4.3 Anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural

Se detectaron 477 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural agrupadas en 66 zonas de expulsión de gas natural de acuerdo a su distribución espacial en el área de estudio (Figura 32).

A continuación se presentan 10 principales ecogramas digitales multihaz de anomalías acústicas de 10 zonas de expulsión de gas natural, las cuales cuatro zonas de expulsión se encuentran en la plataforma continental (Figura 51, 52, 53 y 54) y seis zonas de expulsión en el talud continental (Figura 55, 56, 57, 58, 59 y 60). Son los siguientes:

**Figura 51**

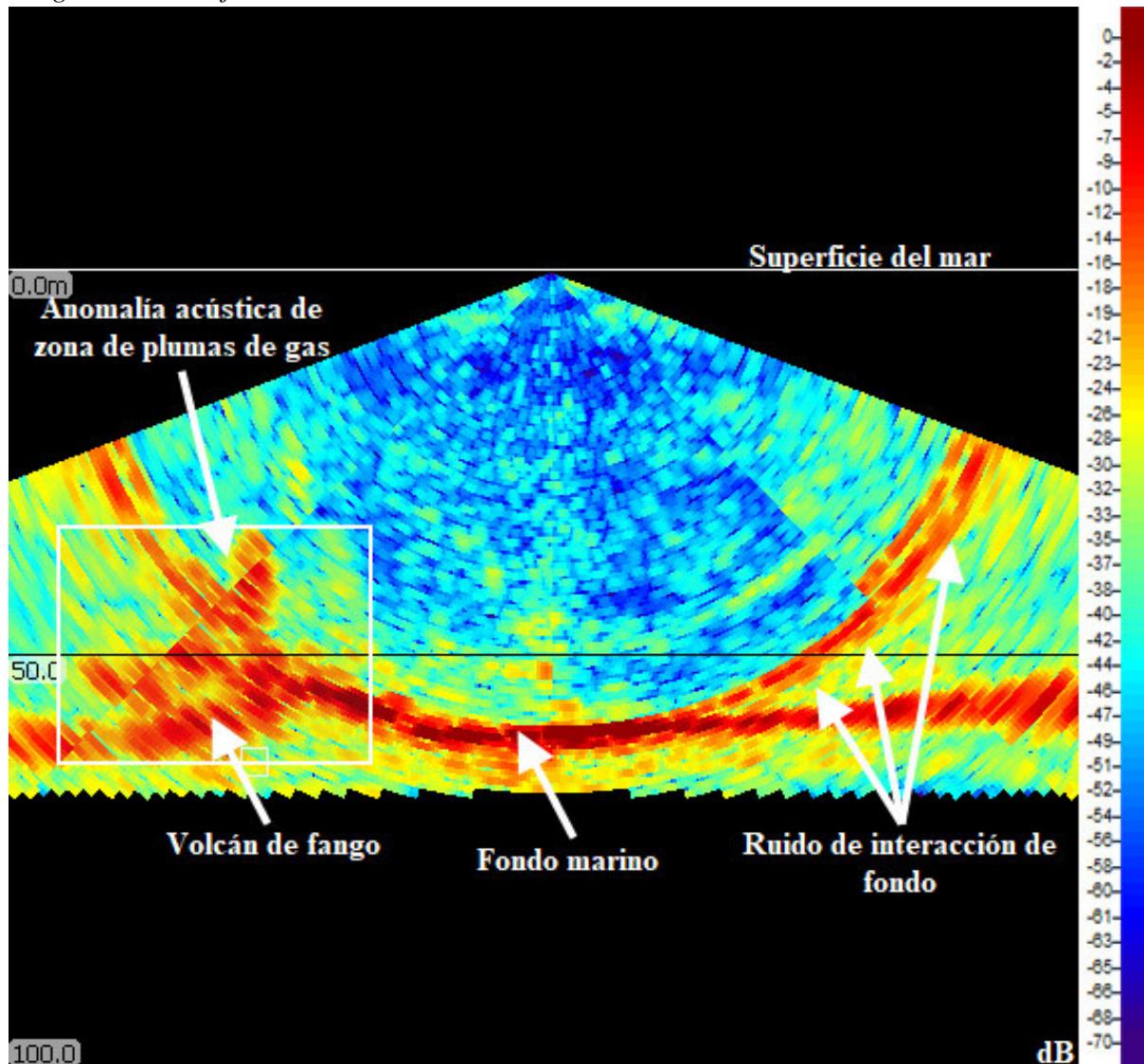
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas con una Estructura de Relieve Positiva en el Suelo Marino Pertenciente a un Volcán de Fango en la Plataforma Continental*



Las anomalías acústicas de zonas de plumas de gas localizadas varían entre los 5 m y 1325 m de altura con profundidades desde 26 m hasta 1750 m de columna de agua distribuidas en la plataforma continental y talud superior del área de estudio. En la Figura 51 se observa una asociación particular de un volcán de fango con una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural. La anomalía acústica de zona de plumas de gas natural se encuentra a ~60 m de profundidad de columna de agua en la plataforma continental, con una altura de ~25 m y presenta un rango de decibeles que varía entre -33 dB a -09 dB.

**Figura 52**

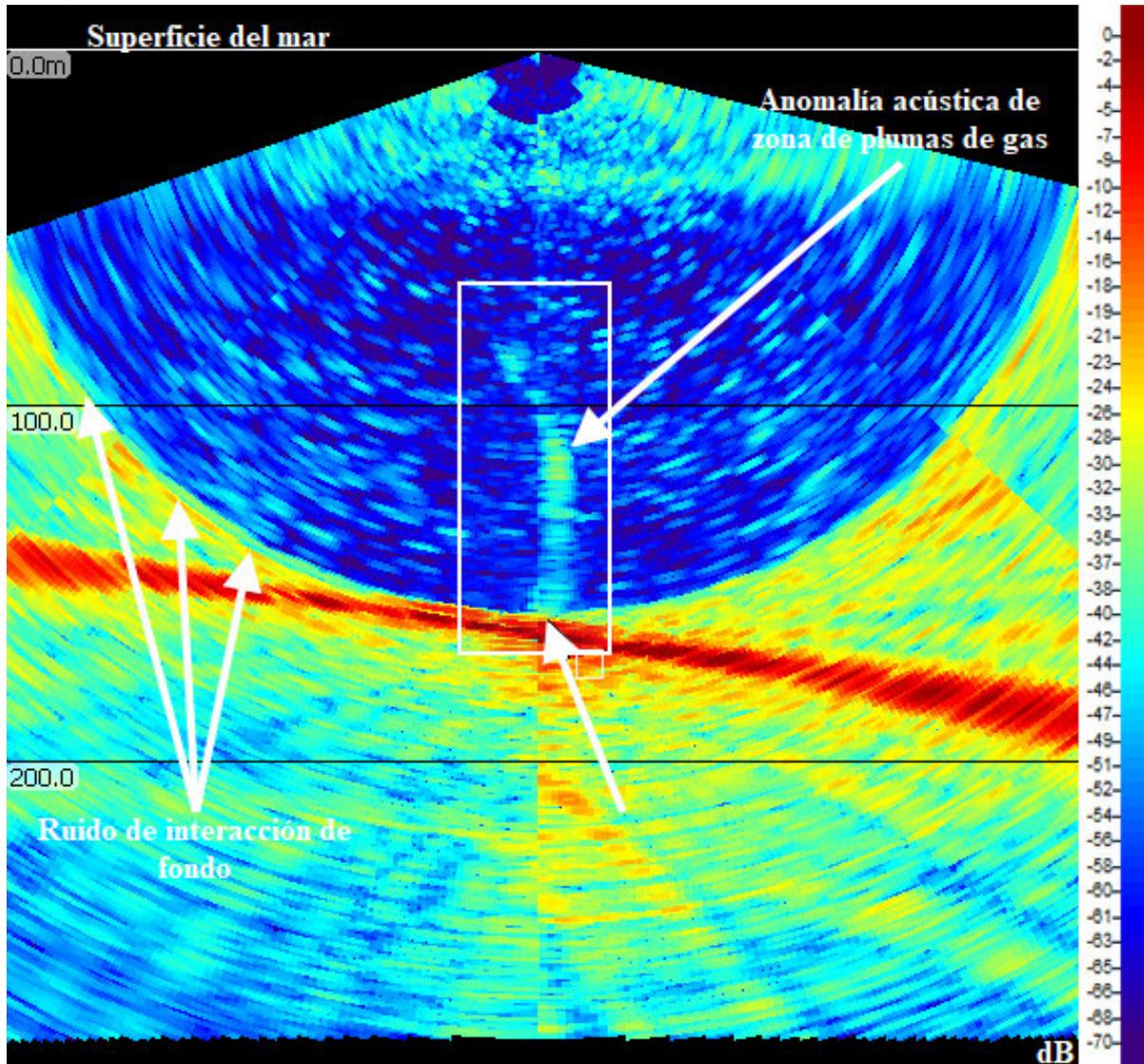
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas Natural con una Estructura de Relieve Positiva en el Suelo Marino Pertenciente a un Volcán de Fango en la Plataforma Continental*



Al igual que la Figura 51, la Figura 52 muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural asociada a un volcán de fango. Tiene una profundidad de ~60 m de columna de agua y una altura de ~25 m en la plataforma continental. Además, su rango de decibeles varía entre -22 dB a -09 dB.

**Figura 53**

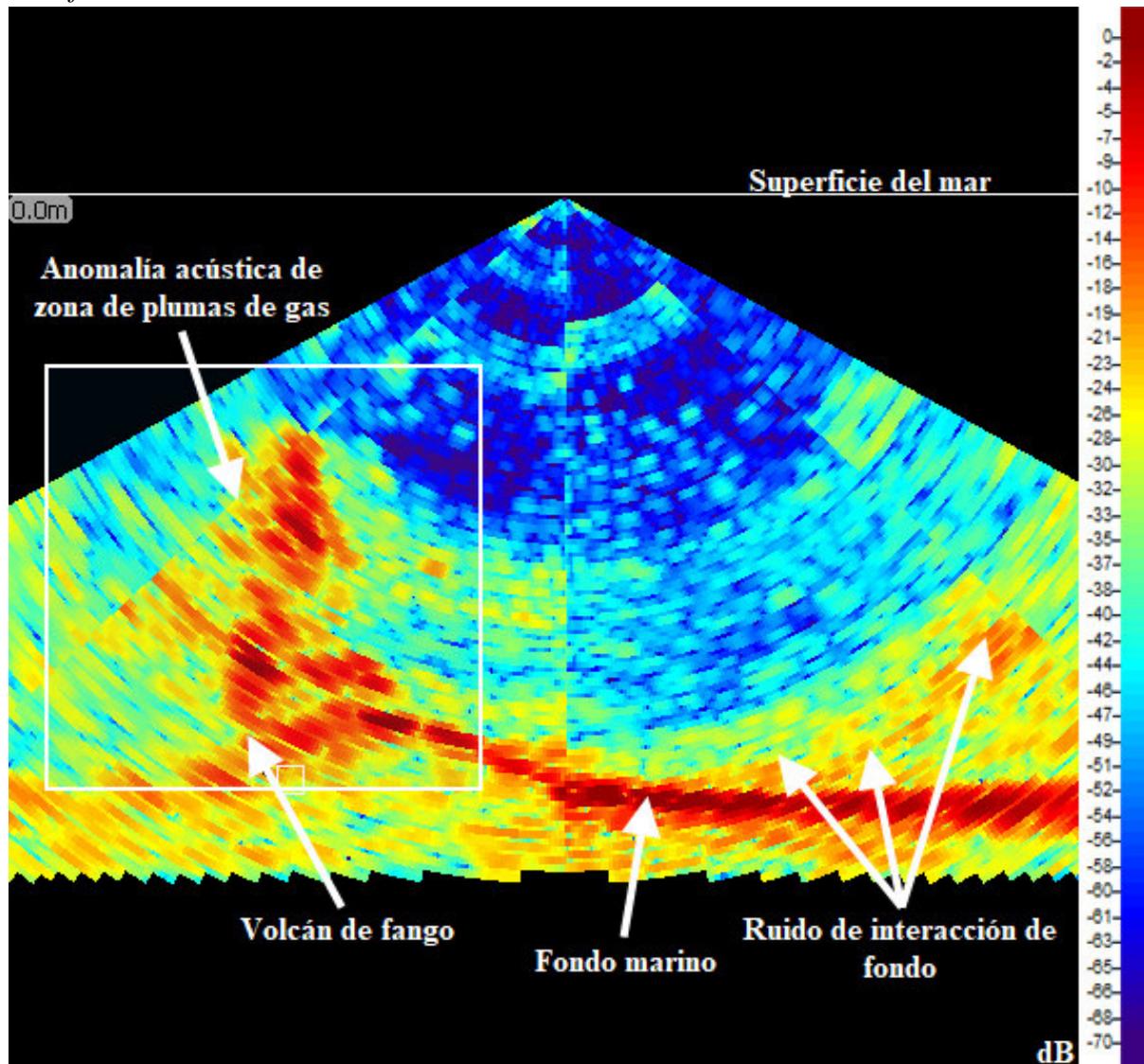
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas en la Plataforma Continental*



La Figura 53 muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural a una profundidad de columna de agua de ~160 m en la plataforma continental. Tiene una altura de ~70 m y presenta un rango de decibeles que varía entre -50 dB a -30 dB.

**Figura 54**

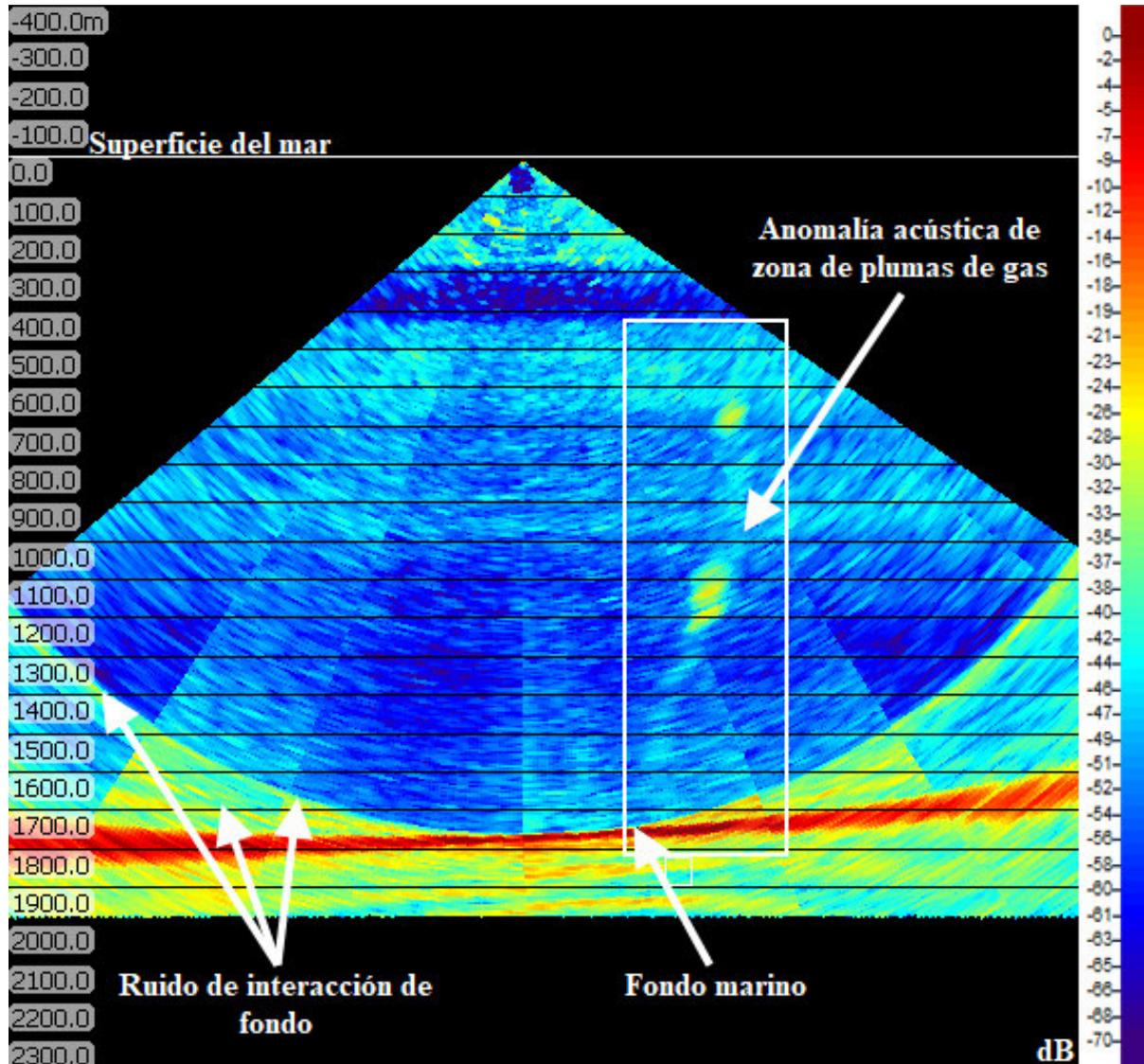
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas con una Estructura de Relieve Positiva en el Suelo Marino Pertenciente a un Volcán de Fango en la Plataforma Continental*



La Figura 54 muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural asociada a un volcán de fango. Dicha anomalía acústica se encuentra a ~60 m de profundidad de columna de agua en la plataforma continental. Además, una altura de ~35 m y presenta un rango de decibeles que varía entre -21 dB a -13 dB.

**Figura 55**

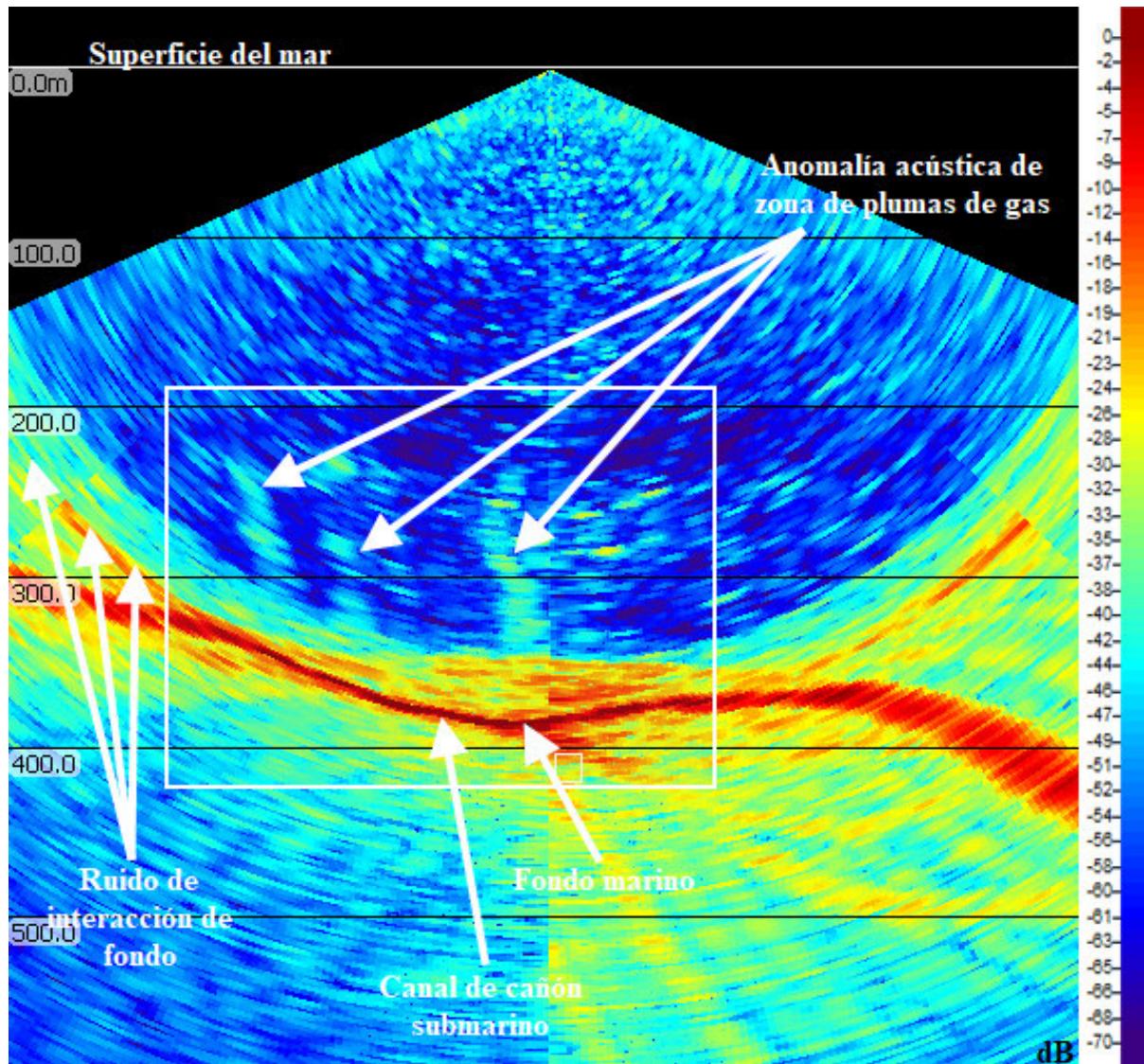
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas en el Talud Continental*



La Figura 55 muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural a ~1740 m de profundidad de columna de agua en el talud continental. Además, una altura de ~1300 m y presenta un rango de decibeles que varía entre -53 dB a -29 dB.

**Figura 56**

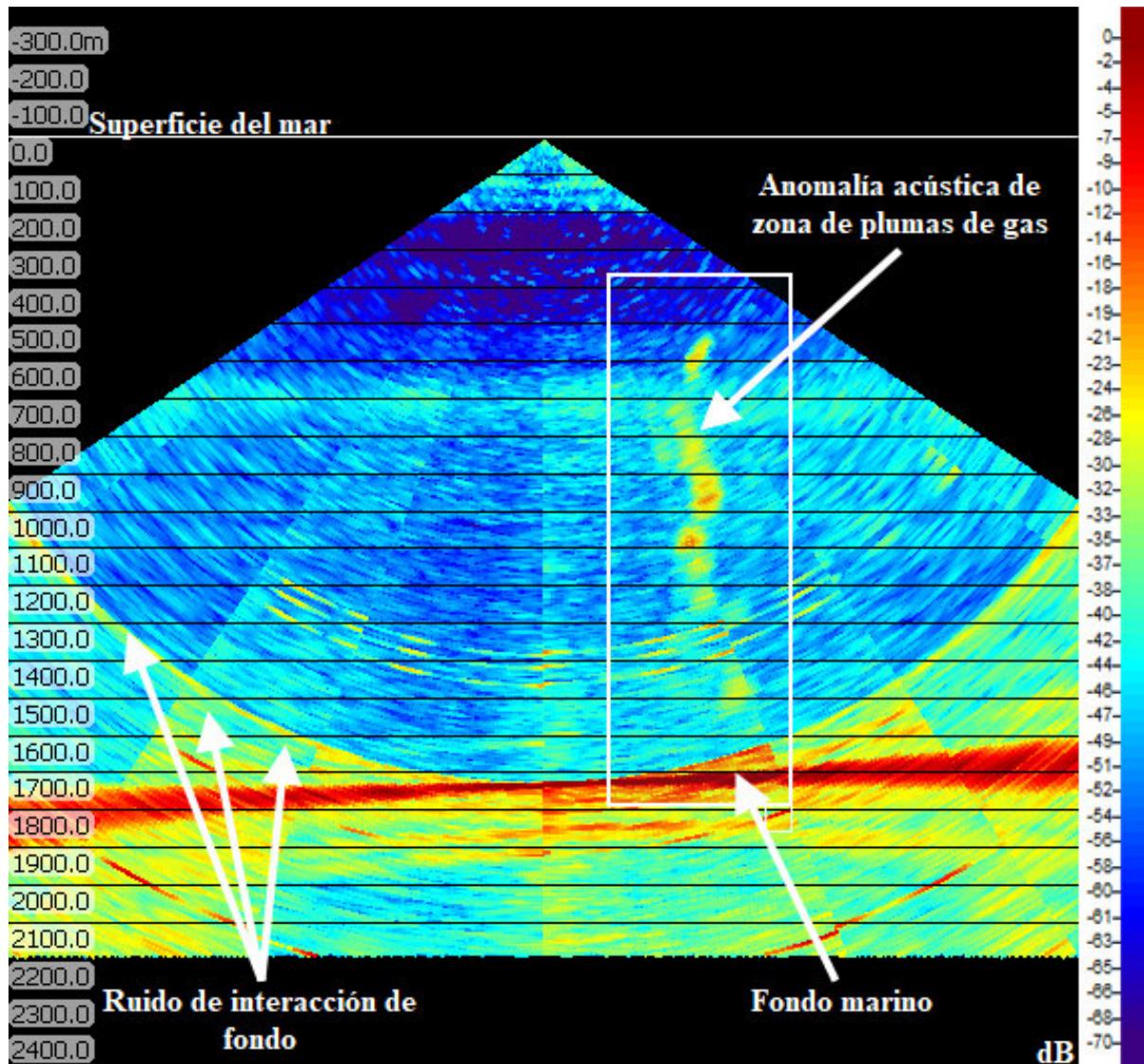
*Ecograma Multihaz que Muestra Tres Anomalías Acústicas de Zona de Plumas de Gas con una Estructura de Relieve Negativa en el Suelo Marino que Pertenece a un Canal de Cañón Submarino en el Talud Continental*



La Figura 56 muestra tres anomalías acústicas de zona de plumas de gas natural asociadas a un canal de cañón submarino. Tienen una profundidad de columna de agua (de izquierda a derecha) de ~345 m, ~365 m y ~385 m respectivamente en el talud continental. Además, tienen alturas (de izquierda a derecha) de ~120 m, ~145 m y ~155 m respectivamente y presentan un rango de decibeles que varían entre -51 dB a -31 dB.

**Figura 57**

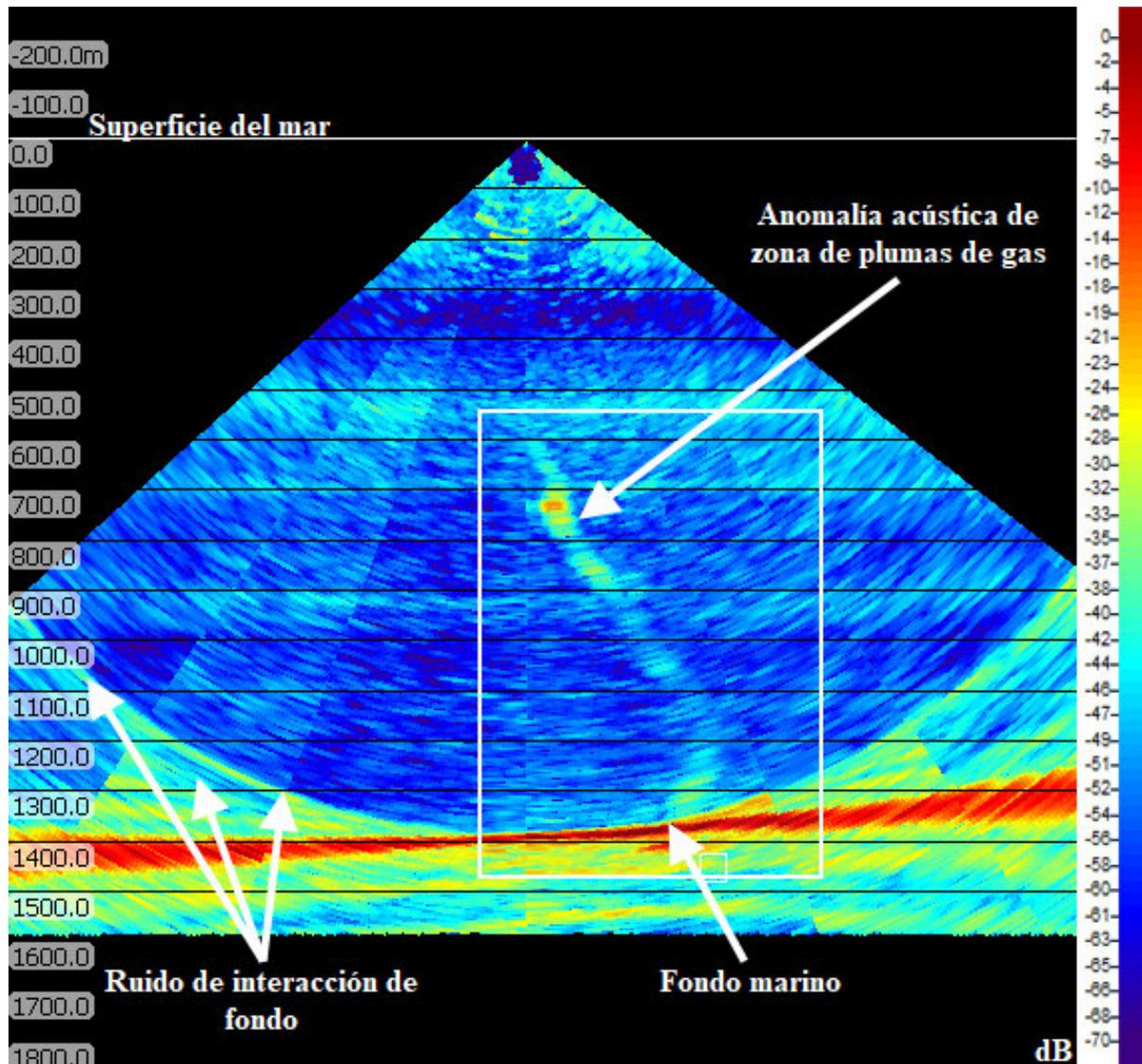
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas en el Talud Continental*



La Figura 57 muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural. Tiene una profundidad de columna de agua de  $\sim 1700$  m en el talud continental. Además, tiene una altura de  $\sim 1190$  m y presentan un rango de decibeles que varían entre -58 dB a -46 dB.

**Figura 58**

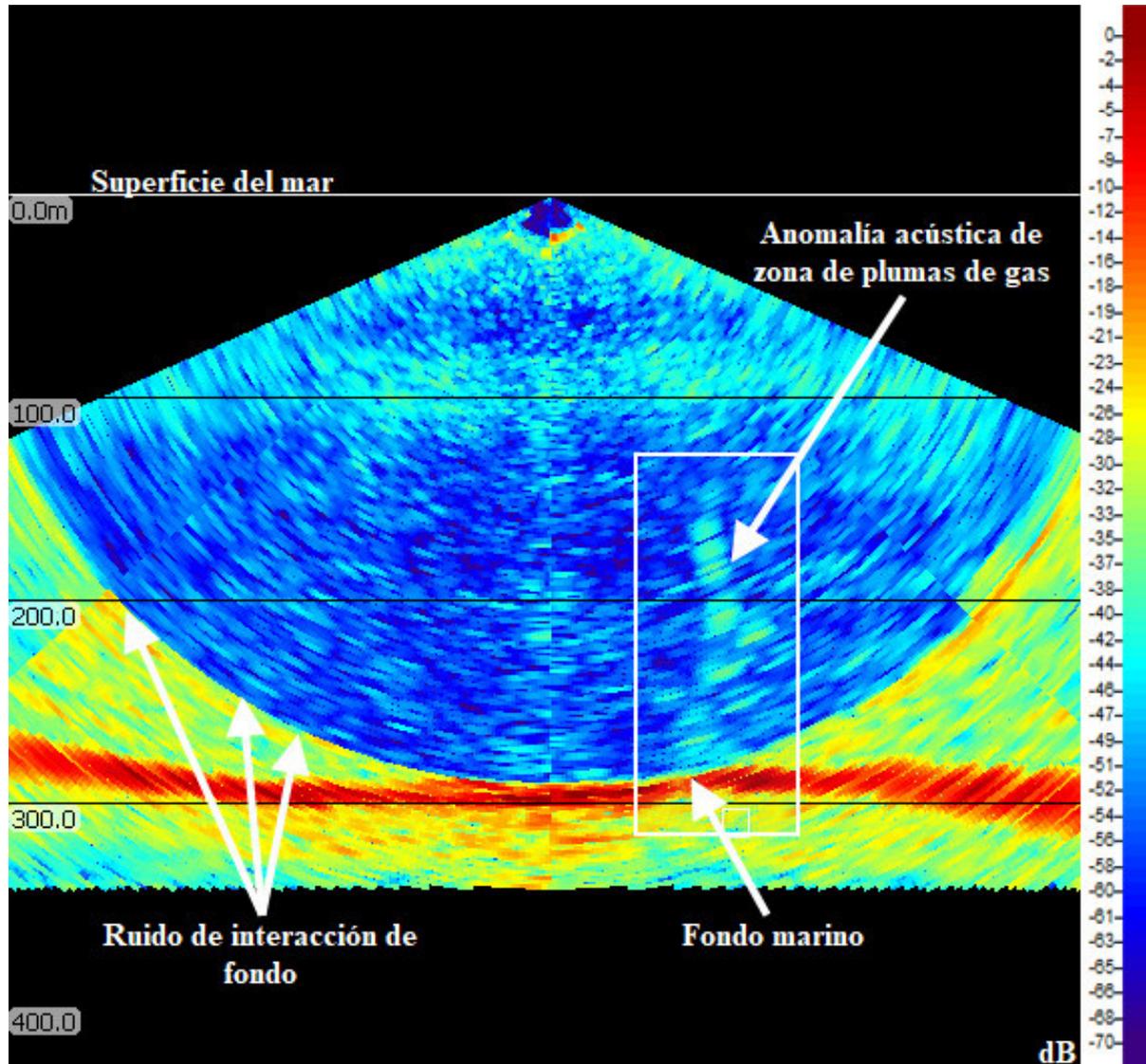
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas en el Talud Continental*



La Figura 58 muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural. Tiene una profundidad de columna de agua de  $\sim 1365$  m en el talud continental. Además, tiene una altura de  $\sim 770$  m y presentan un rango de decibeles que varían entre -46 dB a -32 dB.

**Figura 59**

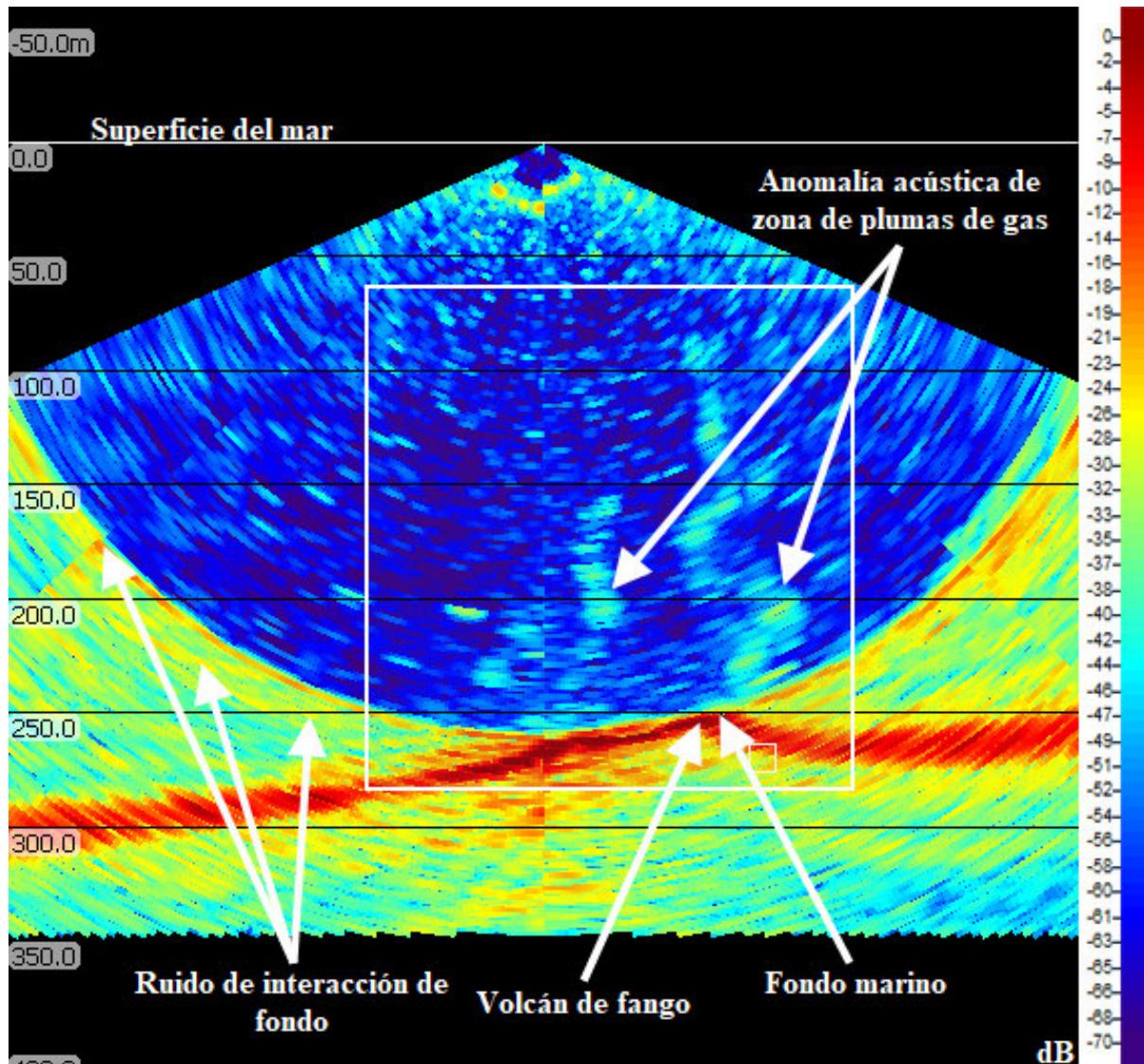
*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas con una Estructura de Relieve Positiva en el Suelo Marino en el Talud Continental*



La Figura 59 muestra una anomalía acústica de zona de plumas de gas natural. Tiene una profundidad de columna de agua de ~290 m en el talud continental. Además, tiene una altura de ~150 m y presentan un rango de decibeles que varían entre -55 dB a -39 dB.

**Figura 60**

*Ecograma Multihaz que Muestra una Anomalia Acústica de Zona de Plumas de Gas con una Estructura de Relieve Positiva en el Suelo Marino que Representa un Volcán de Fango en el Talud Continental*



La Figura 60 muestra dos anomalías acústicas de zona de plumas de gas natural asociadas a un volcán de fango. Tienen una profundidad de columna de agua (de izquierda a derecha) de  $\sim 265$  m y  $\sim 250$  m respectivamente en el talud continental. Además, tienen alturas (de izquierda a derecha) de  $\sim 110$  m y  $\sim 170$  m respectivamente y presentan un rango de decibelios que varían entre  $-50$  dB a  $-36$  dB.

La reflectividad de las anomalías acústicas de zonas de plumas de gas en zonas de plataforma continental es media a baja ( $-60$  dB a  $-30$  dB).

En las zonas del talud continental las anomalías acústicas presentan una reflectividad

media a alta (-30 dB a -10 dB).

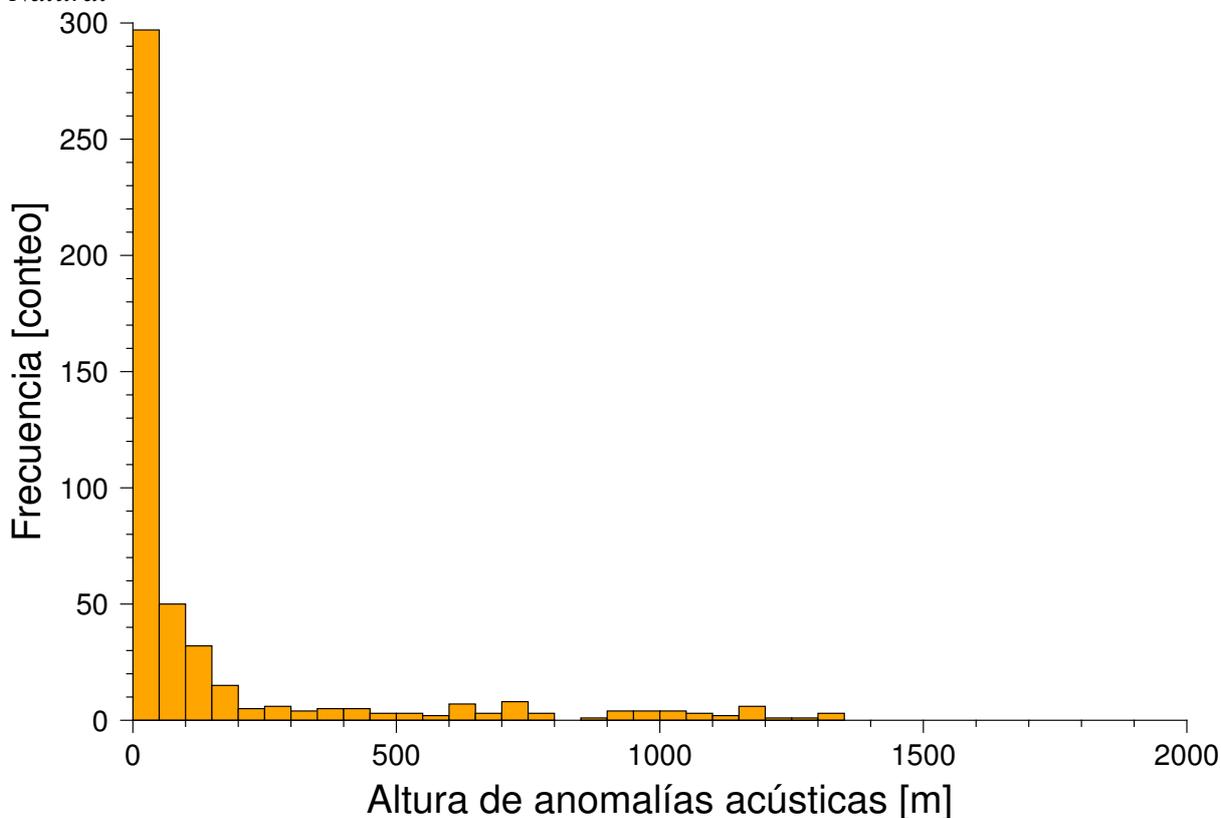
La tabla de base de datos y el número completo de ecogramas de tecnología multi-haz de las 477 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas detectadas en en esta tesis se encuentran en el GEOCATMIN, el cual es un sistema de información geológico y catastral minero desarrollado por INGEMMET con lo último de la tecnología en GIS (*Geographical Information System, Sistema de Información Geográfica*), que tiene como objetivo brindar información georreferenciada; contribuyendo a la promoción de la inversión minera, la prevención de desastres, el ordenamiento territorial y el desarrollo sostenible del Perú.

#### 4.4 Análisis geoestadístico de distribución espacial de zonas de expulsión de gas natural

Mediante representaciones gráficas de histogramas de frecuencias se hizo el análisis geoestadístico de la distribución espacial de zonas de expulsión de gas natural en el área de la Carta Náutica Recalada DIHIDRONAV n.º 112, las cuales se presentan a continuación:

**Figura 61**

*Histograma de Frecuencias de Altura de Anomalías Acústicas de Zonas de Plumbras de Gas Natural*

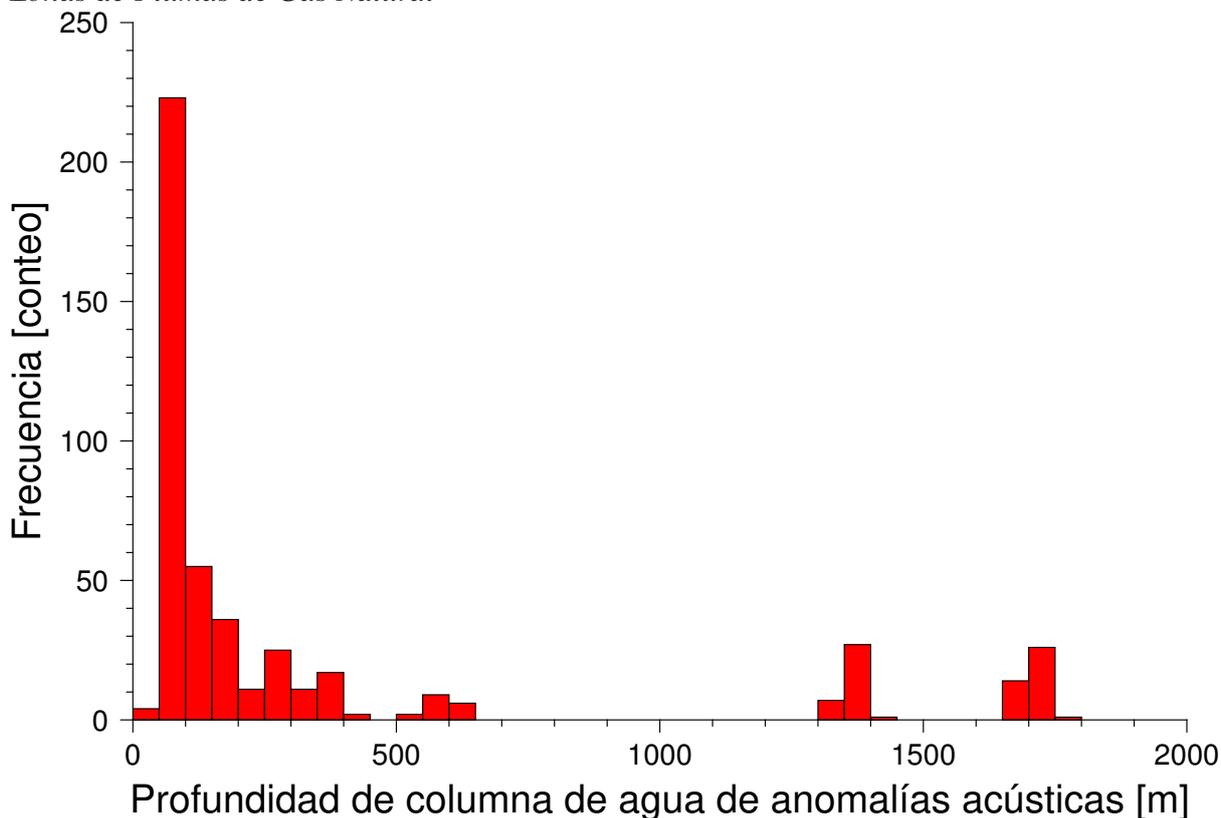


A partir del histograma de frecuencias de alturas de anomalías acústicas de zonas de

plumas de gas natural (Figura 61) se observa que, las anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural más frecuentes son de tamaño menor o igual a 50 m de alto (i.e., *la moda principal se encuentra en el intervalo de 0 m a 50 m de altura de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural*). Además, existe una predominancia de anomalías acústicas con una altura menor o igual a 200 m (i.e., *alturas menores con una altura mínima de 5 m*) que equivale al 83 % del total de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural identificadas. Mientras que, con una menor proporción, se observa la presencia de anomalías acústicas con una altura mayor a 200 m (i.e., *alturas mayores con una altura máxima de 1325 m*) que equivale al 17 % restante del total de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural.

### Figura 62

*Histograma de Frecuencias de Profundidad de Columna de Agua de Anomalías Acústicas de Zonas de Plumadas de Gas Natural*

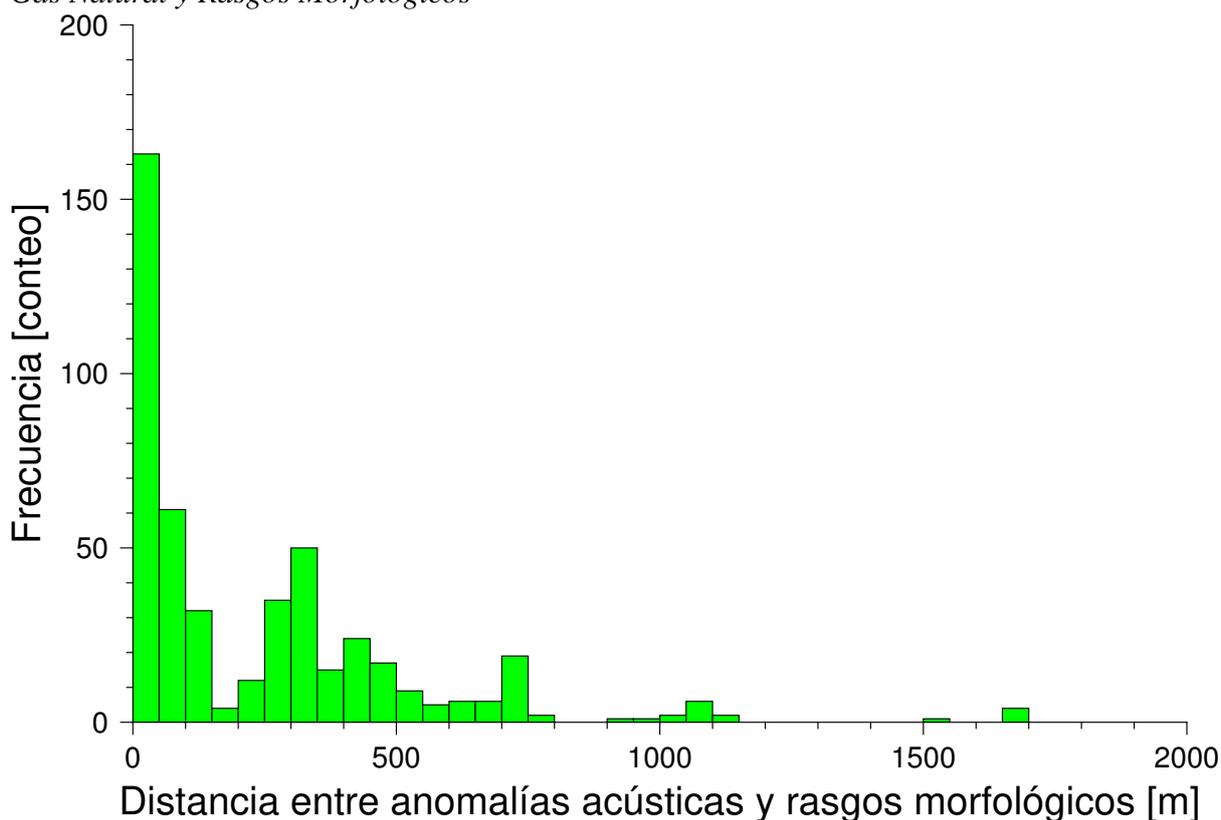


El histograma de frecuencias de profundidad de columna de agua de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural (Figura 62) muestra que, en la plataforma continental, entre los 50 m y 100 m de profundidad de columna de agua (i.e., *la moda principal se encuentra en el intervalo de 50 m a 100 m de profundidad de columna de agua de anomalías acústicas*), existe una mayor acumulación de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas

natural, además, se observa una predominancia de ocurrencias de gas natural hasta 650 m de profundidad de columna de agua. Estas anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural equivalen al 96 % del total de zonas de expulsión de gas natural identificadas (i.e., *66 zonas de expulsión de gas natural*) ubicadas en la plataforma continental y parte inicial del talud superior. Por otro lado, entre 650 m y 1300 m de profundidad de columna de agua, en el talud superior, existe ausencia de expulsión de gas natural; sin embargo, entre 1300 m y 1750 m de profundidad de columna de agua, se observa que nuevamente hay actividad de surgencias de gas natural, aunque con una menor predominancia. Estas ocurrencias de gas natural en el talud superior, equivalen a solo el 4 % del total de zonas de expulsión de gas natural identificadas.

### Figura 63

*Histograma de Frecuencias de Distancia entre Anomalías Acústicas de Zonas de Plumas de Gas Natural y Rasgos Morfológicos*



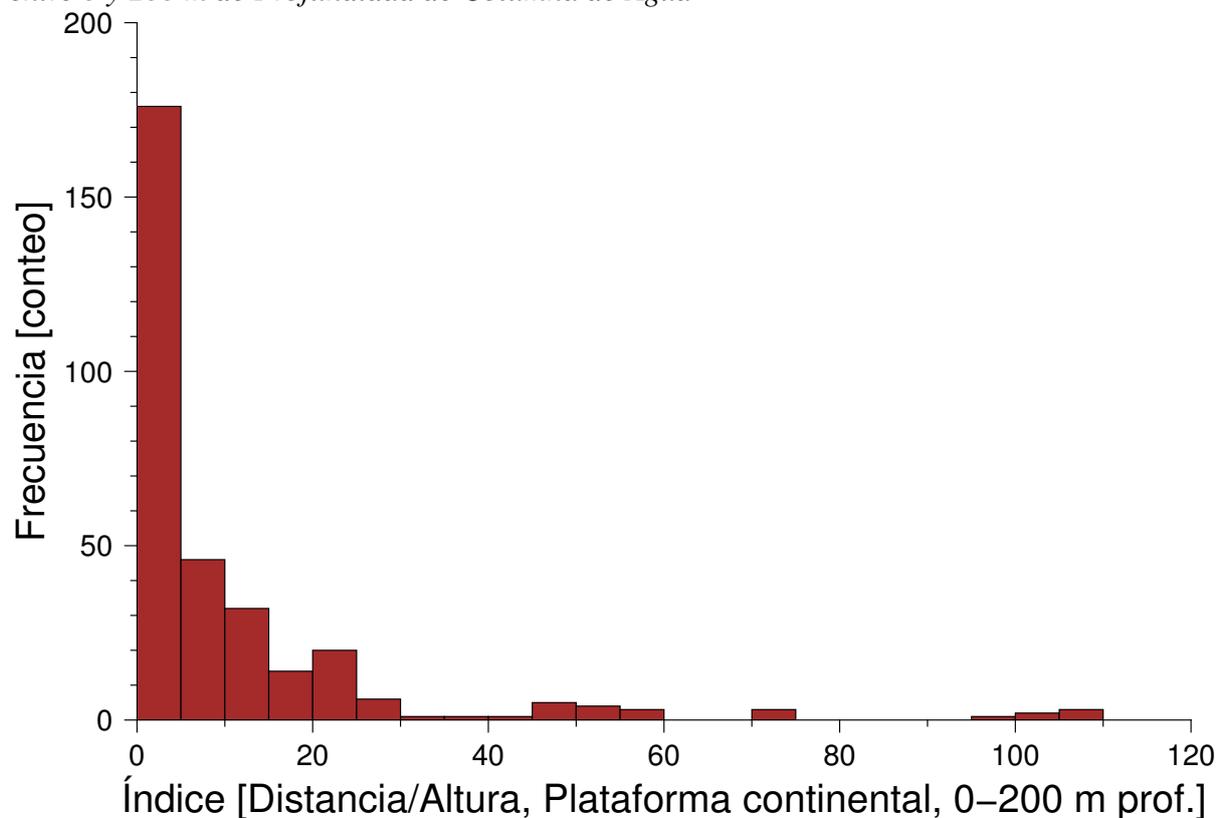
El histograma de frecuencias de distancia entre anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos (Figura 63) muestra que, la mayor densidad de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural con distancias menores a los rasgos morfológicos tienen distancias de 0 m a 50 m (i.e., *la moda principal se encuentra en el intervalo*

de 0 a 50 m de distancia entre anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural); además, se observa una predominancia de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos que tienen distancias menores entre sí. Estas distancias tienen un valor menor o igual a 750 m (i.e., la distancia mínima es de 0 m), las cuales representan la mayor proporción equivalente al 96 % del total de distancias. Por otro lado, existe una predominancia menor de anomalías acústicas y rasgos morfológicos que tienen una distancia entre sí mayor a 750 m (i.e., la distancia máxima es de 1700 m), las cuales representan la menor proporción equivalente al 4 % restante del total de distancias.

Se estableció un índice (distancia/altura) de las 477 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural de acuerdo a su distribución espacial para estudiar la relación de plumas de gas con rasgos morfológicos. Los histogramas de frecuencias de índice (Figura 64, 65, 66 y 67) explican que, la división entre la distancia y la altura muestra un índice menor cuando la distancia entre la anomalía acústica de zona de plumas de gas natural y el rasgo morfológico es más cercana a cero y posee una altura mayor, es decir, tiene una relación directa; asimismo, el índice es mayor cuando la distancia entre la anomalía acústica de zona de plumas de gas natural y el rasgo morfológico es más lejana de cero y cuenta con una altura menor, dicho de otra manera, tiene una relación indirecta. Para un análisis detallado, el índice global (Figura 67) (i.e., *equivale al índice total establecido (distancia/altura) de las 477 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural*) se dividió en tres secciones: sección uno (i.e., *318 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural distribuidas en áreas de plataforma continental, 0-200 m de profundidad de columna de agua*) (Figura 64), sección dos (i.e., *83 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural distribuidas en áreas de talud superior, 200-650 m de profundidad de columna de agua*) (Figura 65) y sección tres (i.e., *76 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural distribuidas en áreas de talud superior, 650-1750 m de profundidad de columna de agua*) (Figura 66) cuyos histogramas de frecuencias de índice se muestran a continuación:

**Figura 64**

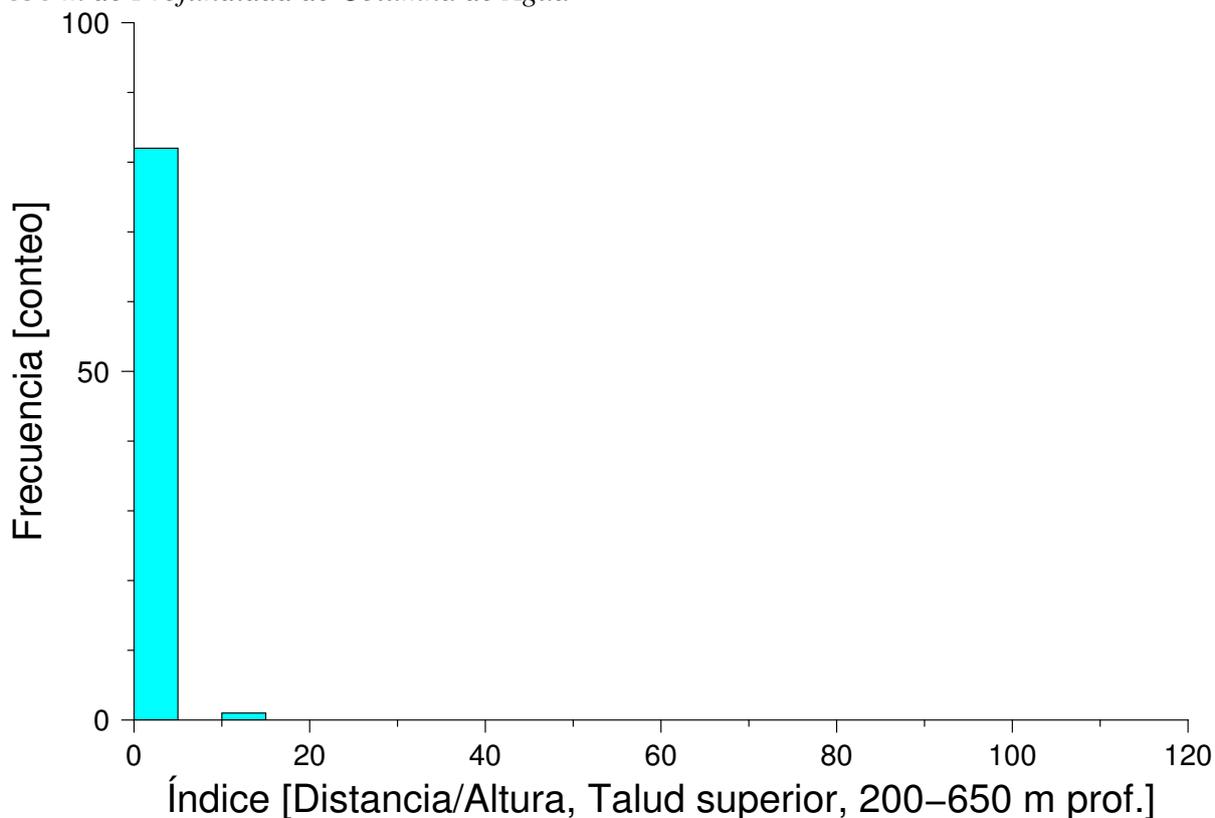
*Histograma de Frecuencias de Índice (Distancia/Altura) de Áreas de Plataforma Continental, entre 0 y 200 m de Profundidad de Columna de Agua*



El histograma de frecuencias de índice de la sección uno (Figura 64) indica que, la mayor acumulación se encuentra próxima a cero (i.e., *la moda principal se encuentra en el intervalo de 0 a 5 con un índice mínimo de 0 y un índice máximo de 5*). Esta acumulación representa anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos que tienen distancias menores entre sí y las alturas de dichas anomalías acústicas son mayores; además, equivale al 56 % del total observado en áreas de plataforma continental (0-200 m de profundidad de columna de agua) que cumplen con una relación directa. Por el contrario, se observa una menor predominancia que se encuentra lejana de cero (i.e., *índices que se encuentran entre los intervalos de 5 a 60, 75 a 80 y 95 a 110 con un índice mínimo de 5.1 y un índice máximo de 106.2*). Esta menor acumulación representa anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos que tienen distancias mayores entre sí y las alturas de dichas anomalías acústicas son menores; asimismo, equivale al 44 % del total observado en áreas de plataforma con una relación indirecta.

**Figura 65**

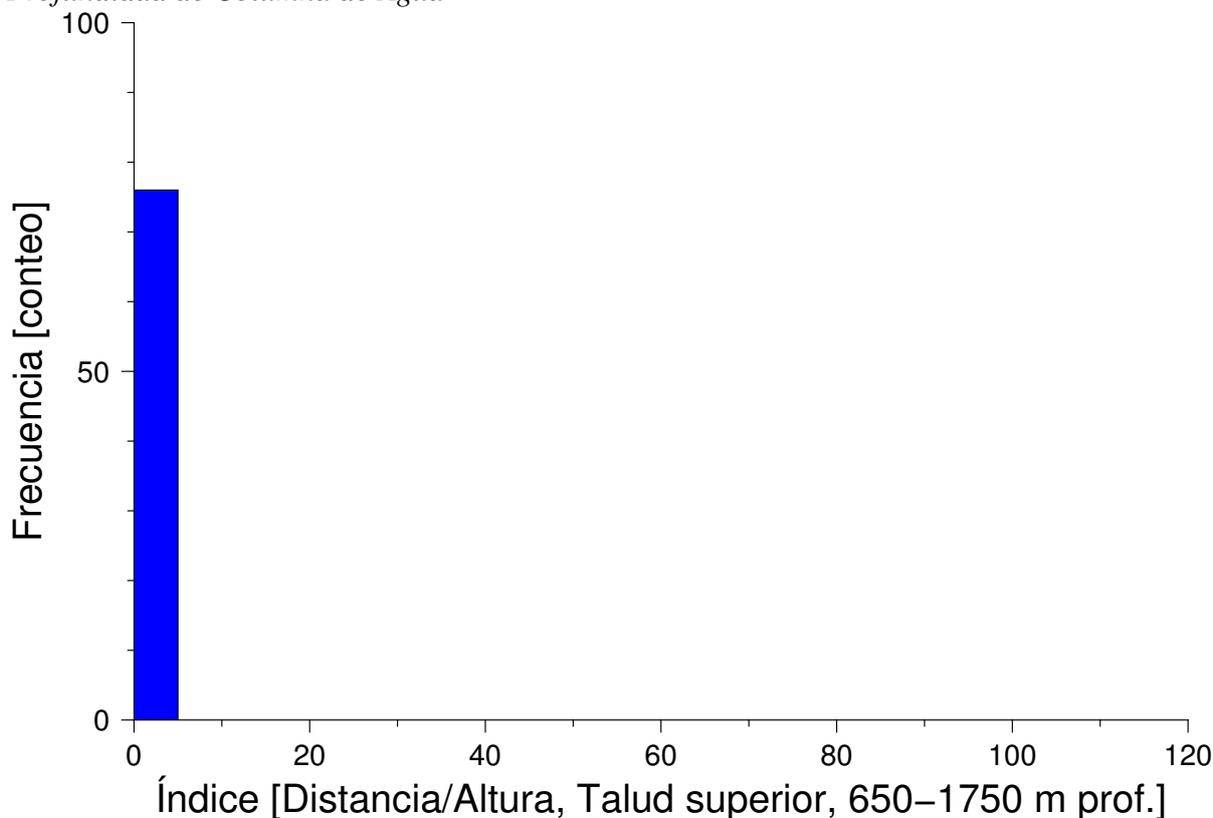
*Histograma Frecuencias de Índice (Distancia/Altura) de Áreas de Talud Superior, entre 200 y 650 m de Profundidad de Columna de Agua*



El histograma de frecuencias de índice de la sección dos (Figura 65) muestra que, la mayor acumulación se encuentra próxima a cero (i.e., *la moda principal se encuentra en el intervalo de 0 a 5 con un índice mínimo de 0 y un índice máximo de 4.7*). Esta acumulación representa anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos que tienen distancias menores entre sí y las alturas de dichas anomalías acústicas son mayores; además, equivale al 99 % del total observado en áreas de talud superior (200-650 m de profundidad de columna de agua) que cumplen con una relación directa. Por el contrario, se observa una menor predominancia que se encuentra lejana de cero (i.e., *índices que se encuentran entre los intervalos de 10 a 15 con un único valor de índice de 13.9*). Esta menor acumulación representa anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos que tienen distancias mayores entre sí y las alturas de dichas anomalías acústicas son menores; asimismo, equivale al 1 % del total observado en áreas de talud superior que se encuentran entre 200 y 650 m de profundidad de columna de agua y; además, cumplen con una relación indirecta.

**Figura 66**

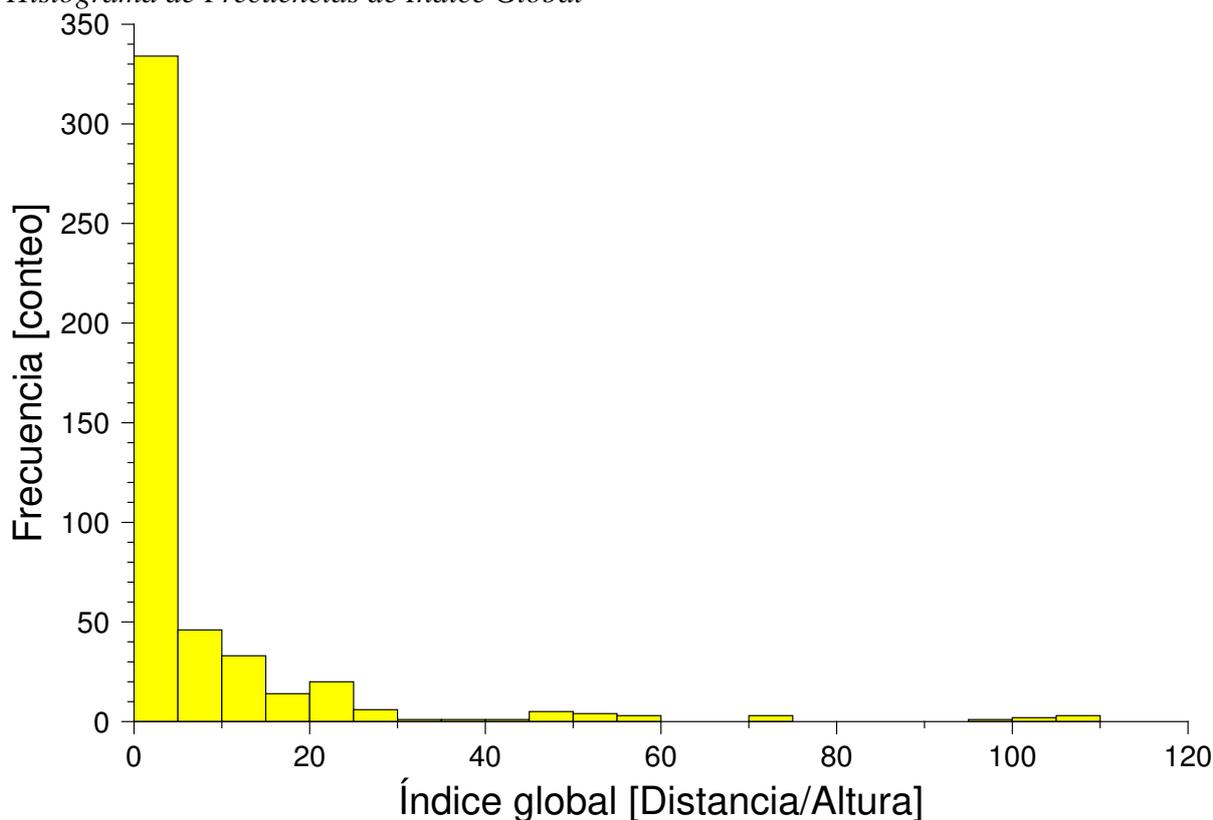
*Histograma de Índice (Distancia/Altura) de Áreas de Talud Superior, entre 650 y 1750 m de Profundidad de Columna de Agua*



El histograma de frecuencias de índice de la sección tres (Figura 66) indica que, la mayor acumulación se encuentra próxima a cero (i.e., *la moda principal se encuentra en el intervalo de 0 a 5 con un índice mínimo de 0.2 y un índice máximo de 2.9*). Esta acumulación representa anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos que tienen distancias menores entre sí y las alturas de dichas anomalías acústicas son mayores; además, equivale al 100% del total observado en áreas de talud superior (200-650 m de profundidad de columna de agua) que cumplen con una relación directa. En esta sección no hay presencia de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural con una relación indirecta a los rasgos morfológicos.

**Figura 67**

*Histograma de Frecuencias de Índice Global*



En el histograma de frecuencias de índice global (Figura 67) se observa que, la mayor acumulación de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural se encuentra hacia cero (i.e., *la moda principal se encuentra en el intervalo de 0 a 5 con un índice mínimo de 0 y un índice máximo de 5*) dado que existe una predominancia de anomalías acústicas y rasgos morfológicos que tienen distancias menores entre sí y las alturas de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural son mayores. Esta acumulación de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural representa la mayor proporción y equivale al 70 % (con relación directa) del total observado. Por el contrario, existe una menor predominancia de anomalías acústicas y rasgos morfológicos que poseen distancias mayores entre sí y las alturas de las anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural son menores. Esta menor acumulación se encuentra lejana de cero (i.e., *índices que se encuentran entre los intervalos de 5 a 60, 70 a 75 y 95 a 110*). Esto representa una menor proporción que equivale al 30 % (con relación indirecta) del total observado.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Relación pluma de gas/rasgo morfológico

La localización de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural, sugiere la presencia de plumas de gas al norte del margen convergente peruano y que están distribuidas en zonas de plataforma y talud superior. Estos datos muestran que los flujos de gas natural tienen una altura máxima de 1325 m y profundidades de columna de agua de hasta 1750 m con resultados similares a la investigación hecha por Greinert et al. (2006), donde se detectaron plumas de gas de hasta 1300 m de altura a 2080 m de profundidad de columna de agua en el Mar Negro. Por ende, se postula que el fenómeno de expulsión profunda no es exclusivo de mares intracontinentales como el Mar Negro, sino que también ocurre en márgenes convergentes como el Mar Peruano.

Los rasgos morfológicos más representativos presentes en esta investigación son los pockmarks, volcanes de fango y fallas geológicas en zonas de expulsión de gas natural.

En el caso de los pockmarks, el 87 % del total identificado está repartido en la plataforma continental y el 13 % en el talud superior, como por ejemplo el pockmark de la Figura 40, con ~37 m de diámetro y ~1.2 m de profundidad que se encuentra a ~1720 m de profundidad de columna de agua en el talud superior y, además, está asociado a una pluma de gas activa con una distancia entre sí de ~355 m. Estos rasgos suelen estar presentes en zonas de expulsión de gas natural como lo muestra el estudio hecho por Chand et al. (2012), donde muestra una asociación entre pockmarks y flujos activos de fluidos de metano que están ampliamente distribuidos en el Mar de Barents.

De igual manera, el 75 % del total de volcanes de fango identificados se encuentran en la plataforma continental y el 25 % en el talud superior. Un ejemplo es el volcán de fango de la Figura 52, con ~60 m de diámetro, ~6 m de altura y con una profundidad de columna de agua de ~60 m en la plataforma continental, frente a EL Alto. Además, se localiza dentro del sector (Cabo Blanco-El Ñuro) que es parte de los sectores propuestos para la Reserva Nacional Mar Tropical de Grau (SERNANP, 2017). Este volcán de fango tiene una asociación con una pluma de gas activa, cuya actividad de expulsión es ejercida desde el mismo volcán

de fango y posee características similares observadas en distintas investigaciones, tales como el estudio hecho por Díaz Del Río et al. (2014), donde caracterizaron la zona denominada «volcanes de fango del golfo de Cádiz» que se sitúa en un rango batimétrico comprendido entre 300 y 1200 m, en el sector oriental del Océano Atlántico norte, al suroeste de la Península Ibérica, y la investigación hecha por Greinert et al. (2006), en el cual descubrieron la liberación de burbujas de gas metano de tres volcanes de fango separados, el Dvurechenskiy (DMV), Vodianskiy (VMV) y el Sitio de Filtración Sin Nombre (NSS, por sus siglas en inglés) en el Mar Negro.

Asimismo, el 83 % del total de fallas identificadas se localizan en la plataforma continental y el 17 % en el talud superior. La falla más representativa se observa en la Figura 44, la cual se encuentra a ~1700 m de profundidad de columna de agua en el talud superior y posee ~1 km de longitud. Esta falla tiene una asociación con una pluma de gas activa, las cuales poseen una distancia entre sí de ~590 m. De manera similar, Géli et al. (2008) descubrieron una relación entre la falla de Anatolia del Norte dentro del Mar de Mármara, al noroeste de Turquía y flujos de gas metano; las cuales, en su mayoría, ejercían actividad cerca de la falla.

Por consiguiente, se sostiene que la presencia de rasgos morfológicos (e.g., *pockmarks*, *volcanes de fango*, *fallas geológicas*) en zonas de expulsión de gas natural repartidas en la plataforma continental, en áreas de pozos petroleros (i.e., *zonas de exploración y explotación de hidrocarburos*), y el talud superior, es un indicador de la migración de fluidos de metano hacia la columna de agua y guardan una relación entre sí, de manera similar a la investigación hecha por Greinert et al. (2006) y Römer et al. (2012), donde muestran que existe una asociación entre plumas de gas y rasgos morfológicos. En la plataforma continental, las emisiones de gas metano presentan una reflectividad media-baja (-30 dB a -60dB), pero, en zonas pertenecientes al talud superior, los flujos de gas natural tienen una media-alta reflectividad (-30 dB a -10 dB) que sugiere la presencia de depósitos de gas natural y petróleo con probable potencial hidrocarburífero. La presencia de zonas de expulsión de gas natural en el margen convergente peruano nos da información base para sugerir la existencia de sistemas petroleros en zonas de frontera (e.g., *la zona off-shore de la Cuenca Talara*) que aún no han sido considerados con potencial hidrocarburífero por la comunidad industrial.

Finalmente, el resultado del análisis geoestadístico del índice (distancia/altura) global de las 477 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural (Figura 67) muestra que, cuando se considera un índice menor o igual a 5, el 70 % de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos tienen una relación directa, dado que en ese intervalo ocurre la mayor acumulación y se ajusta con el escenario n.º 1 de la hipótesis, la cual establece que a menor distancia del rasgo morfológico, mayor altura de pluma de gas. Además, al hacer un análisis por separado, se ha descubierto que el 56 % de las anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural y rasgos morfológicos en la plataforma continental, tienen un patrón similar al análisis del índice global y también cumplen la condición del escenario n.º 1 de la hipótesis dentro del intervalo de índice de 0 a 5, lo cual corrobora dicho valor de 70 % que es la mayoría del universo de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural.

Entonces, teniendo en cuenta que la mayor cantidad del universo de flujos de gas natural se encuentra restringida dentro de la plataforma continental y que el 56 % equivale a más de la mitad del total observado, se infiere que existe una relación que tiene una tendencia a ser ideal, dado que representa el mayor porcentaje de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural que tienen distancias cercanas respecto a los rasgos morfológicos en un intervalo de índice de 0 a 5, el cual funciona porque el máximo valor de índice 5, que representa 54.7 m de distancia y una altura respectiva de 11 m, tiene una distancia que es un máximo aceptable porque el rasgo morfológico tiene un diámetro que se aproxima a la distancia máxima. Por ende, el resultado del análisis geoestadístico del índice global y de plataforma continental valida la hipótesis de esta tesis. Además, indica que no todas las zonas de expulsión de gas natural tienen una explicación en función de rasgos morfológicos.

## **5.2 ¿Vida en el fondo marino costa afuera de Talara dependiente de la expulsión de gas natural?**

Distintos autores han realizado investigaciones de vida marina asociada a zonas de expulsión de gas, como por ejemplo los estudios hechos por Suess y von Huene (1990), Judd (2003) y Sahling et al. (2003), donde explican que la presencia de estas comunidades ligadas

a ocurrencias de gas, tales como ecosistemas bentónicos y comunidades quimiosintéticas, es una característica típica y un fuerte indicador para demostrar que el fondo marino está relacionado con emisiones de gas natural (principalmente gas metano). Existe una estrecha asociación entre el flujo de fluidos del lecho marino y la actividad biológica-bentónica y sorprendentemente, se ha trabajado mucho más en las comunidades asociadas con el flujo de fluidos de los fondos marinos profundos que en las zonas con mayor facilidad de acceso de las plataformas continentales (Judd y Hovland, 2007). El aumento del suministro de alimentos, la disponibilidad de sustratos duros y las altas concentraciones de metano y sulfuro suministrados a las bacterias de vida libre y simbióticas constituyen la base de ecosistemas complejos que se encuentran en estas zonas de expulsión de gas natural (Levin, 2005).

Entonces, la distribución espacial de 477 anomalías acústicas de zonas de plumas de gas natural identificadas y agrupadas en 66 zonas de expulsión de gas natural en sectores de plataforma y talud continental, permite especular sobre la presencia de comunidades quimiosintéticas y ecosistemas biológicos-bentónicos asociados a estos lugares de filtración de fluidos de metano en el margen convergente peruano, con una predominancia en zonas más someras que equivalen al 96 % del total de zonas de expulsión, en áreas de plataforma donde se encuentra la zona histórica petrolífera del Perú y parte inicial del talud superior (i.e.,  $\leq 650$  m de profundidad de columna de agua), además de zonas más profundas en el talud superior (i.e.,  $\leq 1750$  m de profundidad de columna e agua) que equivalen al 4 % del total de zonas de expulsión y pueden ser la base para nuevas cadenas tróficas y niveles ecológicos que hasta ahora no había sido considerado. Es decir, las zonas de plumas de gas natural podrían ser un oasis de vida en la oscuridad del fondo marino.

## VI. CONCLUSIONES

- Evidencia hidroacústica y batimétrica de alta resolución sugiere que existe expulsión de gas natural en el margen convergente peruano.
- El área del crucero INGEMAR I (4800 km<sup>2</sup>) entre Punta Sal y Punta Pariñas en el norte del Perú presenta un total de 477 anomalías acústicas causadas por nubes ascendentes de burbujas de gas metano asociadas a 66 zonas de expulsión de gas natural.
- En zonas de plataforma continental y talud superior existe una relación entre rasgos morfológicos y zonas de plumas gas natural.
- Se observan plumas de gas y rasgos morfológicos asociados (e.g., *volcanes de fango* y *pockmarks*) en la zona histórica de exploración de hidrocarburos costa afuera de Talara.
- Hay mayor densidad de zonas de expulsión de gas natural en plataforma continental y parte inicial del talud superior con un 96 %. Sin embargo, se observa menor densidad en áreas más profundas de talud superior con un 4 %.
- Existe una predominancia de 70 % de anomalías acústicas de zonas de plumas de gas y rasgos morfológicos con relación directa y una menor predominancia de 30 % con relación indirecta en el área de estudio. Por ende, se valida la hipótesis de esta tesis.

## VII. RECOMENDACIONES

- Efectuar expediciones científicas para realizar una caracterización sistemática del fondo marino en el mar peruano es de vital importancia para realizar investigaciones relacionadas con la expulsión de gas natural. Ahora, el trabajo que realiza el INGEMMET a través del Programa de Geología Marina y Geología de la Antártida, muestra un ejemplo de un grupo de investigación multidisciplinario especializado en estos temas que debería replicarse en las universidades cuyas carreras profesionales estén relacionadas con la geología y ciencias del mar, así como para los interesados en esta línea de investigación.
- La detección de plumas de gas por métodos hidroacústicos debería ser contrastado por métodos directos (e.g., *cámaras submarinas, muestreo geológico*) del mismo modo que los cruceros de evaluación hidroacústica de recursos pesqueros que muestran un alto grado de efectividad y que son corroborados por lances de comprobación.
- Se necesitan equipos tecnológicos (Workstations) para realizar el procesamiento de datos batimétricos y de columna de agua con la finalidad de obtener resultados en menor tiempo.
- Capacitación en programación científica para sistematizar y automatizar los procedimientos descritos que con carácter de urgencia debe ser implementado en la malla curricular de la Escuela Profesional de Ingeniería Pesquera de la Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura (FOPCA) perteneciente a la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), dado que en el campo laboral y en el ámbito científico es indispensable el uso de lenguaje de programación.

## VIII. REFERENCIAS

- Ancco, O., Herbozo, G., y Cerpa, L. (2018). *Expulsión de gas natural del fondo marino costa afuera de Talara, norte del Perú* [Resumen de presentación de la conferencia]. XIX Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- Anderson, V. C. (1950). Sound scattering from a fluid sphere. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22(4), 426-431. <https://doi.org/10.1121/1.1906621>
- Andriessen, M. (2008). *Physics 2 HSC Course*. <https://catalogue.nla.gov.au/Record/3059486>
- Ballester Mora, L., y García Sala, D. (2010). *Estudio batimétrico con ecosonda multihaz y clasificación de fondos* [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <http://hdl.handle.net/2099.1/10663>
- Barclay, F., Bruun, A., Rasmussen, K., Alfaro, J., Cooke, A., Cooke, D., Salter, D., Godfrey, R., Lowden, D., McHugo, S., Özdemir, H., Pickering, S., Pineda, F., Herwanger, J., Volterrani, S., Murineddu, A., Rasmussen, A., y Roberts, R. (2008). Seismic inversion: Reading between the lines. *Oilfield Review*, 20, 42-63. <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/seismic-inversion>
- Barnes, R., y Goldberg, E. (1976). Methane production and consumption in anoxic marine sediments. *Geology*, 4(5), 297-300. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1976\)4%3C297:MPACIA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1976)4%3C297:MPACIA%3E2.0.CO;2)
- Bates, R. L., y Jackson, J. A. (1980). Glossary of Geology: Falls Church. *Virginia, American Geological Institute*, 167.
- Beléndez, A. (1992). *Temas de Física para Ingeniería: Acústica*. Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/11346>
- Beranek, L. (1969). *Acústica*. McGraw-Hill Book Company, Inc. [https://monoskop.org/images/7/7d/Beranek\\_Leo\\_L\\_Acustica\\_Spanish.pdf](https://monoskop.org/images/7/7d/Beranek_Leo_L_Acustica_Spanish.pdf)
- Bialas, J., y Kukowski, N. (2000). *FS «Sonne» Cruise Report SO146-1 & 2: GEOPECO. Geophysical Experiments at the Peruvian Continental Margin: Investigations of Tectonics, Mechanics, Gas Hydrates, and Fluid Transport. Arica-Talcahuano, March 1 -*

- May 4, 2000 (Vol. 96). GEOMAR Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften.  
<https://books.google.com.pe/books?id=bVw1ygEACAAJ>
- Brierley, A. S. (2014). Diel vertical migration. *Current Biology*, 24(22), R1074-R1076. [https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822\(14\)01067-7.pdf](https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822(14)01067-7.pdf)
- Caldas, J. (1979). Complejo metamórfico de Illescas. *Boletín de la Sociedad geológica del Perú*, 63, 217-236. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3743>
- Canet, C., y Prol-Ledesma, R. M. (2010). Infiltración y escape de fluidos sedimentarios en el fondo marino: Estructuras y procesos de mineralización. *Macla*, 12(12), 4-9. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5782056>
- Chand, S., Thorsnes, T., Rise, L., Brunstad, H., Stoddart, D., Bøe, R., Lågstad, P., y Svolsbru, T. (2012). Multiple episodes of fluid flow in the SW Barents Sea (Loppa High) evidenced by gas flares, pockmarks and gas hydrate accumulation. *Earth and Planetary Science Letters*, 331, 305-314. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.021>
- Colbo, K., Ross, T., Brown, C., y Weber, T. (2014). A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders. *Estuarine, coastal and shelf science*, 145, 41-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.04.002>
- Couch, R., y Whitsett, R. M. (1981). Structures of the Nazca Ridge and the continental shelf and slope of southern Peru. *Geological Society of America Memoirs*, 154, 569-586. <https://doi.org/10.1130/MEM154-p569>
- Delgado, C., y Gomero, R. (1995). Atlas sedimentológico de la plataforma continental peruana. *Informe del Instituto del Mar del Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/411>
- Delgado, C. (1988). Textura, carbono orgánico y carbonatos de los sedimentos del margen continental peruano. *Boletín del Instituto del Mar del Perú*. <https://n9.cl/69vtw>
- Díaz Del Río, V., Bruque, G., Fernández Salas, L., Rueda, J., González García, E., Lopez Gonzalez, N., Palomino, D., Lopez, F., Farias, C., Sánchez, R. F., Vazquez, J.-T., Ritterott, C., Fernández, A., Marina, P., Luque, V., Oporto, T., Sánchez Guillamón, O., García Muñoz, M., Urra, J., y Arcos, J. (2014). *Volcanes de fango del golfo de Cádiz, Proyecto LIFE+ INDEMARES*. <http://hdl.handle.net/10508/9584>
- EcuRed. (2013). Reflexión del sonido. <https://www.ecured.cu/Archivo:Reflexi%C3%B3n.jpg>

- Emeis, K.-C., Brüchert, V., Currie, B., Endler, R., Ferdelman, T., Kiessling, A., Leipe, T., Noli-Peard, K., Struck, U., y Vogt, T. (2004). Shallow gas in shelf sediments of the Namibian coastal upwelling ecosystem. *Continental Shelf Research*, 24(6), 627-642. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.01.007>
- Etioppe, G. (2004). Geologic Emission of Methane, the missing source in the atmospheric methane budget. *Geological Research Abstract*, 7, 03123. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.002>
- Etioppe, G. (2009). Natural emissions of methane from geological seepage in Europe. *Atmospheric Environment*, 43(7), 1430-1443. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.014>
- Etioppe, G., y Klusman, R. W. (2002). Geologic emissions of methane to the atmosphere. *Chemosphere*, 49(8), 777-789. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00380-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00380-6)
- Falvey, D. A. (1974). The development of continental margins in plate tectonic theory. *The APPEA Journal*, 14(1), 95-106. <https://doi.org/10.1071/AJ73012>
- Feuillade, C., y Werby, M. (1994). Resonances of deformed gas bubbles in liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(6), 3684-3692. <https://doi.org/10.1121/1.410558>
- Foote, K. G. (1980). Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strengths. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 67(6), 2084-2089. <https://doi.org/10.1121/1.384452>
- Géli, L., Henry, P., Zitter, T., Dupré, S., Tryon, M., Çağatay, M., de Lépinay, B. M., Le Pichon, X., Şengör, A., Görür, N., Natalin, B., Uçarkuş, G., Özeren, S., Volker, D., Gasperini, L., Burnard, P., Bourlange, S., y the Marnaut Scientific Party. (2008). Gas emissions and active tectonics within the submerged section of the North Anatolian Fault zone in the Sea of Marmara. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(1-2), 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.047>
- Geologíaweb. (2020). Fallas geológicas. <https://geologiaweb.com/geologia-estructural/fallas-geologicas/>

- Godø, O. R., Patel, R., y Pedersen, G. (2009). Diel migration and swimbladder resonance of small fish: Some implications for analyses of multifrequency echo data. *ICES Journal of Marine Science*, 66(6), 1143-1148. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp098>
- Gorska, N., Ona, E., y Korneliussen, R. J. (2004). On acoustic multi-frequency species identification and separation of Atlantic mackerel, Norwegian spring spawn herring and Norway pout. <https://n9.cl/jtgp5>
- Greinert, J., Artemov, Y., Egorov, V., De Batist, M., y McGinnis, D. (2006). 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.02.011>
- Gutiérrez, M., y Herbozo, G. (2005). Batimetría y clasificación exploratoria del fondo marino utilizando información de retrodispersión acústica. *Unidad de Tecnologías de Detección, Instituto del Mar del Perú*, 1, 1-13.
- Gutiérrez, M. (2002). *Determinación de la Fuerza de Blanco de las principales especies del Mar Peruano* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Federico Villarreal].
- Hampton, M. A., Lee, H. J., y Locat, J. (1996). Submarine landslides. *Reviews of geophysics*, 34(1), 33-59. <https://doi.org/10.1029/95RG03287>
- Harrington, P. (1985). Formation of pockmarks by pore-water escape. *Geo-Marine Letters*, 5(3), 193-197. <https://doi.org/10.1007/BF02281638>
- Haslett, R. W. G. (1977). Automatic plotting of polar diagrams of target strength of fish in roll, pitch and yaw. *Rapports et Proces-Verbaux des Reunions (ICES)*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016052070>
- Heeschen, K. U., Tréhu, A. M., Collier, R. W., Suess, E., y Rehder, G. (2003). Distribution and height of methane bubble plumes on the Cascadia Margin characterized by acoustic imaging. *Geophysical Research Letters*, 30(12). <https://doi.org/10.1029/2003GL016974>
- Herbozo, G. (2006). *Diseño e implementación de una aplicación de sistema de información geográfica para estudios paleoceanográficos frente a la costa central-sur del Perú*

- [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Catálogo de Biblioteca del INGEMMET. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0036.pdf>
- Herbozo, G. (2010). *Caracterización Estructural Y Estratigráfica Asociada Al Sistema De Hidratos De Gas Natural Costa Afuera De Trujillo, Perú* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica De Valparaíso]. Repositorio ANID. <http://hdl.handle.net/10533/112195>
- Herbozo, G., Cerpa, L., Morales, M., Herrera, J., Ancco, O., y Arriola, D. (2017). Develando la geología del fondo marino: Resultados del crucero INGEMAR I. [https://www.sgp.org.pe/wp-content/uploads/MG-07.06.17\\_Herbozo-pres.pdf](https://www.sgp.org.pe/wp-content/uploads/MG-07.06.17_Herbozo-pres.pdf)
- Hoehler, T. M., Alperin, M. J., Albert, D. B., y Martens, C. S. (1994). Field and laboratory studies of methane oxidation in an anoxic marine sediment: Evidence for a methanogen-sulfate reducer consortium. *Global biogeochemical cycles*, 8(4), 451-463. <https://doi.org/10.1029/94GB01800>
- Hornafius, J. S., Quigley, D., y Luyendyk, B. P. (1999). The world's most spectacular marine hydrocarbon seeps (Coal Oil Point, Santa Barbara Channel, California): Quantification of emissions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9), 20703-20711. <https://doi.org/10.1029/1999JC900148>
- Hovland, M., y Judd, A. (1988). *Seabed pockmarks and seepages: Impact on geology, biology, and the marine environment*. Springer. [https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference\\_id/8267303](https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/8267303)
- Hovland, M., Judd, A. G., y King, L. H. (1984). Characteristic features of pockmarks on the North Sea Floor and Scotian Shelf. *Sedimentology*, 31(4), 471-480. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb01813.x>
- ICES. (2000). *Report on echo trace classification* (Informe técnico). ICES Cooperative Research Report No. 238. International Council for the Exploration of the Sea. <https://n9.cl/0ab62>
- IHO-IOC. (2019). Standardization of undersea feature names. *International Hydrographic Organization*. [https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B-6\\_e4.1.0\\_2013\\_ES\\_rev2017.pdf](https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B-6_e4.1.0_2013_ES_rev2017.pdf)

- INGEMMET. (2018). Pluma de gas. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- Iversen, N., y Jorgensen, B. B. (1985). Anaerobic methane oxidation rates at the sulfate-methane transition in marine sediments from Kattegat and Skagerrak (Denmark) 1. *Limnology and Oceanography*, 30(5), 944-955. <https://doi.org/10.4319/lo.1985.30.5.0944>
- Judd, A., Hovland, M., Dimitrov, L., Garcia Gil, S., y Jukes, V. (2002). The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. *Geofluids*, 2(2), 109-126. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00027.x>
- Judd, A. (2005). Gas emissions from mud volcanoes. En *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity* (pp. 147-157). Springer. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8\\_13](https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8_13)
- Judd, A., Davies, G., Wilson, J., Holmes, R., Baron, G., y Bryden, I. (1997). Contributions to atmospheric methane by natural seepages on the UK continental shelf. *Marine Geology*, 137(1-2), 165-189. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(96\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00087-4)
- Judd, A., y Hovland, M. (2007). *Seabed fluid flow: The impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535918>
- Judd, A. G. (2003). The global importance and context of methane escape from the seabed. *Geo-Marine Letters*, 23(3-4), 147-154. <https://doi.org/10.1007/s00367-003-0136-z>
- Kaartvedt, S., Røstad, A., Klevjer, T. A., y Staby, A. (2009). Use of bottom-mounted echo sounders in exploring behavior of mesopelagic fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 109-118. <https://doi.org/10.3354/meps08174>
- Kaharl, V. A. (1999). Sounding Out the Ocean's Secrets. En *Beyond Discovery: The path from research to human benefit*. National Academy of Sciences. <http://www.nasonline.org/publications/beyond-discovery/sounding-out-oceans-secrets.pdf>
- King, G. M. (1984). Utilization of hydrogen, acetate, and "noncompetitive"; substrates by methanogenic bacteria in marine sediments. *Geomicrobiology Journal*, 3(4), 275-306. <https://doi.org/10.1080/01490458409377807>
- King, L. H., y MacLean, B. (1970). Pockmarks on the Scotian shelf. *Geological Society of America Bulletin*, 81(10), 3141-3148. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[3141:POTSS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[3141:POTSS]2.0.CO;2)

- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., y Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics*. <https://n9.cl/hb0nf4>
- Knittel, K., y Boetius, A. (2009). Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process. *Annual review of microbiology*, 63, 311-334. <http://hdl.handle.net/21.11116/0000-0001-CC96-0>
- Kubilius, R. (2015). *Multi-frequency acoustic discrimination between gas bubble plumes and biological targets in the ocean* [Tesis de doctorado, The University of Bergen]. Bergen Open Research Archive. <https://hdl.handle.net/1956/10076>
- Kubilius, R., y Pedersen, G. (2016). Relative acoustic frequency response of induced methane, carbon dioxide and air gas bubble plumes, observed laterally. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4), 2902-2912.
- Kvenvolden, K. A., y Kastner, M. (1990). Gas hydrates of the Peruvian outer Continental Margin. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.7981&rep=rep1&type=pdf>
- Kvenvolden, K. A., y Rogers, B. W. (2005). Gaia's breath—global methane exhalations. *Marine and Petroleum Geology*, 22(4), 579-590. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.08.004>
- Laier, T., y Jensen, J. B. (2007). Shallow gas depth-contour map of the Skagerrak-western Baltic Sea region. *Geo-Marine Letters*, 27(2-4), 127-141. <https://doi.org/10.1007/s00367-007-0066-2>
- Leblond, I., Scalabrin, C., y Berger, L. (2014). Acoustic monitoring of gas emissions from the seafloor. Part I: quantifying the volumetric flow of bubbles. *Marine Geophysical Research*, 35(3), 191-210. <https://doi.org/10.1007/s11001-014-9223-y>
- Leifer, I., y Boles, J. (2005). Measurement of marine hydrocarbon seep flow through fractured rock and unconsolidated sediment. *Marine and Petroleum Geology*, 22(4), 551-568. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.10.026>
- Leighton, T. (1997). *The Acoustic Bubble* (Vol. 10). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-441920-9.X5001-9>

- Levin, L. A. (2005). Ecology of cold seep sediments: Interactions of fauna with flow, chemistry and microbes. En *Oceanography and Marine Biology* (pp. 11-56). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420037449>
- Loncke, L., Maillard, A., Basile, C., Roest, W., Bayon, G., Gaullier, V., Pattier, F., Lepinay, M., Grall, C., Droz, L., Marsset, T., Giresse, P., Caprais, J., Cathalot, C., Graindorge, D., Heuret, A., Jean-Frédéric, L., Bermell, S., Marcaillou, B., y Bourrin, F. (2015). Structure of the Demerara passive-transform margin and associated sedimentary processes. Initial results from the IGUANES cruise. *Geological Society of London, Special Publications*. <https://doi.org/10.1144/SP431.7>
- Love, R. H. (1971). Measurements of fish target strength: A review. *Fish Bull*, 69(4), 703-715. <https://spo.nmfs.noaa.gov/sites/default/files/pdf-content/1971/694/love.pdf>
- Luo, J., Ortner, P. B., Forcucci, D., y Cummings, S. R. (2000). Diel vertical migration of zooplankton and mesopelagic fish in the Arabian Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(7-8), 1451-1473. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00150-2)
- Macharé, J., Sébrier, M., Huaman, D., y Mercier, J. (1986). Tectónica cenozoica de la margen continental peruana. *Boletín de la Sociedad geológica del Perú*, 76, 45-77. <https://www.sgp.org.pe/category/bibliovirtual/?result=4234>
- MacLennan, D., y Simmonds, J. (1992). *Fisheries Acoustics* (Vol. 5). Chapman & Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1558-4>
- Martens, C. S., y Berner, R. A. (1974). Methane production in the interstitial waters of sulfate-depleted marine sediments. *Science*, 185(4157), 1167-1169. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.185.4157.1167>
- Masias, J. A. (1976). *Morphology, shallow structure, and evolution of the Peruvian continental margin, 6° to 18°S* [Tesis de maestría, Oregon State University]. ScholarsArchive@OSU. <http://hdl.handle.net/1957/28513>
- Mata, M. P., Fernández-Puga, M. d. C., y Pérez-Outeiral, F. J. (2009). 1180 Estructuras submarinas producidas por el escape de gases. *Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino*. [http://www.jolube.es/habitat\\_espana/documentos/1180.pdf](http://www.jolube.es/habitat_espana/documentos/1180.pdf)

- McClatchie, S., y Dunford, A. (2003). Estimated biomass of vertically migrating mesopelagic fish off New Zealand. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50(10-11), 1263-1281. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(03\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(03)00128-6)
- McGinnis, D. F., Greinert, J., Artemov, Y., Beaubien, S., y Wüest, A. (2006). Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C9). <https://doi.org/10.1029/2005JC003183>
- Medwin, H., y Clay, C. S. (1997). *Fundamentals of Acoustical Oceanography* (Vol. 24). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-487570-8.X5000-4>
- Mejia Jervis, T. (2017). ¿Qué es el movimiento convergente de placas? <https://www.lifeder.com/movimiento-convergente-placas/>
- Mercury, F. (1974). Seven Seas of Rhye [Canción]. En *Queen II*. EMI, Elektra Records. <https://open.spotify.com/track/1IhLUzMxDDJ9pzfT95exy?si=0aaed8efdd09451b>
- Merewether, R., Olsson, M. S., y Lonsdale, P. (1985). Acoustically detected hydrocarbon plumes rising from 2-km depths in Guaymas Basin, Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B4), 3075-3085. <https://doi.org/10.1029/JB090iB04p03075>
- Miall, A. D. (2013). *Principles of sedimentary basin analysis*. Springer Science & Business Media. <https://n9.cl/8b5foo>
- Micallef, A., Krastel, S., y Savini, A. (2017). *Submarine Geomorphology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57852-1>
- Michaud, F., Proust, J.-N., Dano, A., Collot, J.-y., Guiyeligou, G., Hernández, M., Ratzov, G., Martillo, C., Pouderoux, H., Schenini, L., Jean-Frédéric, L., y Loayza, G. (2016). Flare-Shaped Acoustic Anomalies in the Water Column Along the Ecuadorian Margin: Relationship with Active Tectonics and Gas Hydrates. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1230-7>
- Milkov, A. V., Sassen, R., Apanasovich, T. V., y Dadashev, F. G. (2003). Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean. *Geophysical Research Letters*, 30(2). <https://doi.org/10.1029/2002GL016358>

- Milkov, A. (2000). Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, 167(1), 29-42. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00022-0)
- Nakken, O., y Olsen, K. (1977). Target strength measurements of fish. [https://imr.brage.unit.no/imr-xmlui/bitstream/handle/11250/107967/rpv\\_170\\_1977\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://imr.brage.unit.no/imr-xmlui/bitstream/handle/11250/107967/rpv_170_1977_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Nave, C. R. (2000). Relaciones en propagación de ondas. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/wavrel.html#c1>
- NOAA. (2013). There are three kinds of plate tectonic boundaries: Divergent, convergent, and transform plate boundaries. <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/plate-boundaries.html>
- NPA. (1995). *Preliminary assessment of slick mapping for offshore Peru, Repsol* (Informe técnico). Perupetro.
- Oremland, R. S., Marsh, L. M., y Polcin, S. (1982). Methane production and simultaneous sulphate reduction in anoxic, salt marsh sediments. *Nature*, 296(5853), 143-145. <https://doi.org/10.1038/296143a0>
- Ostrovsky, I., McGinnis, D. F., Lapidus, L., y Eckert, W. (2008). Quantifying gas ebullition with echosounder: The role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake. *Limnology and Oceanography: Methods*, 6(2), 105-118. <https://doi.org/10.4319/lom.2008.6.105>
- Pedersen, G., y Korneliussen, R. J. (2009). The relative frequency response derived from individually separated targets of northeast Arctic cod (*Gadus morhua*), saithe (*Pollachius virens*), and Norway pout (*Trisopterus esmarkii*). *ICES Journal of Marine Science*, 66(6), 1149-1154. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp070>
- Prince, R., Resig, J. M., Kulm, L., y Moore Jr, T. C. (1974). Uplifted turbidite basins on the seaward wall of the Peru Trench. *Geology*, 2(12), 607-611. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1974\)2%3C607:UTBOTS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1974)2%3C607:UTBOTS%3E2.0.CO;2)
- Rehder, G., Brewer, P. W., Peltzer, E. T., y Friederich, G. (2002). Enhanced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean. *Geophysical research letters*, 29(15), 21-1. <https://doi.org/10.1029/2001GL013966>

- Rejas, M. (2009). *Génesis de carbonatos autigénicos asociados a volcanes de fango del Golfo de Cádiz (SW España): Influencia de procesos bioquímicos y desestabilización de hidratos de gas* [Tesis de doctorado, Universitat de Barcelona]. Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona. <http://hdl.handle.net/2445/34795>
- Rey, P. F. (2005). *Introduction to Structural Geology*. Universidad of Sidney. [https://www.researchgate.net/publication/299135987\\_Introduction\\_to\\_Structural\\_Geology](https://www.researchgate.net/publication/299135987_Introduction_to_Structural_Geology)
- Rogel Castellanos, C. Y. (2011). *Determinación de la calidad de cementación en una tubería de revestimiento a través del sistema sónico de imágenes USI* [Tesis de pregrado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio digital del IPN. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/15698>
- Römer, M., Sahling, H., Pape, T., Bohrmann, G., y Spieß, V. (2012). Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin (offshore Pakistan). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10). <https://doi.org/10.1029/2011JC007424>
- Sahling, H., Galkin, S. V., Salyuk, A., Greinert, J., Foerstel, H., Piepenburg, D., y Suess, E. (2003). Depth-related structure and ecological significance of cold-seep communities a case study from the Sea of Okhotsk. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 50(12), 1391-1409. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.08.004>
- Sahling, H., Rubin-Blum, M., Borowski, C., Escobar-Briones, E., Gaytán Caballero, A., Hsu, C.-W., Loher, M., Macdonald, I., Marcon, Y., Pape, T., Römer, M., Schubotz, F., Smrzka, D., Wegener, G., y Bohrmann, G. (2016). Seafloor observations at Campeche Knolls, southern Gulf of Mexico: coexistence of asphalt deposits, oil seepage, and gas venting. *Biogeosciences Discussions*, 1-40. <https://doi.org/10.5194/bg-2016-101>
- Samamé, M. (1985). El Perú minero. *Tomo sobre Geología*, 4(1), 1-352.
- Sandwell, D., y Smith, W. (1997). *Exploring the ocean basins with satellite altimeter data*. National Geophysical Data Center (NGDC), National Oceanic; Atmospheric Administration (NOAA). [https://topex.ucsd.edu/marine\\_grav/explore\\_grav.html](https://topex.ucsd.edu/marine_grav/explore_grav.html)
- Sauter, E. J., Muyakshin, S. I., Charlou, J.-L., Schlüter, M., Boetius, A., Jerosch, K., Damm, E., Foucher, J.-P., y Klages, M. (2006). Methane discharge from a deep-sea submarine

- mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3-4), 354-365. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.041>
- Schmale, O., Greinert, J., y Rehder, G. (2005). Methane emission from high-intensity marine gas seeps in the Black Sea into the atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 32(7). <https://doi.org/10.1029/2004GL021138>
- Schneider von Deimling, J., Brockhoff, J., y Greinert, J. (2007). Flare imaging with multi-beam systems: Data processing for bubble detection at seeps. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(6). <https://doi.org/10.1029/2007GC001577>
- Schweigger, E. (1947). *El litoral peruano*. Compañía Administradora del Guano.
- Scouling, B., Chu, D., Ona, E., y Fernandes, P. G. (2015). Target strengths of two abundant mesopelagic fish species. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(2), 989-1000. <https://doi.org/10.1121/1.4906177>
- SERNANP. (2017). Expediente Reserva Nacional Mar Tropical de Grau.
- Simmonds, J., y MacLennan, D. (2005). *Fisheries Acoustics. Theory and Practice*. Chapman & Hall. <https://n9.cl/shpim>
- Suess, E., y von Huene, R. (1990). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Vol. 112, scientific results, Peru Continental Margin.
- Teves, N., y Evangelista, E. (1974). Las 200 millas de mar territorial peruano y sus fondos marinos. *Boletín de la Sociedad geológica del Perú*, 53, 59-74. <https://www.sgp.org.pe/category/bibliovirtual/?result=3982>
- Thornburg, T., y Kulm, L. (1981). Sedimentary basins of the Peru continental margin: Structure, stratigraphy, and Cenozoic tectonics from 6 S to 16 S latitude. En *Geological Society of America Memoirs* (pp. 393-422). Geological Society of America. <https://n9.cl/i0v82>
- Thurber, A. R., Seabrook, S., y Welsh, R. M. (2020). Riddles in the cold: Antarctic endemism and microbial succession impact methane cycling in the Southern Ocean. *Proceedings of The Royal Society B*. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.1134>

- Tucker, D. G., y Gazey, B. K. (1966). *Applied underwater acoustics*. Elsevier Science & Technology. <https://books.google.com.pe/books?id=TuyCtQEACAAJ>
- Urick, R. J. (1983). *Principles of underwater sound*. McGraw-Hill Ryerson, Limited. <https://n9.cl/2p7vg>
- van der Kruk, J. (2001). Reflection seismic 1. *ETH Zürich, Institut für Geophysik*. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004363847>
- Veloso, M., Greinert, J., Mienert, J., y De Batist, M. (2015). A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders: Examples from the Arctic offshore NW-Svalbard. *Limnology and Oceanography: methods*, 13(6), 267-287. <https://doi.org/10.1002/lom3.10024>
- von Breymann, M. T., Emeis, K.-C., y Camerlenghi, A. (1990). Geochemistry of sediments from the Peru upwelling area: Results from sites 680, 682, 685, and 688. [http://www-odp.tamu.edu/publications/112\\_SR/VOLUME/CHAPTERS/sr112\\_30.pdf](http://www-odp.tamu.edu/publications/112_SR/VOLUME/CHAPTERS/sr112_30.pdf)
- von Deimling, J. S., Greinert, J., Chapman, N., Rabbel, W., y Linke, P. (2010). Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: Sensing bubbles controlled by variable currents. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8(5), 155-171. <https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.155>
- Welhan, J., y Craig, H. (1983). Methane, hydrogen and helium in hydrothermal fluids at 21 N° on the East Pacific Rise. *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers*, 391-409. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0402-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0402-7_17)
- Whiticar, M. J. (2002). Diagenetic relationships of methanogenesis, nutrients, acoustic turbidity, pockmarks and freshwater seepages in Eckernförde Bay. *Marine Geology*, 182(1-2), 29-53. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00227-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00227-4)
- Zinck, J. (2012). Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. [https://www.researchgate.net/publication/259935872\\_Geopedologia\\_Elementos\\_de\\_geomorfologia\\_para\\_estudios\\_de\\_suelos\\_y\\_de\\_riesgos\\_naturales](https://www.researchgate.net/publication/259935872_Geopedologia_Elementos_de_geomorfologia_para_estudios_de_suelos_y_de_riesgos_naturales)

## IX. ANEXOS

### Anexo A. Vita

# OSCAR HUMBERTO ANCCO CHOTA

## INGENIERO PESQUERO

 oscarancco02@gmail.com
  +51 996000389
  Lima, Perú
  @AnccoOscar  
 linkedin.com/in/oscar-ancco-90ba04192/
  0000-0001-6445-494X



## RESUMEN

Ingeniero Pesquero con mención en Hidroacústica y Geología Marina de la Universidad Nacional Federico Villarreal. Especialista en la prospección de zonas de expulsión de gas natural del suelo marino, batimetría y geomorfología del fondo marino mediante técnicas hidroacústicas, oceanográficas y sistemas de información geográfica (SIG). Con conocimiento en programación científica, manejo de software de código libre y software comercial para la manipulación de información hidroacústica y bases de datos. Experiencia en el manejo de equipos para realizar prospecciones hidroacústicas, geológicas y oceanográficas.

## EXPERIENCIA

Asistente de investigación

**Programa de Geología Marina (GEOMAR) y Geología de la Antártida (GANT) del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)**

 Abril 2018 - Mayo 2022  Lima, Perú

- Trabajos de batimetría, backscatter y bases de datos de anomalías acústicas del Estrecho de Bransfield - Antártida.
- Trabajos acústicos y de Geología Marina, encargado de la elaboración de una base de datos de plumas de gas, ocurrencias acústicas y geoformas del fondo marino de la Antártida y apoyo en la elaboración de figuras para una publicación ISI en los trabajos inherentes al proyecto GANT - Programa de Geología de la Antártida.
- Trabajos acústicos y de Geología Marina, encargado del procesamiento de datos batimétricos, caracterización de plumas de gas, generación de bases de datos de plumas de gas, elaboración de instructivos y apoyo en la recolección de datos hidroacústicos en los cruceros geocientíficos INGEMAR del Programa de Geología Marina y Geología de la Antártida.

## FORTALEZAS

Proactivo Comprometido con el trabajo Altamente responsable  
Con espíritu de superación Motivador & líder

## INTERESES

- Hidroacústica
- Plumas de gas
- Sistemas hidrotermales
- Batimetría multihaz
- Sistemas de información geográfica (SIG)
- Estudio de riesgos y peligros geológicos marinos asociados con recursos minerales marinos
- Sedimentología
- Abundancia de recursos hidrobiológicos en la columna de agua

## MI FILOSOFÍA DE VIDA

«La disciplina tarde o temprano vencerá a la inteligencia».

## MUY ORGULLOSO DE



### Ganar un premio

Primer puesto en el «Concurso de Tesis para la Graduación Oportuna», organizado por el Instituto Central de Gestión de la Investigación (ICGI) y el Vicerrectorado de Investigación (VRIN) de la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV) con fondos del Ministerio de Educación (MINEDU).

## IDIOMAS

Inglés       
 Portugués       
 Español

## EDUCACIÓN

Ingeniero Pesquero con mención en Hidroacústica y Geología Marina

**Universidad Nacional Federico Villarreal**

 Agosto 2022

Título de tesis: Plumaz de gas y Rasgos Morfológicos a lo Largo del Margen Convergente Peruano entre Punta Sal y Punta Pariñas

Bachiller en Ciencias

**Universidad Nacional Federico Villarreal**

 Setiembre 2016

## REFERENCIAS

Ing. Luis Cerpa

 Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

 lcerpa@ingemmet.gob.pe

Dr. Gerardo Herbozo

 Tecnológica de Alimentos S.A.

 gherbozo@tasa.com.pe