

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y GEOGRAFÍA  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR**

**Ranking de Perfiladores Acústicos de Subfondo (SBP),  
a Través de un Análisis Comparativo**

**Trabajo de Titulación para optar al Título de Oceanógrafo  
por  
Eduardo Ramírez Vergara**

**2016**

**Comisión de Titulación:**

Profesor Guía: Dr. Juan Díaz Naveas

Profesora : Srta. Eleonora Barroso

Profesor : Dr. Dante Queirolo

## **AUTORIZACIÓN DE USO**

Al presentar este Trabajo de Titulación como último requisito para la obtención del título de Oceanógrafo, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de este documento sólo con fines académicos.

Eduardo Ramírez Vergara

**DEDICATORIA**

A mis padres, por todo el apoyo brindado.  
Esto es un premio, por su tremendo esfuerzo  
y mi perseverancia.

## AGRADECIMIENTOS

Mi más sentido agradecimiento en primer lugar a mis padres: Juana Vergara y Eduardo Ramírez, por apoyarme estos dos años y medio de un largo camino recorrido, que sufrió diversas etapas, diversos vaivenes, en los cuales trabajamos duro para llegar a la meta. Hoy en día puedo decir meta superada y todo este esfuerzo mancomunado no hubiera sido posible sin ellos.

En segundo lugar quisiera agradecer el enorme aprendizaje que obtuve gracias a mi profesor guía Dr. Juan Díaz Naveas, quién ha sabido inculcar en mí, un sin número de observaciones profesionales que, a la larga, estoy más que seguro que me servirán. Por tanto estoy orgulloso de haber podido ser su tesista y aprender en demasía en este largo recorrido, tanto en las aulas como en este trabajo investigativo.

No puedo dejar fuera de este agradecimiento a mis profesores Eleonora Barroso y Dante Queirolo, quienes a través de sus correcciones, también fueron parte importante de este gran logro personal. También mi agradecimiento va para todos los profesores de la carrera de Oceanografía, que me formaron como un gran profesional y por supuesto a don Mauricio de la biblioteca quién proporcionó todas las publicaciones científicas necesarias para generar un gran trabajo de análisis bibliográfico.

Por último me gustaría agradecer el empuje que toda mi familia, en especial mis hermanos; Melissa, Orietta y Javier, mi novia Karen y amigos hicieron por mí, ya que en los peores momentos supieron estar conmigo y levantarme cuando creía que sería imposible hacerlo.

Muchas gracias a todos.

## TABLA DE CONTENIDOS

Contenido	
Comisión de Titulación.....	i
AUTORIZACIÓN DE USO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
TABLA DE CONTENIDOS.....	v
LISTADO DE FIGURAS .....	xi
LISTADO DE TABLAS.....	xiii
GLOSARIO .....	xvii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ¿QUÉ ES UN PERFILADOR DE SUBFONDO? .....	1
1.1.1 Información que Entregan los Perfiladores de Sub Fondo .....	2
1.1.2 Aplicaciones de los SBP .....	3
1.2 PROPAGACIÓN DE ONDAS SISMO-ACÚSTICAS .....	4
1.2.1 Ondas Acústicas .....	4
1.2.2 Presión Acústica .....	4
1.2.3 Velocidad y Densidad .....	6
1.2.4 Frecuencia y Longitud de Onda.....	6
1.2.5 La Ecuación de Onda .....	9
1.2.6 Potencia e Intensidad.....	12
1.3 ATENUACIÓN.....	13
1.3.1Atenuación Geométrica .....	13
1.3.2 Atenuación por Absorción .....	15
1.3.3 Atenuación Convencional .....	19
1.3.4 Scattering .....	20
1.3.5 Efecto de Burbujas de Aire.....	22

1.4. EFECTO DOPPLER .....	23
1.5 VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL OCÉANO.....	26
1.5.1 Parámetros de Velocidad del Sonido .....	26
1.5.2 Modelos de Velocidad del Sonido.....	27
1.5.3 Mediciones de Velocidad del Sonido .....	30
1.5.4 Perfiles Verticales de Velocidad del Sonido .....	32
1.5.5 Reflexión en una Interface Plana .....	35
1.6 REFLEXIÓN EN LA SUPERFICIE DEL MAR Y EN EL FONDO MARINO.....	37
1.6.1 Reflexión y dispersión en la superficie del mar.....	37
1.6.2 Reflexión y dispersión en el fondo marino .....	37
1.2.7 TRANSDUCTORES .....	40
1.2.7.1 Principios fundamentales.....	40
1.2.7.1.1 <i>Magnetoestrictivo</i> .....	40
1.2.7.1.2 <i>Piezoeléctrico</i> .....	41
1.2.7.1.3 <i>Electroestictivo</i> .....	41
1.2.8 FUENTES ACÚSTICASSUBACUÁTICAS .....	42
1.2.8.1 Transductores Tonpiliz .....	42
1.2.8.2 Transductores de Alta Frecuencia.....	43
1.2.8.3 Transductores de Baja Frecuencia .....	44
1.2.8.4 Transmisión No-Lineal.....	46
1.3 HIDRÓFONOS .....	47
1.3.1 Clasificación Según su Instalación.....	48
1.4 ELECOSONDA MONOHAZ.....	51
1.5 PERFILADORES DE SUBFONDO.....	53
1.5.1 Generalidades .....	53
1.5.2 Principio de Funcionamiento .....	54
1.5.3 Señales “Chirp” .....	55
1.5.4 Frecuencia .....	57
1.5.5 Dominio del Tiempo.....	58
1.5.6 Transductores de SBP.....	59

1.6 DESEMPEÑO DE LOS SBP.....	60
1.6.1 Máxima profundidad de penetración .....	60
1.6.2 Resolución .....	61
1.6.3 Formación de ecos y sus consecuencias .....	62
1.7 TRES CONCEPTOS ORIGINALES DE SBP .....	64
1.7.1 SBP Paramétrico.....	64
1.7.2 SBP Multihaz .....	65
1.7.3 SBP de apertura sintética .....	66
1.8 APLICACIONES DE LOS SBP .....	66
1.9 EJEMPLOS DE PERFILES OBTENIDOS CON SBP .....	67
1.10 SOFTWARES.....	70
1.10.a Software de Adquisición de Datos. ....	70
1.10.b Software de Procesamiento de Datos. ....	70
OBJETIVOS.....	72
Objetivo General .....	72
Objetivos Específicos.....	72
Importancia de este trabajo.....	73
Contribuciones de este trabajo.....	73
DESARROLLO DEL TRABAJO .....	74
2. CATASTRO Y PRESELECCIÓN DE SBPS DISPONIBLES EN EL MERCADO INTERNACIONAL .....	75
2.1. Introducción .....	75
2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS POR FABRICANTE.....	82
2.2.1 Innomar Technology GmbH: 6 modelos .....	82
2.2.1 a) Modelo 1.SES 2000 COMPACT .....	82
2.2.1 b) Modelo 2. SES 2000 LIGHT .....	85
2.2.1c) Modelo 3. SES 2000 STANDARD .....	86
2.2.1. d) Modelo 4. SES 2000 STANDARD PLUS .....	87
2.2.1. e) Modelo 5. SES 2000 MEDIUM .....	89
2.2.1 f) Modelo 6.SES 2000 ROV.....	90
2.2.2Syqwest Inc: 3 modelos.....	92

2.2.2. a) Modelo 7. STRATABOX.....	92
2.2.2. b) Modelo 8. STRATABOX 3510.....	93
2.2.2. c) Modelo 9. BATHY 2010.....	94
2.2.3 Falmouth Scientific, Inc: 1 modelo.....	97
2.2.3. a) Modelo 10. HMS-622 CHIRPceiver.....	97
2.2.4 EdgeTech: 3 modelos.....	99
2.2.4. a) 3100 PORTABLE SBP SYSTEM.....	99
2.2.4. a1) Modelo 11. SB-424.....	99
2.2.4. b) Modelo 13. SB-0512i.....	100
2.2.5 Teledyne Gavia: 1 modelo.....	102
2.2.6 iXBlue: 1 modelo.....	103
2.2.6. a) Modelo 15. ECHOES 10000.....	103
2.2.6 Knudsen Engineering Limited: 1 modelo.....	105
2.2.6. a) Modelo 16. PINGER SBP.....	105
3. ESTUDIOS DE CASO CON APLICACIÓN DIRECTA DE SBP.....	109
3.1 INTRODUCCIÓN.....	109
3.2 INFORMACIÓN CIENTÍFICA.....	114
3.2.1 Publicaciones Científicas.....	114
3.2.2. Resúmenes Presentados en Congresos.....	123
Modelos 1 al 6: SES-2000.....	123
a) Estudio en laguna Venecia, Italia con un pequeño bote a motor.....	124
b) Topografía en una zona de surgencia superficial utilizando un pequeño catamarán y un control remoto.....	126
Modelos 7-8-9: STRATABOX.....	127
Modelos 11 al 13: EdgeTech.....	129
3.3 ANÁLISIS DE ESTUDIOS.....	131
3.3.1 Análisis de Publicaciones.....	131
3.3.2 Análisis de Resúmenes presentados en Congresos.....	133
4. METODOLOGÍA.....	135
4.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	136
4.1.1 Criterios Primarios.....	136

4.1.1 a) Tipo de uso para el objetivo planteado .....	137
4.1.1 b) Rango de profundidad de agua y zona geográfica.....	138
4.1.1 c) Tipo de montaje en la embarcación.....	139
4.1.2 Criterios Secundarios .....	140
4.1.3. Criterios Terciarios .....	141
4.2 CREACIÓN DE TABLA COMPARATIVA.....	143
4.3 EVALUACIÓN DE CRITERIOS .....	144
4.3.1Calificación .....	144
4.3.1.1Criterios primarios .....	144
4.3.1.2 Criterios secundarios.....	146
4.3.1.3 Criterios terciarios.....	147
4.3.2Conversión a Porcentajes en cada Criterio .....	149
4.3.4Ponderación .....	151
4.3.5 Porcentajes de Funcionalidad .....	153
4.3.6. Ranking Final .....	155
5. RESULTADOS.....	156
5.1 TABLA COMPARATIVA.....	157
• Bloque A - Criterios Primarios A y B .....	160
• Bloque B -Criterio Primario C . .....	161
• Bloque C - Criterios Secundarios E,F,G y H.....	162
• Bloque D- Criterios Terciarios I, J, K, L, M, N, Ñ, O.....	163
• Bloque E - Criterios Terciarios P, Q, R, S, T, U, V, W.....	165
• Bloque F - Criterios Terciarios X, Y, Z, AA, BB,CC.....	167
• Bloque G - Criterios Terciarios EE, FF, GG. ....	170
5.2 PORCENTAJES DE FUNCIONALIDAD .....	171
5.2.1 - SES 2000 Compact de INNOMAR (Modelo 1) .....	172
5.2.2 Modelo 2 - SES 2000 Light de INNOMAR .....	173
5.2.3 Modelo 3 - SES 2000 Standard de INNOMAR .....	174
5.2.4 Modelo 4 - SES 2000 Standard Plus de INNOMAR.....	175
5.2.5 Modelo 5 - SES 2000 Médium de INNOMAR .....	176

5.2.6 Modelo 6 - SES 2000 ROV de INNOMAR .....	177
5.2.7 Modelo 7 .....	178
5.2.8 Modelo 8 .....	179
5.2.9 Modelo 9 .....	180
5.2.10 Modelo 10 .....	181
5.2.11 Modelo 11 .....	182
5.2.12 Modelo 12 .....	183
5.2.13 Modelo 13 .....	184
5.2.14 Modelo 14 .....	185
5.2.15 Modelo 15 .....	186
5.2.16 Modelo 16 .....	187
5.3. RANKING FINAL .....	188
6. ANALISIS Y CONSIDERACIONES FINALES .....	193
6.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DESCRITA .....	193
6.1.1 Criterios Primarios.....	194
6.1.2 Criterios Secundarios .....	197
6.1.3Criterios Terciarios .....	199
6.2. ANÁLISIS DE LOS MODELOS SELECCIONADOS .....	203
• Modelo SES 2000 ROV de Innomar (85,8 %):.....	203
• Modelo 5 SES 2000 Médium de Innomar (85,8%) .....	204
• Modelo 9 BATHY 2010 de Syqwest (85,0%):.....	204
6.4. ANÁLISIS DE POSIBLES ESCENARIOS DE APLICACIONES DIRECTAS USANDO SBP .....	206
6.5. CONSIDERACIONES FINALES .....	212
6.5.1 Descripción de los Requerimientos.....	212
a) Requerimientos técnicos.....	212
b) Requerimientos Ambientales.....	213
c) Requerimientos de información – comerciales .....	214
6.5.2. Recomendaciones .....	214
7. CONCLUSIONES .....	216
ANEXOS .....	229

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una onda acústica dos de sus componentes: longitud de onda y amplitud. Onda acústica expresada en términos de presión versus distancia recorrida.....	9
Figura 2. Frentes de onda esféricos (izquierda) y planos (derecha).....	12
Figura 3. Variación del coeficiente de absorción con la frecuencia.....	17
Figura 4. Proceso de scattering debido a la interacción de las ondas acústicas con la superficie del mar, con el fondo marino y con una pequeña región con burbujas presente en la columna de agua.....	20
Figura 5. Perfil de velocidad del sonido típico para latitudes medias.....	34
Figura 6. Ley de reflexión. El ángulo incidente y el ángulo reflejado, ambos medidos respecto a una recta normal a la superficie de reflexión, son iguales.....	36
Figura 7. Izquierda: señal Chirp en el dominio del tiempo. Derecha: espectro de frecuencia del Chirp.....	56
Figura 8. Imagen lograda con el perfilador SUBPRO 1220 en el Puerto de Aberdeen, Escocia.....	67
Figura 9. Segmento de un registro de subfondo de un sondaje efectuado para la ruta de la tubería de British Petroleum – Troika.....	68
Figura 10. Imagen del mar de China del Sur lograda con SBP EdgeTech X-star 0512i.....	68
Figura 11. Perfiles de perfilador Knudsen 3,5kHz dispuestos sobre sus respectivos tracks de navegación (escala horizontal 2m por pixel, escala vertical 0,1m por pixel, más 0,1m por metro de alejamiento desde el observador).....	69
Figura 12. Transceptor, cable y transductor de SBP Innomar SES 2000 COMPACT.....	84
Figura 13. Ejemplo de perfil característico realizado con un SBP Innomar SES 2000 COMPACT (Prof. agua: 1–2 m; rango: 1–15mbajo nivel del mar; frecuencia: 10kHz; duración de pulso: 0,2ms).....	84
Figura 14. Perfilador y sonar barrido lateral SES 2000 Standard Plus.....	88
Figura 15. Ejemplo de registro característico del sistema SES 2000 Standard Plus, incluyendo perfil de SBP (arriba, en colores) y sonograma de SSS (abajo, en grises) (frecuencias: SBP 6kHz, sonar de barrido lateral 410kHz; Prof. Agua 16m con ondas de arena superpuestas de 4m de altura).....	89
Figura 16. Rack del computador de adquisición de datos con el sistema BATHY 2010.....	96

Figura 17. Ejemplo de perfil del subfondo marino (formato SEG-Y) con BATHY 2010.....	96
Figura 18. Towfish del sistema SB-0512 de EdgeTech.....	101
Figura 19. Perfil de capas de Arena obtenidos con el equipo SB 424.....	102
Figura 20. Configuración Típica del ECHOES 1000.....	104
Figura 21. Los diferentes tipos de ecos obtenidos por el perfilador de subfondo Stratabox a 20 m de profundidad.....	118
Figura 22. Ecograma SES- 2000 (Perú; frecuencia: 8kHz; rango: 120- 220m).....	123
Figura 23. Ecograma obtenido con el SBP SES-2000 (Mar de Okhotsk; frecuencia: 8kHz; rango: 1510-1590m).....	124
Figura 24. Transductor montado en el bote y fijado con abrazaderas de tornillo.....	125
Figura 25. Ecograma en la Laguna de Venecia, mostrando una penetración de más de 3m a una profundidad de agua de alrededor de 0,7m.....	126
Figura 26. Catamarán de estudio MESSIN durante la operación.....	127
Figura 27. Porción de perfil STRATABOX 3510 en el río Shatt Al-Arab, Iraq.....	129
Figura 28. Perfil SB-424 en el cañón Hells, USA.....	130
Figura 29. Tipo de uso en las costas de Arequipa (Perú), 60 m de penetración dentro del subfondo marino y a un rango de profundidad de 0 - 1.250m.....	138
Figura 30. Montaje en bote de fibra de vidrio del SBP 3200 HP de EdgeTech.....	140
Figura 31. Post-Procesamiento a través del software Sonar-Wiz5 de un mapa de arrecifes artificiales usando Sub Bottom Profiler (Bathy 2010PC).....	141
Figura 32. Gráfico de barras del % de Funcionalidad de los diferentes modelos del Ranking Final, donde las barras están ordenadas de mayor a menor % de Funcionalidad. La elipse negra representa la tendencia de los modelos seleccionados y la elipse naranja muestra el quiebre de la tendencia natural, por tanto pasan a denominarse modelos alternativos.....	190

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Fabricantes que producen SBP, según país de origen, número de modelos de SBP que fábrica, frecuencia con que aparece publicado un trabajo dónde se utilizó un SBP de la firma y grado de relación del trabajo con los SBP.....	78
Tabla 2. Segunda preselección de fabricantes y modelos respectivos en relación al número de modelos de tamaño físico menor.....	81
Tabla 3. Especificaciones técnicas de SBP Innomar SES 2000 COMPACT.Fuente: <a href="http://www.innomar.com/ses2000compact.php">http://www.innomar.com/ses2000compact.php</a> .....	83
Figura 12. Transceptor, cable y transductor de SBP Innomar SES 2000 COMPACT.....	84
Figura 13. Ejemplo de perfil característico realizado con un SBP Innomar SES 2000 COMPACT (Prof. agua: 1–2 m; rango: 1–15mbajo nivel del mar; frecuencia: 10kHz; duración de pulso: 0,2ms).....	84
Tabla 4. Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 LIGHT.....	85
Tabla 5. Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 STANDARD.....	86
Tabla 6. Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 STANDARD PLUS.....	87
Tabla 7. Especificaciones técnicas de Sonar de barrido lateral, complemento del modelo 4.....	88
Tabla 8. Especificaciones técnicas de SBPSES 2000 MEDIUM.....	90
Tabla 9. Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 ROV. Fuente: <a href="http://www.innomar.com/ses2000rov.php">http://www.innomar.com/ses2000rov.php</a> .....	91
Tabla 10. Especificaciones técnicas de SBP STRATABOX.....	92
Tabla 11. Especificaciones técnicas de SBP STRATABOX 3510.....	93
Tabla 12. Especificaciones técnicas de SBPBATHY 2010.....	95
Tabla 13. Especificaciones técnicas de SBP HMS-622 CHIRPceiver Canal de baja frecuencia (estándar).....	97
Tabla 14. Especificaciones técnicas de SBP HMS-622 CHIRPceiver Canal de ultra baja frecuencia (opcional).....	98
Tabla 15. Especificaciones técnicas de SBP HMS-622 CHIRPceiver Canal de alta frecuencia (opcional).....	98
Tabla 16. Especificaciones técnicas de SBP SB-424.....	99

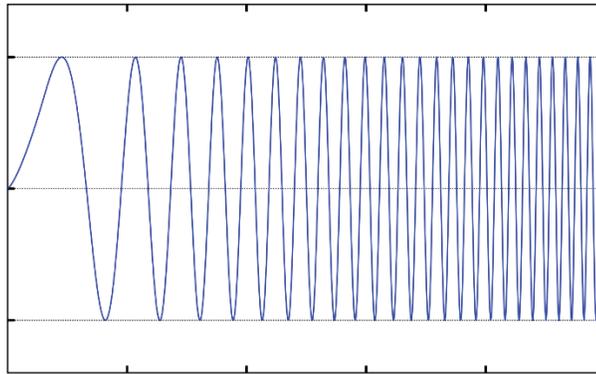
Tabla 17. Especificaciones técnicas de SBP SB-216S.....	100
Tabla 18. Especificaciones técnicas de SBP SB-0512i.....	101
Tabla 19. Especificaciones técnicas de GAVIA AUV.....	103
Tabla 20. Especificaciones técnicas de ECHOES 10000. Fuente: <a href="https://www.ixblue.com/products/sub-bottom-profilers-and-very-low-frequency-transducers">https://www.ixblue.com/products/sub-bottom-profilers-and-very-low-frequency-transducers</a> .....	104
Tabla 21. Especificaciones técnicas de PINGER SBP. Fuente: <a href="https://knudseneng.com/files/pdfs/D131-05191-Rev5.0-Pinger%20SBP.pdf">https://knudseneng.com/files/pdfs/D131-05191-Rev5.0-Pinger%20SBP.pdf</a> .....	105
Tabla 22. Principales parámetros en común (con su respectiva frecuencia) descritos en las especificaciones técnicas de los 16 modelos de SBP preseleccionados.....	106
Tabla 23. Agrupación de parámetros según estudio preseleccionado.....	132
3.3.2 Análisis de Resúmenes presentados en Congresos.....	133
Tabla 24. Calificación asignada para el criterio primario A.....	144
Tabla 25. Calificación asignada para el criterio primario B.....	145
Tabla 26. Calificación asignada para el criterio primario C.....	145
Tabla 27. Calificación asignada para el criterio secundario D.....	146
Tabla 28. Calificación asignada para el criterio secundario E.....	146
Tabla 29. Calificación asignada para el criterio secundario F.....	147
Tabla 30. Calificación asignada para el bloque 1 de criterios terciarios.....	147
Tabla 31. Calificación asignada para el bloque 2 de criterios terciarios.....	148
Tabla 32. Calificación asignada para el bloque 3 de criterios terciarios.....	148
Tabla 33. Calificación asignada para el bloque 4 de criterio terciarios.....	149
Tabla 34. Calificación asignada para la descripción de la comunidad científica.....	149
Tabla 35. Siglas y unidades de cada uno de los criterios ocupados en la tabla comparativa.....	157
Tabla 36. Listado de modelos por firma analizada.....	159
Tabla 37. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 1.....	172
Tabla 38. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 2.....	173
Tabla 39. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 3.....	174
Tabla 40. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 4.....	175
Tabla 41. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 5.....	176
Tabla 42. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 6.....	177

Tabla 43. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 7.....	178
Tabla 44. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 8.....	179
Tabla 45. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 9.....	180
Tabla 46. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 10.....	181
Tabla 47. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 11.....	182
Tabla 48. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 12.....	183
Tabla 49. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 13.....	184
Tabla 50. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 14.....	185
Tabla 51. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 15.....	186
Tabla 52. Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 16.....	187
Tabla 53. Ranking Final de los modelos SBP analizados.....	189



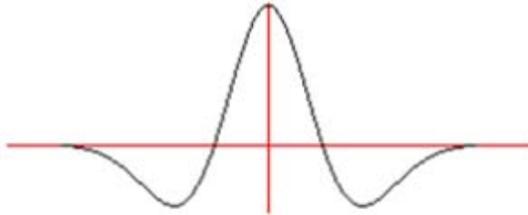
## GLOSARIO

1. ASCII: “American Standard Code for Information Interchange”, es un código que utiliza 7 bits para representar los caracteres, aunque inicialmente empleaba un bit adicional (bit de paridad) que se usaba para detectar errores en la transmisión. A menudo se llama incorrectamente ASCII a otros códigos de caracteres de 8 bits, como el estándar ISO-8859-1, que es una extensión que utiliza 8 bits para proporcionar caracteres adicionales usados en idiomas distintos al inglés, como el español.
2. Chirp: tipo de señal que aumenta su frecuencia con el tiempo; también llamada señal de frecuencia modulada (ver figura).



3. CW: “Continuous Wave” o “Continuous Waveform” (onda u forma de onda continua) es una señal de amplitud y frecuencia constantes.
4. GIS: “Geographical Information System” (sistema de información geográfica), es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos socio-culturales, económicos y ambientales, que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz.
5. GNSS: Global Navigation Satellite System, sistema de navegación satelital con cobertura global.
6. HRP: sensor de movimiento para expediciones sísmicas efectuadas por transductores de SBP.
7. ISE: software de post-procesamiento de datos sísmicos perteneciente a Innomar.
8. ODC: formato de datos gráficos.

9. PAS: es una extensión del sonar de barrido lateral que se puede utilizar de manera complementaria en el modelo 1 SES 2000 de la firma Innomar.
10. Ricker wavelet: ondícula Ricker, es un tipo de pulso de haz emitido por ciertos transductores (ver figura del Ricker wavelet en el dominio del tiempo).



11. SBP: “Sub-Bottom Profiler”, perfilador de subfondo.
12. SEG-Y: es un formato, diseñado para almacenar datos sísmicos, propuesto por la Society of Exploration Geophysicists. Cada archivo de línea sísmica se compone de dos cabeceras (ASCII y binaria), seguidas de trazas sísmicas, cada una –a su vez- con su propia cabecera.
13. SES NET VIEW: software perteneciente a Innomar para el modelo 2 SES 2000 Light para la visualización de echo prints en línea e información del sistema en equipos remotos (a través de Ethernet) para control de calidad
14. SESWIN: Software de procesamiento de datos sísmicos perteneciente a la firma Innomar.
15. SLF: “Secondary Low Frequencies” (frecuencias secundarias bajas) vinculadas a los perfiladores paramétricos.
16. SSS: “Side Scan Sonar” o sonar de barrido lateral en español, complemento del perfilador de subfondo.
17. TTL: “Transistor–Transistor Logic”, un tipo especial de circuitos digitales.
18. XTF: “Extensive Text Framework”. Desarrollado por la California Digital Library, se ofrece como una plataforma de software libre para desarrollo *front-end*, es decir, se puede acceder al código fuente para personalizar la presentación de colecciones. Por un lado, permite la construcción de índices de búsqueda extrayendo los metadatos de los documentos almacenados. Por otro lado, potencia la recuperación de información con búsquedas facetadas.

## RESUMEN

El perfilador de subfondo o SBP, es un equipo de adquisición de datos, con el que se obtiene una representación de las estructuras por debajo del fondo marino, a partir del análisis de las características de la propagación del sonido a través de ellas. Se basa en el principio de la reflexión de las ondas acústicas en las superficies que separan medios con impedancia acústica diferente. Cuanto más grande sea el contraste entre los dos medios, mayor será la reflexión que se producirá en dicha superficie.

Hoy en día los perfiladores de subfondo son muy utilizados en muchas aplicaciones científicas, además de las empresas privadas, las cuales involucran exploraciones geológicas y geofísicas, campañas de investigación para dragado de sedimento, entre otras. Lo anterior hace que el SBP sea un producto muy requerido a nivel mundial, debido a sus múltiples usos, con buenos resultados.

Cada vez está más desarrollado el mercado, en cuanto a la venta de los SBPs, ideando nuevos modelos y aplicaciones diferentes, para generar una mayor eficiencia en términos de toma de datos (mejor resolución y mayor penetración), dependiendo claramente del objetivo que quiera darle cada investigador o cliente al equipamiento.

De acuerdo a lo anterior, en este trabajo de titulación se realizó un catastro y preselección de los modelos disponibles que se acoplen de mejor manera a una embarcación menor. Junto con esto, también se efectuó una revisión del principio de funcionamiento de los perfiladores de subfondo junto con la teoría acústica, como también una revisión de las principales publicaciones científicas y resúmenes presentados en congresos relacionados con los SBPs seleccionados.

Una vez recopilada toda esta información, a través de una tabla comparativa se llevó a cabo una metodología basada en un análisis de comparación entre modelos, por medio de criterios primarios, secundarios y terciarios (representada en porcentajes de funcionalidad para cada modelo seleccionado), para así generar un ranking final, el cual permitió obtener finalmente una selección de los perfiladores de subfondo más idóneos de ser adquiridos para las necesidades actuales de investigación y docencia de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Adicionalmente se recomendaron perfiladores de subfondo para tres escenarios posibles de aplicación en aguas chilenas.

## ABSTRACT

The sub bottom profiler or SBP is an equipment for data acquisition, which images the structures from beneath the seafloor, based on the analysis of the characteristics of sound propagation among them. It is based on the principle of reflection of acoustic waves in the surfaces that separate media with different acoustic impedances. The greater the contrast between the two media, the greater will be the reflection from that surface.

Today sub bottom profiles are very much utilized in many scientific applications, as well as in private enterprises, in which geological and geophysical exploration are carried out, together with investigations for sediment dredging, among others. These applications make SBP a very required product worldwide, thanks to their multiple uses with good results.

Considering the SBPs sales market, this is more and more expanded, inventing new models and various applications, to generate a larger efficiency in terms of data acquisition (with more resolution and more penetration), but clearly depending on the objective that each researcher or client would require from each equipment.

According to the former statements, in this work a compilation and preselection was carried out of the SBPs that are best suited for a minor vessel. Apart from the last, a review of operation principles of SBPs was made together with acoustics theory, as well as a review of main scientific publications and abstracts presented at conferences related with the selected SBPs.

Once all this information was compiled, a methodology was conducted based on the comparison on a table of the preselected models, by means of primary, secondary and tertiary criteria (represented by functional qualities percentages for each selected model), for generating a final ranking. This allowed to obtain a selection of the best suitable sub bottom profilers to be purchased, considering the present needs in investigation and teaching at the School of Marine Sciences of the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Additionally, sub bottom profilers were recommended for three possible application scenarios in Chilean waters.

## INTRODUCCIÓN

El estudio del subfondo marino es un tópico muy importante dentro de las ciencias del mar, debido a las múltiples aplicaciones que tiene, ya sea en geología estructural, estratigrafía, geotecnia, arqueología e inclusive en el estudio de organismos que viven enterrados.

Así mismo, el conocimiento de las características del subfondo marino es una información básica para la gestión del medio marino.

### 1.1 ¿QUÉ ES UN PERFILADOR DE SUBFONDO?

Los perfiladores de subfondo, también llamados perfiladores de sedimento, en inglés “sub-bottom profiler” (SBP), están basados en el concepto de mediciones híbridas entre sonar y sistemas sísmicos. Por un lado, la estructura general de su hardware es similar a los ecosondas de fondo o de peces, con una decena de diferencias notables en los principios del trabajo.

La función principal de un perfilador de subfondo, es grabar ecos desde las interfaces entre las capas de rocas o sedimentos. Estas interfaces corresponden a discontinuidades en la impedancia acústica (densidad multiplicada por velocidad de onda sísmica de la respectiva capa) entre ellas, generando reflexiones de la señal acústica (Lurton, 2010).

Los SBP exploran las primeras capas de rocas o sedimentos bajo el fondo marino, sobre un espesor que abarca comúnmente alrededor de decenas de metros (excepcionalmente 100 metros y más en sedimentos blandos con un bajo coeficiente de absorción). Tecnológicamente hablando, son usualmente ecosondas de un haz, de baja frecuencia (en el rango de 1 a 10kHz, donde 3,5kHz sería a menudo una señal de frecuencia nominal).

El alcance y la calidad de la imagen obtenida dependen de la frecuencia acústica utilizada. Las ondas de baja frecuencia penetran más profundamente en los sedimentos, pero la resolución de la imagen es más baja. Al revés, a más altas frecuencias la penetración es menor y la calidad de la imagen mayor.

Por lo tanto, la frecuencia acústica a utilizar deberá partir de un compromiso entre la profundidad a la que se desee llegar y la calidad de la imagen que se desee obtener (Ayala *et al.*, 1985).

En cuanto a la estructura física de un SBP, este instrumento puede acoplarse tanto al casco del barco (de modo análogo al ecosonda), como también puede ser remolcado a cierta profundidad, como towfish (pez remolcado) para independizarlo de los movimientos del barco causados por las olas en la superficie del mar.

### **1.1.1 Información que Entregan los Perfiladores de Sub Fondo**

La información que se puede obtener del subfondo marino, son básicamente perfiles batimétricos en profundidad, los cuales muestran la estratigrafía y diferentes tipos de sedimentos presentes en el fondo y subfondo marino. Estos pueden ser: arenas, gravas, lodos, etc. Todo esto es obtenido, a través de una descripción geofísica superficial de la estructura del subfondo marino (Bentos, 2015).

Los estudios de ambientes de aguas someras, tienden a ser más detallados en cuanto a variaciones en el tipo de sedimento y su distribución. En ambientes de aguas profundas se encuentran generalmente cambios más interesantes en estructuras, estratos y cambios de características acústicas más gruesas, es decir, de mayor escala.

Las características sedimentarias varían en tamaño, desde ondas de arena de unos pocos centímetros en longitud de onda y altura, a depresiones masivas y turbiditas, las cuales pueden ser importantes para entender la evolución general del área de estudio. Los cambios en el tipo de sedimento, pueden ser detectados por cambios en las propiedades de reflexión del fondo marino.

Particularmente, la técnica empleada a través del SBP tiene la ventaja de facilitar la obtención y manejo del importante volumen de datos en que inevitablemente se incurre cuando se investiga las áreas de fondo marino, que usualmente se presentan en la práctica para la cimentación de estructuras offshore y obras asociadas (Ayala *et al.*, 1985).

Dependiendo de dónde se realice el estudio, será la información que se podrá obtener, ya que cada subfondo tiene características propias, como una composición del suelo, topografía, vida marina y sedimentación diferentes. Por ejemplo, la topografía del fondo marino es más llana donde la sedimentación es fuerte y cubre los rasgos tectónicos.

### **1.1.2 Aplicaciones de los SBP**

Los SBP son usados para múltiples tareas y aplicaciones, dentro de las cuales destacan:

- exploraciones geofísicas y geológicas;
- búsqueda de recursos minerales;
- detección de depósitos de gas natural;
- obtención de imágenes de la columna de agua o monitoreo de filtraciones de gas;
- delineación del basamento rocoso;
- apoyo en exploraciones geotécnicas con la determinación del espesor de unidades sedimentarias no consolidadas;
- investigaciones para proyectos de dragado;
- perfiles de ruta para tuberías y proyectos de tendido de cables submarinos;
- perfiles en aguas bastante someras, en puertos, compuertas y zonas costeras;

- detección de objetos enterrados para arqueología submarina, como búsqueda de objetos (naufragios, edificaciones históricas o asentamientos); o
- monitoreo ambiental en estudios ecológicos.

## **1.2 PROPAGACIÓN DE ONDAS SISMO-ACÚSTICAS**

### **1.2.1 Ondas Acústicas**

Las ondas acústicas consisten en variaciones sutiles del campo de presión en el agua respecto de la presión hidrostática. Se habla también de ondas sismo-acústicas, pues en el contexto de este estudio, las ondas no solamente se propagan en un medio fluido, sino también en medio sólido, bajo el fondo marino. En términos genéricos corresponden a las ondas sísmicas Primarias o P. Las partículas de agua de mar vibran en la misma dirección de propagación de la onda, produciendo regiones adyacentes de compresión y expansión, similares a aquellas producidas por las ondas longitudinales en una barra.

### **1.2.2 Presión Acústica**

Las ondas acústicas se generan desde la propagación de una perturbación mecánica. Compresiones y dilataciones viajan desde un punto específico hacia puntos circundantes. Desde un punto al próximo esta perturbación se puede propagar lejos a partir de su fuente. La velocidad de propagación de esta perturbación media, es conocida con el nombre de velocidad del sonido o velocidad  $c$ .

Si la propagación solo ocurre a lo largo de una dimensión espacial  $x$ , se escribe por medio de una perturbación  $s(x,t)$ , bajo las siguientes condiciones (Lurton, 2010):

$$s(x_1, t_1) = s(x_2, t_2) = s(x_3, t_3) = \dots = s(x_n, t_n)$$

Todo esto está expresado en diferentes tiempos  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , que están vinculados a los lugares  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ya la velocidad del sonido  $c$ , a través de:

$$\begin{aligned}x_2 - x_1 &= c(t_2 - t_1) \\x_3 - x_2 &= c(t_3 - t_2) \\&\dots \\x_n - x_{n-1} &= c(t_n - t_{n-1})\end{aligned}$$

Las ondas acústicas requieren un material “elástico” de soporte para poder propagarse (por ejemplo: gas, líquido o sólido). Las propiedades mecánicas de este medio de soporte dan el valor medio de la velocidad del sonido.

La onda acústica está caracterizada por:

- el movimiento local de cada partícula en torno de un punto de equilibrio;
- por la velocidad del fluido correspondiente a este movimiento; y
- por el resultado de la presión acústica, lo cual es la variación alrededor del promedio de la presión hidrostática, provocada por las compresiones y dilataciones locales impuestas por el movimiento particular.

Para la descripción de ondas acústicas, la presión acústica es la cantidad que se utiliza más a menudo.

La presión acústica se expresa en Pascales (Pa) o microPascales ( $\mu\text{Pa}$ ). La diferencia entre los valores máximos y mínimos de la presión acústica o dinámica puede ser extremadamente significativa en la acústica subacuática. El ruido de fondo, que se mide en bandas de frecuencias estrechas bajo ciertas condiciones, puede ser solo de unas pocas decenas de microPascales ( $\mu\text{Pa}$ ), mientras que el nivel de sonido cercano a una fuente alta de potencia, puede alcanzar hasta  $10^{12}\mu\text{Pa}$ . Esto justifica el uso de una notación logarítmica.

### 1.2.3 Velocidad y Densidad

La velocidad de propagación de una onda acústica se determina por las características medias de la propagación local: la densidad,  $\rho$ , y el módulo de elasticidad,  $E$  (que es la cantidad inversa de la compresibilidad,  $\chi$ ) (Lurton, 2010).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\chi\rho}} \quad (1.1)$$

En el agua de mar, la velocidad de la onda acústica es cercana a  $c = 1500\text{ms}^{-1}$ , dependiente de la presión, salinidad y temperatura del lugar.

La densidad promedio del agua de mar es aproximadamente  $\rho = 1.030\text{kgm}^{-3}$ , dependiendo de los mismos parámetros físicos (presión, salinidad y temperatura).

En el sedimento marino (considerado como fluido medio, en una primera aproximación), los rangos de densidad varían entre  $1.200$  y  $2.000\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . En el sedimento saturado de agua, la velocidad del sonido tiene rangos típicos de  $1.500$  a  $2.000\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 1.2.4 Frecuencia y Longitud de Onda

La frecuencia de una onda acústica es el número de frentes de ondas que pasan por un punto fijo por unidad de tiempo. Se puede expresar también como la tasa de oscilación o vibración de las partículas de la onda. La frecuencia se mide en ciclos por segundo o Hercio (Hz). Un aumento en la frecuencia del sonido es percibido por el receptor como un sonido más agudo (Barroso, 2010). El inverso multiplicativo de la frecuencia se denomina período

y es el tiempo en que se completa un ciclo de oscilación. Las frecuencias usadas en la acústica subacuática tienen rangos desde 10Hz a 1MHz, dependiendo de la aplicación (equivalentes a períodos de 0,1s a 1μs) (Lurton, 2010).

La frecuencia acústica de los ecosondas es el parámetro que determina el alcance y la penetración del sonido en los sedimentos. Para haces del mismo ancho, las frecuencias bajas requieren de un transductor más grande.

Las frecuencias de los ecosondas batimétricos son típicamente:

- mayores que 200kHz, para aguas con profundidades menores de 100 metros;
- de 50 a 200kHz, para aguas con profundidades menores de 1.500 metros;
- de 12 a 50kHz, para aguas con profundidades de 1.500 a 3.000 metros.

En cambio, las frecuencias de los perfiladores de subfondo están por debajo de los 8kHz.

La longitud de la onda ( $\lambda$ , Fig. 1) es la distancia horizontal entre dos compresiones máximas sucesivas, o bien, la distancia que la onda viaja en un ciclo de vibración completo. Es el espacio elemental entre dos puntos en la media, sometiéndose al mismo estado de vibración, con un retraso de período  $T$ , o cambio de fase de  $2\pi$ . Esta es la distancia recorrida por la onda durante un periodo de la señal, con velocidad  $c$ , donde:

$$\lambda = cT = c/f(1.2)$$

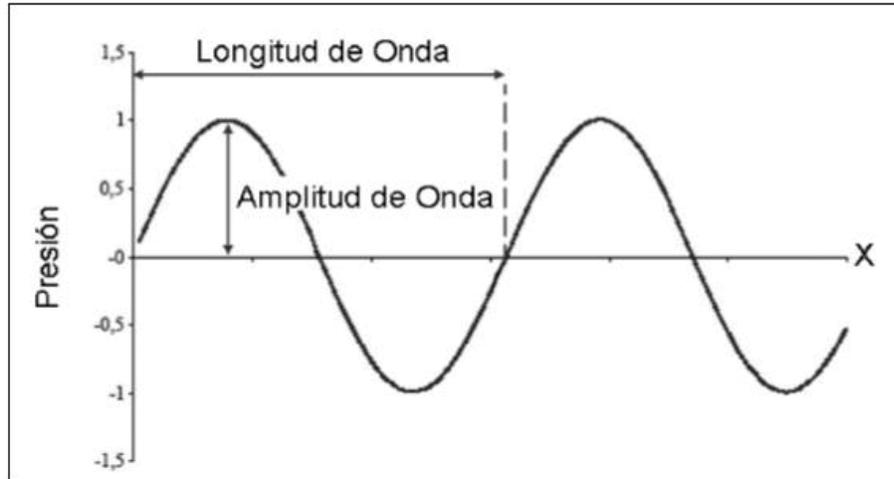
Para una velocidad del sonido de  $1.500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la longitud de onda subacuática debería ser de 150m a 10Hz, de 1,5m a 1kHz y de 0,0015 m a 1MHz. Estos valores de longitudes de onda y frecuencias corresponden a diferentes procesos físicos, ambos por la propagación de la onda en el agua y por las características del sistema acústico en sí mismo. Las principales restricciones en las frecuencias usadas en diferentes aplicaciones, son las siguientes:

- La atenuación del sonido de la onda en el agua limita el rango máximo usable, cuyo efecto se incrementa muy rápidamente con la frecuencia.

- Las dimensiones de la fuente de sonido, las cuales se incrementan a frecuencias más bajas, para una determinada potencia de transmisión.
- La selectividad espacial relacionada con la directividad de las fuentes y receptores acústicos, mejorando (para un tamaño de transductor dado) al aumentar la frecuencia.
- La respuesta del objetivo acústico, depende de la frecuencia. Así, un objeto debería reflejar menor energía si las dimensiones relativas del objeto son menores que la longitud de onda acústica.

Dentro de los sistemas acústicos más comunes en el sistema subacuático, las frecuencias mayores pertenecen a los perfiladores Doppler de corrientes marinas, con valores mayores a 1.000kHz. Las frecuencias menores corresponden a sonares pasivos militares con frecuencias más bajas que 0,1kHz. Un perfilador de subfondo trabaja en el rango de los 1 a los 10kHz, típicamente (Lurton, 2010). Esto equivale a que un perfilador de subfondo trabaja con valores de longitud de onda de entre 0,15 y 0,75m.

La elección de una frecuencia determinada es una característica muy importante, en la medida que se determine conjuntamente el proceso de ganancia. El ancho de banda usual está en el rango típico de 1 a 5kHz, que corresponde al tiempo de resolución entre 1 y  $0,2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Summerhayes & Thorpe, 1996).



**Figura 1.** Esquema de una onda acústica dos de sus componentes: longitud de onda y amplitud. Onda acústica expresada en términos de presión versus distancia recorrida (*fide Barroso, 2010*).

### 1.2.5 La Ecuación de Onda

La propagación de ondas acústicas en los gases y líquidos sigue las leyes de la mecánica de fluidos. Su propagación está descrita por la ecuación de onda:

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.3)$$

Donde  $p$  es la presión acústica de propagación acústica en el espacio  $(x, y, z)$ , como una función del tiempo  $t$ , y  $c(x, y, z)$  es la velocidad de sonido local.  $\nabla^2$  es el operador laplaciano. Para una onda sinusoidal de frecuencia  $f_0$  ( $P(x, y, z, t) = p(x, y, z)e^{i\omega t}$ ), la ecuación de onda cumple la ecuación de Helmholtz.

$$\nabla^2 p + k^2(x, y, z) p = 0 \quad (1.4)$$

Donde,  $k=(\omega/c)$  es el número de onda y  $\omega = 2\pi f_0$ , es la frecuencia angular. Para una velocidad constante  $c(x,y,z) = c$  y la propagación restringida a una sola dirección  $x$ , la ecuación de Helmholtz se reduce a:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0 \quad (1.5)$$

La correspondiente solución es del tipo:

$$p(x, t) = p_0 e^{i\omega(t-x/c)} = p_0 e^{i(\omega t - kx)} \quad (1.6)$$

Con una constante de amplitud  $p_0$ , y una fase dependiendo de un espacio en la coordenada cartesiana  $x$ . La constante de fase superficial asociada a esta onda son planos ortogonales en la dirección  $x$ . Este tipo de ondas se le menciona con el nombre de onda plana.

La velocidad de desplazamiento de la partícula, se denomina con la expresión  $v(x,t)$  y la amplitud con  $a(x,t)$ .

La velocidad del fluido  $\mathbf{v}$  está relacionada con la presión acústica a través de la siguiente ecuación:

$$\nabla p = -\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \quad (1.7)$$

Donde  $\rho$  es la densidad media y  $\nabla$  es el operador de gradiente espacial (relacionado con el operador laplaciano por  $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ ). Para la propagación de una onda plana en la dirección  $x$ , la ecuación (1.7) da una relación simple entre la presión acústica  $p_0$ , la velocidad del fluido  $v_0$  y el desplazamiento  $a_0$ :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} \rightarrow p_0 = \rho c v_0 = \rho c \omega a_0 \quad (1.8)$$

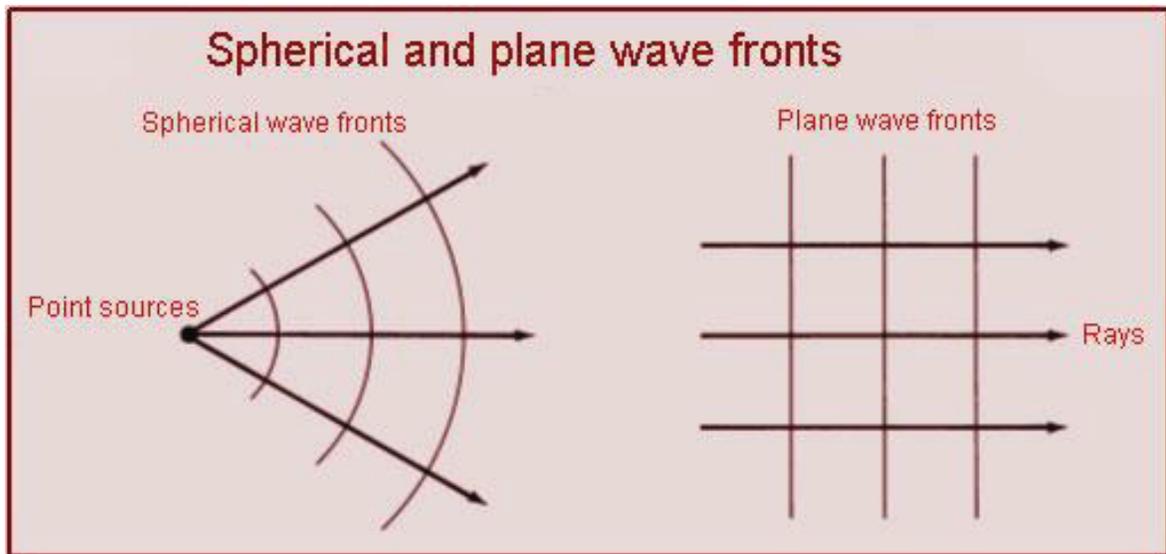
El producto  $\rho c$  es llamado la impedancia acústica del medio, y relaciona el nivel de presión acústica con el correspondiente movimiento de las partículas. Este parámetro se mide en Rayleighs (Rayl). En un medio de alta impedancia acústica, como la del agua ( $\rho c \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{Rayl}$ ), el movimiento de la partícula con una amplitud dada puede dar como resultado un nivel de presión mucho más alto que con una impedancia baja, como la del aire ( $\rho c \approx 0,4 \cdot 10^3 \text{Rayl}$ ) (Lurton, 2010).

Cuando consideramos la propagación en las tres direcciones espaciales de un medio isotrópico, la solución de la ecuación de onda para una fuente puntual es una onda esférica:

$$p(R, t) = \frac{P_0}{R} \exp [j\omega(t - R/c)] = \frac{P_0}{R} \exp [j(\omega t - kR)] \quad (1.9)$$

La variable espacial que se considera en la ecuación (1.9), es la distancia oblicua  $R$  a la fuente ( $R = 0$ ), y la amplitud de presión decrece en  $1/R$ , desde su valor  $p_0$  convencionalmente, considerado 1 metro alejado desde su fuente.

Las ondas planas y esféricas son dos herramientas básicas para modelar la propagación de las ondas acústicas. Las ondas planas son las más fáciles de modelar. Ellas se usan con una amplitud aproximada a una constante, y los frentes de onda muestran una curvatura despreciable. Estas condiciones son satisfechas suficientemente lejos de la fuente de sonido, para el modelamiento de procesos locales. Las ondas esféricas describen un campo de ondas transmitido en un rango corto por fuentes puntuales (Fig. 2) (es decir, suficientemente pequeño comparado con la longitud de onda), o cuando se debe tomar en cuenta la disminución de la amplitud con la propagación desde la fuente.



**Figura 2.** Frentes de onda esféricos (izquierda) y planos (derecha) (Aparicio *et al.*, 2011).

Cuando el movimiento particular elemental es paralelo a la dirección de propagación, las ondas son denominadas ondas de presión (ondas longitudinales o también como ondas de compresión).

### 1.2.6 Potencia e Intensidad

La propagación de una onda de sonido está asociada con una energía acústica. Esta energía puede ser descompuesta en una parte cinética (correspondiente al movimiento de partícula) y una parte potencial (correspondiente al trabajo que se logra por fuerzas de presión elástica) (Lurton, 2010).

La intensidad acústica  $I$ , es el valor promedio de flujo de energía, por unidad de superficie y tiempo. Es igual al promedio del producto de la presión acústica con la velocidad del fluido (Lurton, 2010). Para una onda plana de amplitud  $p_0$  y un valor de RMS (media cuadrática)  $p_{RMS} = p_0/\sqrt{2}$ , esto se expresa como:

$$I = \frac{P_0^2}{2\rho c} = \frac{P_{RMS}^2}{\rho c} \text{ (en Watts} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \quad (2.0)$$

La potencia acústica  $P$  recibida por una superficie  $\Sigma$  es la intensidad corregida por la superficie considerada. Para una onda plana, esto sería:

$$P = I \cdot \Sigma = \frac{P_0^2 \Sigma}{2\rho c} = \frac{P_{RMS}^2 \Sigma}{\rho c} \text{ (en Watts)} \quad (2.1)$$

### 1.3 ATENUACIÓN

La atenuación es la pérdida en la energía de una onda propagándose, debido a: la absorción, el despliegue esférico (o divergencia geométrica) y la dispersión por las partículas en la columna de agua (IHO, 2005).

Estas pérdidas se engloban en un parámetro denominado pérdidas por transmisión, TL (transmission loss). La atenuación por absorción de la señal acústica en el agua, en una primera aproximación, es proporcional a la frecuencia.

A más alta frecuencia, mayor será la atenuación y, por consiguiente, es más bajo el alcance y la penetración en el fondo marino (Aparicio *et al.*, 2011).

#### 1.3.1 Atenuación Geométrica

La propagación de una onda acústica desde su fuente de sonido expande la transmisión de la energía acústica sobre una superficie cada vez más grande. Ya que la energía se conserva, la intensidad decrece proporcionalmente al inverso de la superficie. Este proceso es conocido como *pérdida por expansión geométrica*.

El caso más simple y más útil, es el caso homogéneo, en medio infinito, con una fuente de dimensión pequeña irradiando en todas direcciones (fuente puntual). La energía transmitida es conservada, pero es expandida sobre esferas de radios cada vez más grandes.

El decrecimiento en la intensidad acústica local entre los puntos (1) y (2), es inversamente proporcional a la razón de las superficies  $\Sigma_1$  y  $\Sigma_2$  de las esferas:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{(P / \Sigma_2)}{(P / \Sigma_1)} = \frac{\Sigma_1}{\Sigma_2} = \frac{4\pi R_1^2}{4\pi R_2^2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \quad (2.2)$$

Donde  $R_i$  son las distancias radiales desde la fuente. Por lo tanto, la intensidad decrece con  $1 \cdot R^{-2}$ , y la presión con  $1 \cdot R^{-1}$ . Esta es la dependencia de la amplitud con el rango, ya introducido para las ondas esféricas. La pérdida por expansión, considerada desde una distancia de referencia unitaria ( $R_{1m} = 1m$ ), se expresa en dB a través de la siguiente expresión:

$$TL = 20 \log \left( \frac{R}{R_{1m}} \right) \quad (2.3)$$

La pérdida por expansión esférica se expresa comúnmente como  $TL = 20 \log R$ , sin indicar una distancia de referencia. Aunque incorrecto, este uso es conveniente y extendido.

### 1.3.2 Atenuación por Absorción

El agua de mar es un medio de propagación disipativo. Es decir, absorbe una parte de la energía de la onda transmitida, la cual es disipada a través de la viscosidad o reacciones químicas. El decaimiento de la amplitud local es proporcional a la propia amplitud. Luego, la presión acústica decrece exponencialmente con la distancia. Esta pérdida se agrega a las pérdidas por expansión. Por ejemplo, para una onda esférica, la presión resulta ser:

$$p(R, t) = \frac{P_0}{R} \exp(-\gamma R) \exp \left[ j\omega \left( t - \frac{R}{c} \right) \right] \quad (2.4)$$

En este caso la atenuación es cuantificada por el parámetro  $\gamma$  (expresado en Neper·m<sup>-1</sup>). El decrecimiento exponencial de la presión da una pérdida en dB proporcional al rango. Esto se expresa convenientemente a través de un coeficiente de atenuación  $\alpha$ , en decibelios por metro (dB·m<sup>-1</sup>), lo cual se relaciona con  $\gamma$  a través de  $\alpha = 20\gamma \log e \approx 8,686\gamma$ . En la práctica, la atenuación del sonido en el agua de mar es dimensionada de mejor manera expresándose en dB/km.

Durante la propagación de la señal acústica, parte de la energía de ésta pasará al medio en forma de calor. Este proceso se conoce como absorción por el medio, y consta de dos contribuciones principales: la viscosidad del agua y procesos de relajación. En agua dulce sólo aparece la primera de las contribuciones, mientras que la segunda aparece en agua salada, debido a los procesos de relajación iónica del sulfato de magnesio y del ácido bórico (Aparicio *et al.*, 2011).

La relajación molecular consiste en una disociación iónica de los componentes en la solución (aquí el MgSO<sub>4</sub> y H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), debido a las variaciones de la presión local provocadas por la onda acústica. Este proceso es dominante para absorción de sonido en el agua de mar.

Desde los inicios de la acústica subacuática, una gran atención ha sido puesta en modelar los coeficientes de absorción. El más reciente tiene la siguiente forma:

$$\alpha = C_1 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + C_2 \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + C_3 f^2 \quad (2.5)$$

Los primeros dos términos de esta fórmula muestra las contribuciones de los dos procesos de relajación; el tercero corresponde a la viscosidad del agua pura. Las frecuencias de relajación  $f_i$  y los coeficientes  $C_i$  dependen de la temperatura, presión hidrostática y la salinidad. Estos se determinan por experimentos en laboratorios o en el mar (Lurton, 2010).

Una de las expresiones más utilizadas es la de Thorp (1967) y es válida hasta frecuencias de algunos kilohercios: donde  $\alpha$  tiene unidades de  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$  y  $f$  es la frecuencia de la señal en kHz.

$$\alpha = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f} + 2.75 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 + 0.003 \quad (2.6)$$

El último término es una corrección que tiene en cuenta la absorción a muy baja frecuencia, siendo esta ecuación válida para una temperatura de 4°C y una profundidad de 900m, que es donde se hicieron las mediciones.

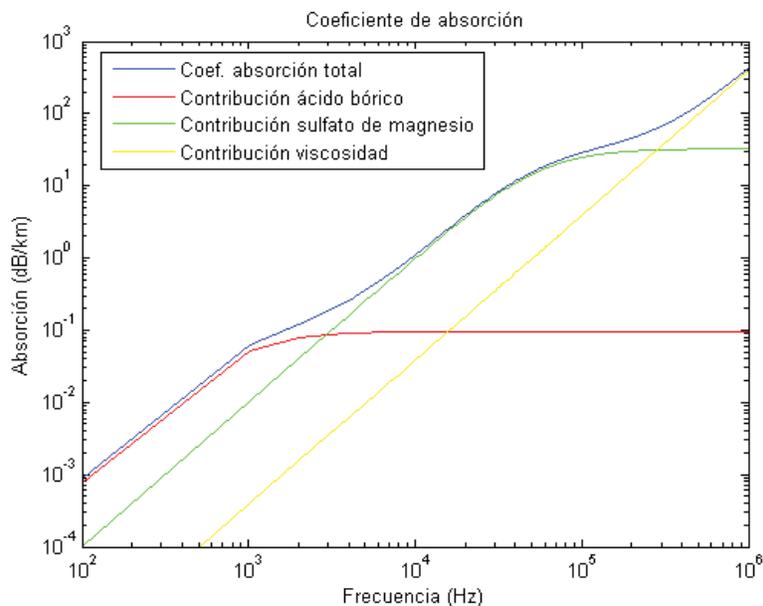
Otra expresión más moderna, es la suministrada por Francois & Garrison (1982a, 1982b), válida para frecuencias entre 100Hz y 1MHz, y que se expresa según la ecuación (2.7), donde  $\alpha$  tiene unidades de  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$  y  $f$  es la frecuencia de la señal en kHz.

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (2.7)$$

El primer término proviene de la contribución del ácido bórico, el segundo de la contribución del sulfato de magnesio y el tercero de la viscosidad del agua,  $f_1$  y  $f_2$  son las frecuencias de relajación del ácido bórico y el sulfato de magnesio, respectivamente, en kHz, y los coeficientes  $A_i$  y  $P_i$  dependen del pH, la salinidad, la profundidad, la temperatura y la velocidad del sonido.

Mediante la ecuación de Francois-Garrison se ha obtenido la gráfica que se muestra en la Figura 3, donde se representa la variación del coeficiente de absorción con la frecuencia, para el rango comprendido entre 100Hz y 1MHz.

Este resultado se obtuvo para un pH de 8, salinidad de 35psu, temperatura de 5°C y una profundidad de 0m. Se obtuvo una conclusión importante a la vista de la Figura 3: para realizar transmisiones a grandes distancias, del orden de varios kilómetros, habría que emplear frecuencias del orden de decenas de kHz, como máximo, puesto que en caso contrario la absorción será demasiado grande. Para transmisiones a distancias cortas, menores de 1 km, se pueden emplear frecuencias del orden de cientos de kHz (Aparicio *et al.*, 2011).



**Figura 3.** Variación del coeficiente de absorción con la frecuencia (Aparicio *et al.*, 2011).

Ambas pérdidas, por absorción y por expansión esférica, son tomadas en cuenta en la ecuación del sonar. Por otra parte, las pérdidas por dispersión dependen de las partículas o cuerpos presentes en la columna de agua.

La dispersión es causada principalmente por los organismos marinos, que consiste en una capa de plancton cuya profundidad varía a través del día (IHO, 2005).

En conjunto, la atenuación por expansión y por absorción, se denomina atenuación por transmisión, la cual es función de la distancia recorrida. Debido a la relación entre la energía acústica y la amplitud de la onda acústica, a medida que una onda acústica es atenuada, su amplitud se reduce.

El nivel de amortiguamiento de la onda acústica depende de su frecuencia: mientras más baja sea la frecuencia, menor atenuación sufrirá la onda (Jong *et al.*, 2002). Por ejemplo, una onda acústica de un sonar típico que opera a 12kHz perderá 27% de su energía al viajar 100 metros a través del agua, mientras que un sonar que opera a 200kHz perderá 99% de su energía al viajar la misma distancia a través del agua (Barroso, 2010).

### 1.3.3 Atenuación Convencional

La corrección de la atenuación por expansión esférica, es sistemáticamente usada como una primera aproximación cuando se evalúa la menor propagación y el rendimiento de los sistemas acústicos subacuáticos. En dB, la pérdida por transmisión es:

$$TL = 20 \log \left( \frac{R}{R_{1m}} \right) + \alpha R \quad (2.8)$$

Donde el nivel de referencia es considerado al rango de 1 metro de referencia  $R_{1m}$  en un medio disipativo no homogéneo. Sin embargo, el término más simplificado que se usa es el siguiente:

$$TL = 20 \log R + \alpha R \quad (2.9)$$

Todos los sistemas que utilizan el eco retrodispersado (backscattered) desde un objetivo están sometidos a pérdidas por propagación tanto en la trayectoria emitida, como en la recibida. La pérdida total es igual a:

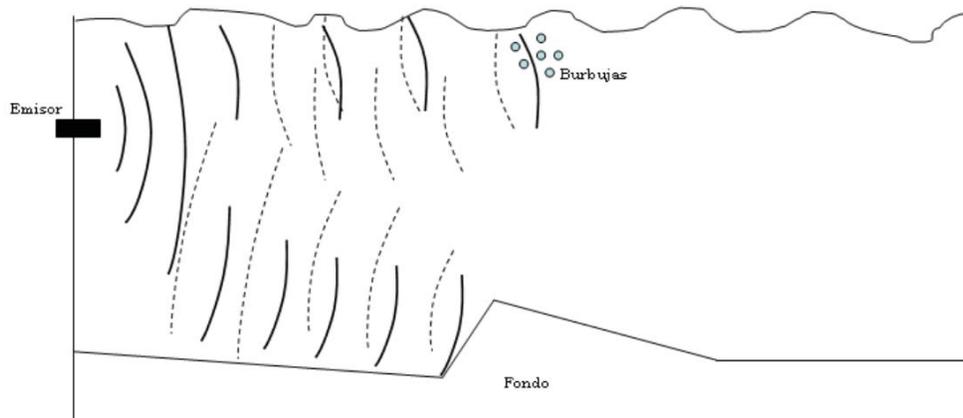
$$2TL = 40 \log R + 2\alpha R \quad (3.0)$$

Donde  $R$  está expresado en metros, mientras que  $\alpha$  se usa en  $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ , y las unidades deben ser convertidas apropiadamente.

Estas fórmulas son suficientes para evaluar el rendimiento de los sistemas acústicos subacuáticos. Sin embargo, algunas aplicaciones requieren modelos de propagación adaptados específicamente. En particular esto es necesario donde las variaciones de velocidad espacial inducen refracción en las trayectorias de propagación, o cuando las interfaces generan múltiples trayectorias concurrentes, dado que entonces la expansión geométrica no puede ser aproximada únicamente por expansión esférica (Lurton, 2010).

### 1.3.4 Scattering

Un mecanismo que aparecerá siempre será el scattering. El scattering es la energía dispersada en otras direcciones como resultado de la interacción de las ondas acústicas con el medio, como los rebotes en las superficies o el encuentro de las ondas con partículas en suspensión en el agua. La Figura 4 muestra un ejemplo de distintos procesos de scattering, donde la señal emitida aparece con frentes de ondas como trazo continuo; y como trazo discontinuo aparecen los frentes de onda de la señal de retorno que provoca el scattering.



**Figura 4.** Proceso de scattering debido a la interacción de las ondas acústicas con la superficie del mar, con el fondo marino y con una pequeña región con burbujas presente en la columna de agua (Lurton, 2010).

Se pueden considerar dos tipos de scattering: volumétrico y superficial. El scattering volumétrico se produce en el volumen de agua, donde tiene lugar la propagación, y se debe fundamentalmente a las partículas en suspensión y a la existencia de vida marina. Hay que destacar especialmente la contribución al scattering volumétrico de la capa de dispersión profunda (deep scattering layer o DSL), causada por la concentración de pequeños organismos marinos, y que proporciona un nivel de scattering superior al resto de la columna de agua.

Debido a este origen biológico, la capa de dispersión profunda tiene un comportamiento variable en lo que respecta a su profundidad a lo largo del día, en función del movimiento de los animales, y a la respuesta que proporciona a diferentes frecuencias de la señal acústica, en función del tamaño de estos, lo que muestra que está formada por diversas subcapas.

En tanto, el scattering superficial procede del scattering producido por la interacción de las ondas acústicas con las superficies y partículas próximas a ellas, como sedimentos o capas de burbujas introducidas por las olas o el paso de los barcos, por ejemplo.

En lo que respecta a la superficie del mar, el nivel de scattering depende de la frecuencia, el ángulo de incidencia y la irregularidad de dicha superficie, donde esta irregularidad, a su vez, depende de la velocidad del viento en la superficie. Si existe además una capa de hielo sobre esta superficie, la reverberación producida será mayor. En el fondo marino, el nivel de scattering dependerá además del material del que está formado: fondos rocosos provocan más reverberación que fondos arenosos. La contribución del fondo a la reverberación es la más compleja de predecir, puesto que la interacción de las ondas acústicas con el fondo es la más complicada de resolver (Aparicio *et al.*, 2011).

### 1.3.5 Efecto de Burbujas de Aire

Las burbujas de aire en el agua de mar son provocadas por los movimientos superficiales, pero también por el desplazamiento de cascos de barcos en la superficie del mar. Ellos forman una capa heterogénea, llegando a la superficie, cuya mezcla de fase dual (agua y gas), modifican local y fuertemente las características acústicas de la propagación media (velocidad y atenuación). Este proceso decrece en importancia cuando se incrementa la profundidad, debido a la presión hidrostática, la cual contrarresta la existencia de burbujas. A profundidades de 10 a 20m, el efecto de las burbujas generadas en superficie puede ser despreciable (Lurton, 2010).

Esta perturbación local de la propagación tiene severas consecuencias en el rendimiento de los sonares montados en cascos. Entre ellos se cuentan:

- Atenuación adicional, junto con la absorción del agua de mar, provocada por el decaimiento de las señales transmitidas, y enmascaramiento de la recepción en los transductores.
- Modificaciones locales de la velocidad del sonido, provocando refracción dentro de la capa superficial.
- Ecos parásitos retrodispersados (backscattered), los cuales pueden ser comúnmente observados, por ejemplo, en los primeros momentos del registro de señales por medio del ecosonda.

Estos procesos pueden tener un impacto dramático en el rendimiento de un sensor acústico, posiblemente haciéndolo fallar completamente, como se observa a menudo en la práctica. Por tanto, es un factor importante a tener en cuenta. De acuerdo a su tamaño y densidad, las burbujas pueden simplemente decrecer lentamente en niveles de eco, pero ellas también pueden hacer decaer gradualmente la calidad de las mediciones, finalmente induciendo a la pérdida de detección o a la detección de ecos parásitos.

Por otra parte, las burbujas de gas presentes en el agua acaban formando parte de los procesos de compresión y rarefacción de la onda, donde la magnitud de esta respuesta a la señal acústica dependerá de la frecuencia y del tamaño de las burbujas. En este proceso, las ondas acústicas pierden energía en favor de las burbujas, que las radiarán en todas direcciones, provocando el scattering, que será máximo cuando las burbujas entran en resonancia.

Además de este efecto, y aunque no es scattering, cabe mencionar que las burbujas de gas provocan la variación de la velocidad del sonido al pasar por una región donde esté presente una capa de burbujas. Si el tamaño de las burbujas es menor que el de resonancia para la frecuencia de la señal, la burbuja se comprime durante la fase de compresión de la onda acústica. Entonces, se reduce el módulo de compresibilidad y se reduce, por tanto, la velocidad del sonido. Si el tamaño es mayor, la burbuja se dilata durante la fase de compresión, aumenta el módulo de compresibilidad y aumenta por tanto la velocidad del sonido. Estas variaciones locales de la velocidad del sonido afectarán a la forma del perfil de velocidad del sonido, con las consecuencias que esto conlleva (Aparicio *et al.*, 2011).

#### **1.4. EFECTO DOPPLER**

El efecto Doppler es el cambio aparente de frecuencia de una onda producida por el movimiento relativo de la fuente en relación a su observador (receptor). Todo esto se provoca después de la propagación, debido al cambio en la duración de la trayectoria de desplazamiento entre la fuente y el receptor, o a su vez entre la fuente y el objetivo.

Considérese una fuente de transmisión, como los pulsos de Dirac, con un periodo regular  $T$ , hacia un receptor, a una distancia  $D$ . Si  $D$  no varía con el tiempo, el receptor capta cada pulso después de un tiempo de retraso constante  $t = D \cdot c^{-1}$ . El período de la señal entonces no es modificado, y la frecuencia aparente permanece como  $f_0 = T^{-1}$  (Lurton, 2010).

A la inversa, si  $D$  decrece (por ejemplo) con el tiempo como  $D(t) = D - v_r t$ , debido a la velocidad relativa  $v_r$  entre la fuente y el receptor, el retraso en tiempo entre los pulsos recibidos también cambiará.

Si el primer pulso (transmitido en  $t = 0$ ) arriba en el tiempo  $t_1 = D(t_1)/c$ , el segundo pulso (transmitido en  $t = T$ ) arriba en el tiempo  $t_2$  dado por:

$$t_2 = T + \frac{D(t_2)}{c} = T + \frac{D(t_1) - v_r(t_2 - t_1)}{c} \quad (3.1)$$

El tiempo de retraso entre las dos sucesivas recepciones es entonces:

$$t_2 - t_1 = \frac{T}{1 + v_r/c} \quad (3.2)$$

Lo cual es entonces ligeramente menor que  $T$ , dado que el rango de propagación ha decrecido a lo largo del tiempo de transmisión. La frecuencia aparente del pulso arribado será modificada como:

$$f = \frac{1 + v_r/c}{T} = f_0 \left( 1 + \frac{v_r}{c} \right) \quad (3.3)$$

Esta variación de frecuencia es el efecto Doppler. El corrimiento en frecuencia  $\delta f$  es entonces:

$$\delta f = f_0 \frac{v_r}{c} \quad (3.4)$$

Donde:  $v_r$  es positiva cuando se mueve acercándose; y es negativa cuando se mueve alejándose.

Para un eco desde un objetivo, a medida que el sonido viaja en ambos sentidos (de ida y de vuelta), el corrimiento en frecuencia viene dado por:

$$\delta f = 2 f_0 \frac{v_r}{c} \quad (3.5)$$

Dada la naturaleza del medio acuático, el emisor o el receptor (o ambos) pueden estar en movimiento al realizar las mediciones, como por ejemplo, en un barco (Figura 5). En ese caso, se produce el efecto Doppler, consistente en un desplazamiento de la frecuencia. Si la señal puede recorrer distintas trayectorias (multitrayectoria), aparecen diferentes desplazamientos Doppler, que dan lugar a un ensanchamiento del espectro en el receptor.

Además, aunque los instrumentos estuvieran perfectamente quietos, puede existir también un ensanchamiento Doppler debido al movimiento de masas de agua mientras se transmite la señal, como el que se da en las olas, que alteran la superficie de reflexión.

Otra contribución puede venir por las corrientes internas, provocando el desplazamiento de masas de agua, lo que afectará a la propagación acústica.

Para evitar las consecuencias de este ensanchamiento, la duración de la señal debe cumplir la relación dada en la expresión:

$$\frac{1}{T} \gg B \quad (3.6)$$

Donde  $T$  es la duración de la señal y  $B$  el ensanchamiento Doppler. Este ensanchamiento Doppler aumenta con la frecuencia, por lo que es de especial importancia en distancias cortas (un kilómetro o menores), donde se pueden emplear varias decenas de kHz.

El ensanchamiento Doppler resulta de interés junto al retardo asociado a la multitrayectoria, que aparece debido a los rebotes en la superficie y a la refracción de los rayos hacia la profundidad del mínimo de la velocidad del sonido, por lo que la disposición del emisor y el receptor es crítica. El retardo de multitrayectoria es el tiempo entre la llegada de la primera señal y la del camino más largo.

## 1.5 VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL OCÉANO

De forma rigurosa, la velocidad del sonido se obtiene a partir de la ecuación lineal de ondas, y su valor es el que aparece en la ecuación:

$$c^2 = \gamma \frac{B_T}{\rho_0} \quad (3.7)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\gamma$  es el índice adiabático,  $B_T$  es el módulo de compresibilidad isotérmico y  $\rho_0$  la densidad de equilibrio.

### 1.5.1 Parámetros de Velocidad del Sonido

La velocidad del sonido depende de 3 grandes factores: temperatura, salinidad y presión hidrostática (que a su vez depende de la profundidad).

- *Temperatura.* Globalmente, la temperatura del agua de mar decrece desde la superficie hacia el fondo; pero hay muchas variaciones dentro de esta tendencia general. La variabilidad en el tiempo y en el espacio en capas más profundas decrece con la profundidad. El promedio de temperatura es más o menos estable, en general la temperatura en el océano, decrece muy lentamente con la profundidad y varía muy poco de un lugar a otro. Un cambio en el promedio de la temperatura provocaría cambios acústicos locales.

- *Profundidad.* La presión hidrostática hace que la velocidad del sonido se incremente con la profundidad, debido a variaciones en el coeficiente de compresibilidad. Este incremento es lineal, como primera aproximación, de alrededor de  $0,017\text{ms}^{-1}$  por cada metro en aumento en la profundidad.
- *Salinidad.* El agua de mar está hecha por una mezcla de agua pura y sales disueltas. El porcentaje de masas de sales definen la salinidad, expresada actualmente como “*Salinidad Absoluta*” que es la fracción de masa de sal presente en el agua de mar, expresada en g/kg. Este concepto reemplazó al anterior, denominado “*Salinidad Práctica*”, el cuál representaba una medición de la conductividad del agua (TEOS, 2015).

Se ha estimado que cuando la temperatura aumenta en un grado Celsius, la velocidad del sonido lo hace en 2-5 metros por segundo; si la salinidad se incrementa en 1psu, la velocidad presentará 1-4 metros por segundo de más; y si la presión sube 10 atmósferas, al bajar 100 metros de profundidad, el sonido registra 1-8 metros por segundo de aumento (Summerhayes & Thorpe, 1996).

### 1.5.2 Modelos de Velocidad del Sonido

Obtener una expresión donde queden reflejadas de forma clara las variaciones de la velocidad del sonido con la temperatura, salinidad y presión es complejo. De forma que lo habitual es expresar la velocidad del sonido mediante expresiones semi-empíricas, que dependerán entonces de las mediciones realizadas, existiendo un gran número de ecuaciones. Por ejemplo, una ecuación para el agua destilada es la expresada en la ecuación (Kinsler *et al.*, 2000):

$$c(P, t) = 1402,7 + 488 t - 482 t^2 + 135 t^3 + (15,9 + 2,8t + 2,4t^2) \left( \frac{P_G}{100} \right) \quad (3.8)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $t = T/100$ , con  $T$  como la temperatura en grados Celsius, y  $P_G$  la presión manométrica expresada en bares, donde un valor igual a 0 bar, indica una presión de equilibrio de 1,01325 bar (1 atm). Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 100°C, y presiones manométricas de entre 0 y 200bar.

El medio subacuático más utilizado en la propagación de las ondas acústicas es el océano (o los distintos mares), y por ello se hablará, por defecto, de fondo marino o fondo oceánico, así como de superficie del mar, aunque los resultados se pueden extrapolar a otros medios subacuáticos. El agua de mar es distinta de la destilada en lo que respecta a las variables que influyen en la velocidad del sonido, introduciendo otro factor más: la salinidad.

A lo largo de las últimas décadas, han surgido diferentes ecuaciones para expresar la velocidad del sonido en medios marinos, donde las más importantes son las ecuaciones de Del Grosso (1974) y de Chen & Millero (1977). Esta última ecuación fue reconocida por la UNESCO como el algoritmo estándar para calcular la velocidad del sonido para medios subacuáticos hasta el 2010.

La ecuación de Del Grosso (1974) se expresa, en su forma corregida posteriormente, según la ecuación (3.5). Los coeficientes  $\Delta C_i$  engloban a su vez a otros (un total de 18) que son función de la salinidad ( $S$ ), temperatura ( $T$ ) y presión ( $P$ ).

$$c(S, T, P) = 1402,392 + \Delta C_S + \Delta C_T + \Delta C_P + \Delta C_{STP} \quad (3.9)$$

Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 30°C, salinidades entre 30y 40 psu, y presiones entre  $0\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  y  $100\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

La ecuación de Chen & Millero (1977) en su forma corregida posteriormente se expresa según la ecuación (3.6), donde al igual que en el caso anterior, los coeficientes que aparecen engloban a su vez a otros (un total de 42), que dependen de la salinidad ( $S$ ), temperatura ( $T$ ) y presión ( $P$ ):

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P) \cdot S + B(T, P) \cdot S^{3/2} + D(T, P) \cdot S^2 \quad (3.10)$$

Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 40°C, salinidades entre 0 y 40psu y una presión entre 0 y 1000bar.

No existe una diferencia apreciable entre los resultados obtenidos por ambas ecuaciones en los rangos de validez donde se solapan. Por ejemplo, se puede estudiar cómo varían las velocidades obtenidas por ambas expresiones cuando se varía la temperatura.

En general, la variación de la salinidad con la profundidad es despreciable, salvo en regiones específicas como zonas polares o estuarios. La velocidad del sonido varía  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  por cada parte por mil que varía la salinidad, y ésta no suele variar más de 3psu en una región dada, y 10psu entre distintos océanos y zonas del mundo. Por otra parte, la velocidad del sonido varía  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  por cada grado Celsius, y  $1,6\cdot 10^{-6}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  por cada Pascal, donde, a su vez, tanto la temperatura como la presión dependen de la profundidad.

La variación de la velocidad del sonido con la presión puede parecer despreciable, pero ésta aumenta a un ritmo de 1atm por cada 10m de profundidad. A 1km la presión sería aproximadamente de 100atm, o lo que es lo mismo, 10.132.500Pa, de manera que la velocidad del sonido varía aproximadamente unos  $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  en el primer kilómetro. Este efecto es notable en los océanos, donde la profundidad puede alcanzar algunos kilómetros (Aparicio *et al.*, 2011).

La última actualización de la velocidad del sonido, dada por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (TEOS-10), entrega la siguiente expresión (IOC *et al.*, 2010), que constituye el nuevo estándar recomendado:

$$c = c(S_A, T, P) = \left( \left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_{S_A, \eta} \right)^{0,5} = (\rho\kappa)^{-0,5} = g_P \left[ \frac{g_{TT}}{(g_{TP}^2 - g_{TT} g_{PP})} \right]^{0,5} \quad (3.7)$$

Donde  $g$  es la función de Gibbs del agua de mar (IOC *et al.*, 2010) y  $g_i$  o  $g_{jk}$  son derivadas parciales de dicha función. Se debe tener en cuenta que, en las expresiones de la ecuación (3.7), el valor de la velocidad del sonido es de  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y la densidad tiene unidades de  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y se deduce que la presión en las derivadas parciales está en Pa y la compresibilidad isotrópica  $\kappa$  debe tener unidades de  $\text{Pa}^{-1}$ .

En el caso de la TEOS-10, la expresión concreta para la velocidad del sonido viene dada por la función `gsw_sound_speed` del software Gibbs-SeaWater (GSW) Oceanographic Toolbox, que está asociado con esta ecuación de estado y que se puede descargar desde <http://www.teos-10.org/software.htm>.

### 1.5.3 Mediciones de Velocidad del Sonido

Existen muchos tipos de aparatos que pueden ser usados para medir *in situ* la velocidad del sonido. Ejemplo de ello, son los velocímetros (sound velocity profiler), los cuales miden directamente este parámetro, a través de una onda de alta frecuencia, transmitida sobre una distancia exactamente calibrada. El instrumento es muy delicado, ya que debe ser sensible a contrastes provocados por variaciones importantes en temperatura y presión hidrostática. Esto puede provocar una precisión típica de unas pocas decenas de  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Cuando se necesitan mediciones hidrológicas exactas, la herramienta indicada es elCTD (Conductivity-Temperature-Depth). Esta se hunde en el agua desde un buque detenido, usando un cable y un winche. Este aparato entrega mediciones muy finas de temperatura, salinidad y presión, las cuales pueden ser convertidas a valores de velocidad del sonido usando ecuaciones como las 3.5 a 3.7. Estas mediciones, son típicas de campañas de oceanografía física, pero desafortunadamente toman bastante tiempo y muchas veces sirven para trabajar exclusivamente en la acústica submarina.

En este contexto, el equipo más común y simple de operar es el *batitermógrafo desechable*, que también se conoce como *XBT (Evpensible Bathy Thermograph)*. Este sensor solo mide la temperatura del agua, en función de la profundidad. En este caso, para obtener el perfil de velocidad del sonido (SVP) implica acceder al perfil de salinidad en forma independiente. Esto puede ser efectuado mediante un medidor de conductividad, integrado dentro del mismo dispositivo (lo cual es una sonda *XCTD*, más costosa y de uso menos extendido); El *XBT* es –lejos– el instrumento más popular para mediciones operacionales de perfiles de velocidad del sonido en el contexto de acústica submarina. Los modelos más utilizados pueden ser lanzados desde buques en movimiento.

Algunos barcos también son equipados con *termómetros* montados en el casco, *termosalinómetros*, o también *velocímetros*, los que pueden aportar información necesaria para computar los valores de velocidad del sonido junto a los transductores de los sonares. Estos datos, grabados en forma continua, complementan las mediciones hechas con SVP.

Es importante para una operación exitosa, cualquier sea el perfilador de velocidad de sonido, antes del despliegue, tener los parámetros correctamente almacenados con los estándares requeridos y ser calibrados con condiciones atmosféricas correctas para obtener mediciones confiables de la profundidad.

Se debe enfatizar que, durante la calibración de las compensaciones atmosféricas, un perfilador de velocidad del sonido no debe estar en un compartimiento presurizado o la calibración producirá errores en la compensación y por consiguiente, errores en las mediciones de profundidad. Antes del despliegue o lanzamiento, el perfilador debe estar en el agua durante aproximadamente 15 minutos para su estabilización termal. Además, y durante un lance para medir la velocidad del sonido, se recomienda que se mantenga una velocidad constante de arriado (Aparicio *et al.*, 2011).

#### 1.5.4 Perfiles Verticales de Velocidad del Sonido

Para propósitos de batimetría, los ambientes hidrológicos pueden a menudo ser aproximadamente *estratificados horizontalmente*. En este caso la velocidad del sonido se supone que depende estrictamente de la profundidad, lo cual simplifica de gran manera la modelación e interpretación de la propagación del sonido. Los perfiles de velocidad del sonido (SVP) resultantes pueden tener diferentes características a resaltar en la interpretación.(Lurton, 2010).

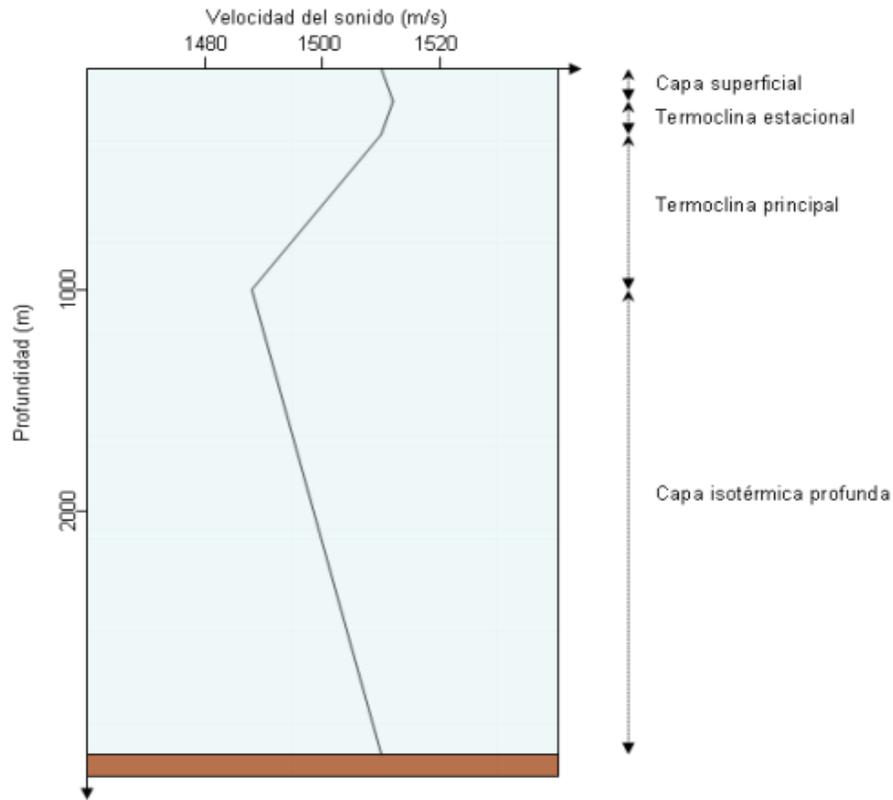
El perfil de velocidad del sonido para latitudes medias tiene la forma típica dada en la Figura 5. En la capa superficial se da un valor de velocidad de sonido más bajo con respecto a regiones más profundas.

Entre la capa superficial y la capa isotérmica profunda, se comienza a notar el efecto de la temperatura, ya que en esta zona el valor de temperatura es más bajo con respecto a la capa superficial, siendo este efecto más importante que el de la variación de la presión con la profundidad. Entre la superficie y los 100m aparece una zona expuesta a los cambios atmosféricos, ya sea el viento o cambios bruscos de temperatura y movimiento de masas de agua. Entre los 100m y los 200m se tiene una región donde los efectos estacionales sí son apreciables, de manera que la forma del perfil en esta región varía en función de la estación. Esta región se denomina termoclina estacional. La zona que se extiende desde los 200m a unos 1000m aproximadamente, se denomina termoclina principal, y en ella el efecto de las estaciones del año es despreciable. Este movimiento produce una mezcla que hace que esta región pueda considerarse como isotermal, a pesar de los cambios bruscos de temperatura que pueda sufrir. Por ello se denomina capa superficial o de mezcla.

Por su parte a grandes profundidades, la temperatura se mantiene prácticamente constante, de manera que, como la salinidad apenas varía con la profundidad, los cambios en la velocidad del sonido vienen dados casi por completo por la variación de la presión con la profundidad. En la Figura 5, este comportamiento se da hasta una profundidad en torno al kilómetro, donde se produce un mínimo en el valor de la velocidad del sonido. La región que ocupa desde el fondo oceánico hasta el mínimo, se denomina *capa isotérmica profunda*.

El perfil que se muestra en la Figura 5 es válido para latitudes medias, ya que de forma general varía con la latitud y las condiciones particulares del lugar. Por ejemplo, en una región polar no se produce el aumento de temperatura a medida que se aproxima la superficie, por lo que la capa isotérmica profunda se extiende hasta la superficie, y en otras zonas, la profundidad del mínimo de la velocidad del sonido puede ser menor al kilómetro.

Una vez que se conoce la forma del perfil de la velocidad del sonido, se puede determinar cómo se va a propagar la señal acústica por el medio subacuático. Debido al principio de Huygens y dada la forma del perfil de la velocidad del sonido, se forman zonas donde las ondas que surgen de los frentes de onda se propagarán a velocidades distintas en función de la profundidad a la que se encuentren dichos frentes. El efecto neto de la profundidad, es la curvatura de la onda acústica hacia la región donde la velocidad del sonido sea menor. La forma del perfil de la velocidad del sonido y este efecto de la curvatura de las ondas acústicas hacia las zonas donde esta velocidad es menor, es clave para la aparición de distintos tipos de propagación (Aparicio *et al.*, 2011).



**Figura 5.** Perfil de velocidad del sonido típico para latitudes medias (Aparicio *et al.*, 2011).

Estos diferentes componentes pueden combinarse para formar muy variados perfiles de velocidad del sonido, dependiendo de las condiciones ambientales:

- A escalas espaciales intermedias (*mesoescala*, decenas de kilómetros), los perfiles de velocidad promedio se ven modificados por la presencia de corrientes, frentes térmicos y remolinos. Estos procesos perturban fuertemente la propagación del sonido.
- En latitudes altas, la presencia en superficie de agua muy fría proveniente de deshielo causan un mínimo de velocidad muy notorio.
- Como un ejemplo de intercambio de masas de agua entre cuencas oceánicas, en el estrecho de Gibraltar, las aguas del Mediterráneo, instruyen hacia el Atlántico Noreste, generando una capa de agua más cálida y más salobre, con un marcado máximo local de velocidad del sonido entre los 1.000 y 2.000m de profundidad.

- Cerca de estuarios, la salida de agua dulce desde los ríos genera una capa somera de baja velocidad, induciendo perturbaciones importantes (la diferencia en velocidad del sonido entre agua dulce y agua de mar, a una profundidad y temperatura dadas, es del orden de  $40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Otros factores a tener en cuenta son las ondas internas y mareas internas, relacionadas con variaciones en la densidad del agua con profundidad. Cuando se propagan, pueden crear fluctuaciones de los perfiles de velocidad del sonido sobre escalas espaciales de miles de km de extensión.(Lurton, 2010).

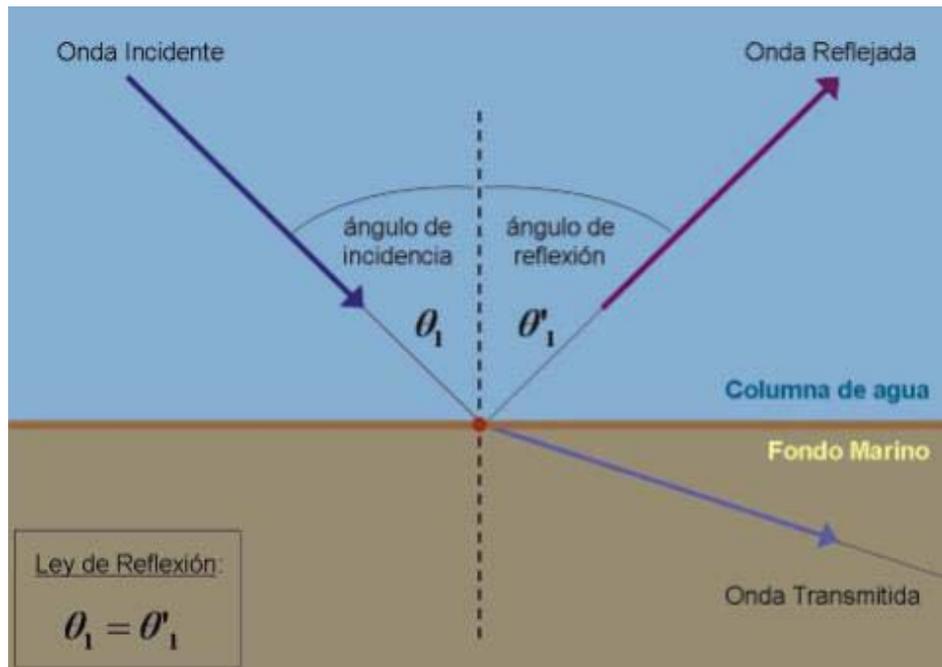
### **1.5.5 Reflexión en una Interface Plana**

La propagación de las ondas dentro de un objetivo medio, exhibe diferentes características de la onda incidente, debido a los cambios en la impedancia acústica que ocurre en la interface. Este proceso se denomina *reflexión* y puede ser expresado como un balance entre la onda incidente, la onda transmitida y la onda reflejada dentro del primer medio.

La onda acústica incide en el nuevo medio, en el punto de incidencia. En él, la energía que no penetra al nuevo medio, se aleja del punto de incidencia en una dirección distinta a la inicial. Por tanto la dirección en que se refleja la onda acústica, dependerá del ángulo de incidencia (Barroso, 2010).

La energía reflejada conserva la frecuencia característica de la onda emitida y, por tanto, a través de la frecuencia, puede ser individualizada al ser recibida.

Así, la ley de reflexión permite definir el ángulo de incidencia,  $\theta_1$ , medido desde la normal, hacia la onda incidente; y el ángulo de reflexión,  $\theta'_1$ , como el ángulo medido desde la normal, hacia la onda reflejada (Fig. 6). La ley de reflexión indica, además, que el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales.



**Figura 6.** Ley de reflexión. El ángulo incidente y el ángulo reflejado, ambos medidos respecto a una recta normal a la superficie de reflexión, son iguales (Barroso, 2010).

De acuerdo a la ley de Snell y, considerando dos medios con velocidades diferentes,  $c_1$  y  $c_2$ , si  $c_1$  es mayor que  $c_2$ , la dirección de propagación de la onda acústica es alterada y el ángulo de transmisión será más pequeño que el ángulo de incidencia. En contraste, si  $c_1$  es más pequeño que  $c_2$ , la dirección de propagación la onda acústica es cambiada y el ángulo de transmisión será mayor que el ángulo de incidencia.

Para la incidencia normal no ocurre refracción, es decir, el rayo transmitido al medio 2 sigue estando normal respecto de la interface. Para este parámetro y los fondos lisos, el coeficiente de reflexión para la presión,  $\mathfrak{R}$ , es obtenida por el coeficiente de la presión de amplitud de la onda reflejada y la presión de amplitud de la presión de la onda incidente (Aparicio *et al.*,2011).

## **1.6 REFLEXIÓN EN LA SUPERFICIE DEL MAR Y EN EL FONDO MARINO**

### **1.6.1 Reflexión y dispersión en la superficie del mar**

La rugosidad de la superficie del mar depende principalmente del viento. Además, la capa de burbujas, inmediatamente bajo la superficie y de un espesor de varios metros, perturba fuertemente la observación de procesos acústicos en la interface aire-agua. La capa de burbujas puede enmascarar completamente la superficie, causando una fuerte atenuación. Más aún, genera su propio efecto de retrodispersión (backscattering). Su existencia y su influencia están fuertemente correlacionados con la agitación de la superficie del mar (Lurton, 2010).

La interface entre el agua y el aire es un reflector casi perfecto, debido al amplio contraste de impedancia acústica entre ambos ambientes. Para estimar los procesos de reflexión y los procesos de dispersión, se puede aplicar directamente modelos de reflexión y dispersión coherentes.

Estos modelos deben ser completados considerando dos efectos causados por la capa superficial de burbujas: (1) la atenuación extra por ecos retrodispersados desde la superficie; (2) retrodispersión por nubes de burbujas.

### **1.6.2 Reflexión y dispersión en el fondo marino**

Los efectos acústicos en el fondo marino son mucho más complejos que los de la superficie. Se pueden observar muchos procesos diferentes, donde su grado de importancia depende de la frecuencia de la señal.

- Básicamente el fondo marino actúa como una interface rugosa, donde se dispersa la onda incidente de sonido. La onda retrodispersada desde la interface es la señal que se usa por todos los sonares de mapeo del fondo marino, excepto por los perfiladores de subfondo.
- Una parte notable de la energía incidente puede penetrar el piso marino, debido al bajo contraste de impedancia entre el agua y el sedimento. La absorción en sedimentos es mucho mayor que en el agua (típicamente  $0,1$  a  $1\text{dB}\cdot\lambda^{-1}$ ). Pero bajas frecuencias acústicas (pocos kHz y menores) pueden propagarse con niveles altos sobre rangos de decenas de metros de profundidad de penetración en el subfondo marino.
- Procesos similares a aquéllos de propagación hacia el agua pueden ocurrir dentro de los sedimentos (es decir, refracciones y reflexiones internas). El sedimento puede también mostrar perfiles de velocidad del sonido y densidad, con gradientes y discontinuidades debido a la existencia de distintas capas geológicas.
- Varias dispersores yacen en la interface, o están enterrados dentro del sedimento (ej.: piedras, conchas, organismos vivos, minerales, algas y burbujas de gas), los cuales generan una dispersión adicional específica.

Los procesos físicos, su interpretación y modelamiento, difieren de gran manera con la frecuencia considerada. A altas frecuencias, donde la penetración en el fondo es pequeña, la interacción está usualmente limitada a la superficie, con posibles complicaciones relacionadas con el tipo de fondo, estratificación o naturaleza heterogénea del sedimento.

Si la interacción permanece muy superficial (involucrando frecuencias mayores de unas pocas decenas de kHz) y si la estructura del lecho marino es relativamente simple, los procesos pueden ser descritos correctamente al combinar un modelo de reflexión en una interface plana con un modelo con la influencia del relieve.

A bajas frecuencias (bajo unos pocos kHz), se debe tomar en cuenta la interacción de la onda con la capa de sedimento de niveles más profundos, dado que la frecuencia es más baja. Los procesos significativos ya no son más las irregularidades del relieve y las pequeñas heterogeneidades del medio ambiente, sino más bien los perfiles de velocidad y densidad y, sobre todo, sus discontinuidades. Este último comportamiento acústico es ampliamente utilizado en geología y geofísica marina (exploración sísmica, perfilamiento de sedimentos). En la práctica, la energía acústica puede ser reflejada en las interfaces entre capas. También puede sufrir refracción debido al perfil de velocidad en los sedimentos.

Existen varios parámetros acústicos a tener en cuenta dentro de los sedimentos:

- el tamaño medio de grano;
- la porosidad (porcentaje de volumen de agua en el sedimento);
- la densidad (en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );
- la velocidad compresional relativa  $c_r$  (relativa a la velocidad del sonido en el agua);
- la velocidad compresional absoluta  $c$  para un valor en agua de mar de  $1500\text{ms}^{-1}$ ;
- el coeficiente de reflexión con incidencia normal en dB ( $20\log|V(0^\circ)|$ );
- el coeficiente de absorción de onda compresional  $\alpha$ , en  $\text{dB}\cdot\lambda^{-1}$ ;
- la velocidad de onda cizalla  $c_s$ , en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- la fuerza de aspereza espectral  $\Omega_0$ , en  $\text{cm}^4$ ;
- la desviación estándar de la rugosidad a lo largo de una distancia unitaria  $h$ , en cm;
- la desviación estándar de la pendiente de la rugosidad  $\delta$ , en grados.

**Nota: De aquí en más se presentarán diferentes tópicos relacionados con la estructura del SBP, llámese transductores e hidrófonos, también se introducirá el concepto de Ecosonda de Multihaz y por último se indicarán generalidades del equipo en términos de penetración, resolución, frecuencia, dominio del tiempo, entre otras.**

## **1.2.7 TRANSDUCTORES**

### **1.2.7.1 Principios fundamentales**

Los transductores son los equipos utilizados para la transmisión y la recepción de los pulsos acústicos. Ellos operan al convertir la energía eléctrica en energía mecánica, es decir, los transductores convierten los pulsos eléctricos de un generador de señal a vibraciones longitudinales que se propagan en la columna de agua como una onda de presión y viceversa (IHO, 2005).

En particular, si el equipo es usado sólo para la transmisión es llamado proyector y si es usado exclusivamente para la recepción, operado en modo pasivo, es llamado hidrófono.

Los transductores son uno de los componentes de los ecosondas. Por esta razón es particularmente importante saber los principios operativos, las características y los aspectos relacionados, como son: el ancho del haz, la directividad, la dirección del haz, la instalación y la cobertura.

Los transductores son clasificados en relación a su principio operativo, o sea, Magnetostrictivo, piezoeléctrico y electrostrictivo.

#### *1.2.7.1.1 Magnetostrictivo*

Estos transductores tienen un eje de hierro con un espiral de níquel. La corriente directa o continua, o el pulso a través del eje generan un campo magnético en el espiral que produce una contracción y consecuentemente una reducción de su diámetro. Cuando la corriente eléctrica a lo largo del eje se detiene, el espiral regresa a su tamaño original.

La aplicación de una señal de corriente alterna, a su vez genera contracciones y expansiones de acuerdo a las características de la señal aplicada. La amplitud de la vibración inducida será máxima si la frecuencia es igual o armoniosamente relacionada con la frecuencia natural del material del transductor o la frecuencia de la resonancia.

Este tipo de transductor es, sin embargo, menos eficiente que los transductores que operan con el efecto piezoeléctrico.

#### *1.2.7.1.2 Piezoeléctrico*

Estos transductores están hechos de dos platos con un fondo de cristales de cuarzo en el medio. La aplicación del potencial eléctrico a través de los platos produce una variación en el grosor del fondo de cuarzo (efecto piezoeléctrico). La alteración del potencial eléctrico causa la vibración del cuarzo y consecuentemente la vibración de toda la unidad. Recíprocamente, la compresión mecánica del cristal produce una diferencia potencial entre las caras opuestas del cristal. La amplitud de la vibración será máxima si la frecuencia del potencial eléctrico concuerda con la frecuencia natural del cuarzo.

#### *1.2.7.1.3 Electrostrictivo*

Estos transductores están basados en el mismo principio que los transductores piezoeléctricos. Sin embargo, los materiales usados (normalmente cerámicas policristalinas o ciertos polímeros sintéticos) no tienen naturalmente características piezoeléctricas, por lo que durante los procesos de fabricación necesitan ser polarizados.

Los transductores electrostrictivo son usados casi exclusivamente en la actualidad. Estos transductores son más livianos, reversibles y pueden también ser alineados.

## **1.2.8 FUENTES ACÚSTICAS SUBACUÁTICAS**

### **1.2.8.1 Transductores Tonpiliz**

La tecnología Tonpiliz es la que se utiliza con más frecuencia para las fuentes acústicas subacuáticas. Los platos cerámicos piezoeléctricos, separados por electrodos, son apilados bajo una presión estática impuesta por una barra de pretensado. El apilado es colocado entre una masa de cabecera y una masa de cola. Transmite al agua circundante vibraciones inducidas por un campo electromotriz aplicado a lo largo de los electrodos de la pila de discos piezoeléctricos. El sistema completo se cubre con un revestimiento de polímero dentro de una carcasa resistente al agua y se llena con aire con el fin de limitar la retrorradiación de la masa de cabecera (Lurton, 2010).

Una de las desventajas, es que este relleno de aire descarta el uso de transductores Tonpiliz a grandes profundidades, ya que la carcasa corre el riesgo de ser aplastada por la alta presión hidrostática. Si se rellena este espacio con aceite, se aumenta la profundidad de trabajo, aunque a expensas de una eficiencia más baja.

El tamaño de las cerámicas piezoeléctricas del transductor determina la frecuencia de resonancia, el nivel de transmisión y la impedancia eléctrica.

Por otra parte, los transductores Tonpiliz están basados en el concepto de resonancia. Ellos pueden lograr un alto nivel de transmisión con un buen poder de eficiencia, pero solo trabajan con un ancho de banda limitado. Estos transductores son muy utilizados en la mayoría de las aplicaciones con frecuencias típicas entre 2 y 50kHz. A frecuencias de alrededor de 1kHz y más bajas, el tamaño y peso de los transductores se hacen muy engorrosos para aplicaciones prácticas. A la inversa, a frecuencias muy altas, las dimensiones son tan pequeñas que se hacen difíciles de construir y se prefieren otras soluciones más simples.

Una reciente mejora en los diseños Tonpilz brinda una banda de frecuencias más ancha. Ésta está basada en el acoplamiento del conductor de resonancia clásico al modo de masa de cabecera flexural. Este concepto ha sido utilizado para incrementar la resolución en sondas de perfiladores de subfondo de banda ancha.

### **1.2.8.2 Transductores de Alta Frecuencia**

En los casos donde la tecnología de alta frecuencia Tonpilz ya no pueda ser usada, se utilizan bloques de cerámicas piezoeléctricas, dirigidos eléctricamente por electrodos de superficie. Se pueden construir muchas diferentes geometrías: varas o paralelepípedos, placas rectangulares o redondas y también anillos. Trabajan mejor a la frecuencia resonante de la cerámica constitutiva, determinada por el espesor entre los electrodos, que es igual a la mitad de la longitud de onda nominal. Este tipo de transductores es usado para frecuencias típicas superiores a 100kHz, pero se pueden alcanzar frecuencias más bajas hasta los 50kHz. Estos transductores son fuertemente resonantes, y su ancho de banda es menor que con respecto a la tecnología Tonpilz.

Si las dimensiones de un bloque elemental de cerámica no son suficientemente grandes, varias de ellos son empotradas al fijarlos en una estructura rígida. Las geometrías más comunes en estos casos son las rectangulares o anillos, dependiendo del tipo de directividad deseado. El comportamiento mecánico de la estructura rígida es muy importante, especialmente para arreglos receptores, dado que la estructura rígida limita la retrodispersión acústica, la cual debería ser lo más pequeña posible.

Para asegurar una buena radiación acústica desde las cerámicas hacia el agua, el conjunto completo, se moldea en una matriz elastomérica o se sumerge en una caja rellena con un fluido acústicamente transparente (el más común es aceite de ricino, “castor oil”). Este tipo de empaquetamiento de equipresión hace que estos transductores estén bien adaptados para grandes profundidades.

Otra posibilidad, para trabajar a altas frecuencias, es la tecnología de *cerámicas compuestas*. Se utilizan barras piezoeléctricas agrupadas para formar una forma de proyector dada y son sumergidos en una matriz de polímeros, asegurando rigidez mecánica. Esto hace que sea posible manufacturar transductores de varias formas con un rendimiento relativamente bueno en términos de eficiencia y ancho de banda.

### **1.2.8.3 Transductores de Baja Frecuencia**

A muy bajas frecuencias (bajo 1kHz), la tecnología de fuentes acústicas se encuentran con serias limitaciones. Los transductores deben ser capaces de resistir grandes amplitudes impuestas por la superficie de transmisión; y las limitaciones en el peso y el tamaño son muy difíciles de resolver.

Varias soluciones han sido propuestas, cada una adaptada para resolver un problema en particular. Algunas de éstas son:

- La extensión de la tecnología Tonpiliz para bajas frecuencias, con algunas modificaciones. Por ejemplo, el concepto *Janus* equipa al transductor Tonpiliz con dos proyectos repuestos, con limitada masa trasera. Este tipo de solución es particularmente adecuada cuando son requeridos altos niveles de transmisión.

- Fuentes basadas en la tecnología de resonador de *Helmholtz*. Estas son utilizadas comúnmente en oceanografía para experimentos de tomografía acústica. Un tubo de metal abierto es excitado en un extremo por un motor piezoeléctrico. La cavidad rellena de fluido resuena a una frecuencia dada por  $L=\lambda/4$ , donde  $L$  es la longitud del tubo. Inicialmente diseñada para frecuencias entre 250 y 400Hz, esta solución es simple, robusta, de bajo costo insensible a la presión hidrostática. Desafortunadamente, tiene poca eficiencia, una limitada potencia y un muy estrecho ancho de banda de frecuencia.
- Un resonador de Helmholtz puede acoplarse al transductor Janus, dando lugar al concepto *Janus-Helmholtz*. Acoplando la resonancia del transductor Janus con la del resonador de Helmholtz da lugar a un extenso ancho de banda y, al mismo tiempo, posee una eficiencia satisfactoria. Esto significa que la elasticidad dentro de la cavidad del resonador debe ser incrementada, usando ya sea tubos flexibles o un fluido compresible. Este mecanismo se ha utilizado en oceanografía física y sísmica marina.
- Tecnología *hidráulica* ha sido utilizada excepcionalmente, por ejemplo para experimentos de termometría acústica que requieren grandes transmisiones de banda ancha en torno de los 60Hz. Esta tecnología se adapta bien para bajas frecuencias, pero requiere de un alto poder eléctrico y de dispositivos de enfriamiento específicos. Por ello, no se adapta bien para fuentes autónomas (Lurton, 2010).

#### 1.2.8.4 Transmisión No-Lineal

Cuando una onda acústica es transmitida con un muy alto nivel de sonido, las zonas de alta y baja presiones en el medio de propagación crean variaciones locales en la velocidad del sonido. Luego, los máximos de presión se propagan ligeramente más rápido y los mínimos de presión lo hacen ligeramente más lento que la velocidad promedio. Por ello, la onda acústica se ve distorsionada y aparecen armónicos superiores, por sobre la frecuencia fundamental.

Los arreglos de transductores paramétricos están basados en este concepto de generación de ondas acústicas no lineales. Durante la transmisión simultánea, a altos niveles de sonido, de dos frecuencias cercanas ( $f_1$  y  $f_2$ ), la no linealidad de la propagación induce la aparición de dos ondas secundarias con frecuencias iguales a la suma y la diferencia de las dos frecuencias primarias (estrictamente:  $\frac{1}{2}[f_1+f_2]$  y  $\frac{1}{2}[f_1-f_2]$ ). Estas ondas secundarias tienen el patrón de directividad de las dos ondas primarias (altas frecuencias, luego altamente direccionales). Por ello es posible, al usar la onda secundaria de diferencia de frecuencias para obtener un haz muy estrecho (virtualmente sin lóbulos laterales), a baja frecuencia, usando una antena transmisora de alta frecuencias y de tamaño pequeño.

También es posible transmitir anchos de banda amplios en torno de la frecuencia secundaria al ajustar la diferencia entre las frecuencias primarias.

El patrón de radiación de un arreglo paramétrico puede ser representado conceptualmente de una manera simple (el modelo clásico fue establecido por Westerwelt (1963)) cerca de la antena, las ondas primarias definen un haz estrecho de alta intensidad, atenuándose con la distancia. A lo largo de su eje, este haz se comporta como una línea de fuentes a la frecuencia secundaria.

Todas estas muchas ventajas están contrarrestadas por una muy pobre eficiencia energética en la producción de ondas secundarias. Los niveles así generados son mucho menores que aquéllos obtenidos con antenas clásicas. Luego de muchos estudios teóricos y tests experimentales desde los años 1960, la acústica no lineal ha sido usada convincentemente en un número limitado de aplicaciones, donde los perfiladores de subfondo basados en este principio son el caso más emblemático.

Relacionado a este tópico, en la sección 1.3.1.2 se explica el concepto de señales “Chirp” y en la sección 1.3.3.1 se analiza con mayor detalle el funcionamiento de los perfiladores de tipo paramétrico.

### **1.3 HIDRÓFONOS**

Los hidrófonos son transductores receptores, diseñados para convertir presiones acústicas en señales eléctricas. Usualmente son dispositivos piezoeléctricos, a menudo hechos de zirconato-titanato de plomo (PZT), mostrando una buena sensibilidad y un bajo nivel de ruido interno. El sulfato de litio está reservado para hidrófonos que realizan mediciones a altas frecuencias.

Los hidrófonos físicamente grandes, son algunas veces hechos de difluoruro de polivinilideno (PVDF), un material versátil, el cual puede confeccionarse como placas muy grandes y es fácilmente moldeable como superficies curvas. Finalmente, como con los proyectores, se ha incrementado el uso de materiales piezoeléctricos usando elementos hechos de cerámica sumergidos en una matriz de polímeros.

A diferencia de los proyectores, los hidrófonos son a menudo capaces de trabajar sobre un amplio rango de frecuencias. Esto es debido a que ellos no necesitan actualmente ser sintonizados a una frecuencia resonante particular.

Normalmente, su eficiencia (razón entre la señal eléctrica de salida y la señal acústica de entrada) no es problemática, dado que la señal eléctrica siempre puede ser amplificada. Pero es imperativa que señales acústicas de bajo nivel de sonido puedan ser detectadas en medio del ruido interno del receptor. Los hidrófonos para mediciones son usualmente pequeños comparados con las longitudes de onda acústicas, y su frecuencia de resonancia es rechazada por sobre el límite superior de la parte plana de la respuesta en frecuencia (Lurton, 2010).

Por lo tanto muestran una baja selectividad espacial. Un patrón de directividad requerido puede ser obtenido al combinar varios hidrófonos dentro de un arreglo grande.

El mismo transductor es a menudo usado para transmitir y recibir en muchos sistemas de sonares (ej. ecosondas monohaz, correntómetros, sonares de barrido lateral). Aparte de esta ventaja práctica inmediata, en términos de simplicidad y costo, esta configuración mejora las características de directividad, dado que los dos patrones de directividad están combinados: esto particularmente se recomienda cuando los requerimientos de directividad puedan ser cumplidos con un arreglo geométrico de este tipo (Ayala *et al.*, 1985).

### **1.3.1 Clasificación Según su Instalación**

Los transductores acústicos submarinos son instalados normalmente en el casco de buques o en vehículos remolcados. Varios tipos de instalación son posibles para transductores montados en el casco:

- Montaje rasante (“flush-mounting”): la superficie radiante del transductor sigue la forma externa del casco sin discontinuidad y está cubierta con una ventana acústicamente transparente, asegurando protección, impermeabilidad y transmisión acústica hacia el agua. Obviamente, este tipo de instalación está reservada para transductores cuyas dimensiones sean compatibles con las restricciones geométricas de la forma del casco.

- Si la forma del transductor no cabe dentro del casco, debe ser instalado en una burbuja (“blister”) fijada bajo el casco. Uno de las restricciones es que esta modificación de la estructura no debe degradar el desempeño de la nave. La ventaja es la reducción del efecto del flujo de agua del casco en la cara de los transductores. La desventaja es la necesidad de una estructura especial para la instalación.
- El transductor puede ser instalado dentro de un domo fijado bajo el casco o en la proa de un buque. Esta solución (diseñada para los sistemas históricos ASDIC, que se destacaban por un domo retráctil) aún hoy en día son frecuentemente usados para sonares activos en buques navales.
- Para antenas grandes (por ejemplo ecosondas multihaces de baja frecuencia), las instalaciones “flush” o “blister” no suelen ser factibles y una solución es diseñar una cubierta externa especial. Generalmente consiste una estructura perfilada, frecuentemente con la forma de un ala delta de avión, fijada bajo el casco con soportes. Este montaje de góndola permite dimensiones horizontales muy grandes. Si la góndola está bien diseñada no afecta mucho la hidrodinámica del buque.
- Las ventajas son la reducción del ruido de la nave y la eliminación del flujo de agua en el casco en la cara del transductor, ya que pasa entre el casco y la góndola. Las desventajas son la necesidad de una estructura especial para la instalación y consecuentemente un aumento en el calado de la nave, del orden de un metro o más.
- Ocasionalmente, sistemas pequeños pueden ser desplegados a través del casco en tubos verticales especiales (“moon pool”). También es una solución flexible a bordo de naves pequeñas, y operando en condiciones de mar moderadas, el instalar el transductor en el extremo de una pértiga alineada verticalmente y fijada junto al casco. Esta instalación puede ser lograda a un costado o sobre la proa de la nave. La estructura de apoyo para el transductor debe ser rígida y resistente a la torsión(Aparicio *et al.*, 2011).

La instalación en un vehículo remolcado dedicado es preferible para ciertas aplicaciones. Las principales ventajas son un menor nivel de ruido (el ruido propio desde la nave se reduce), condiciones más favorables de propagación del sonido (debido a la evasión de las perturbaciones de las capas superficiales) y movimientos más pequeños que los que sufre un vehículo navegando en la superficie. Sin embargo, esto requiere de una maniobra de instalación especial y de procedimientos de despliegue y control en cubierta, y en muchos casos impone velocidades más bajas para el buque debido al vehículo que se remolca.

La instalación de los transductores siempre es una operación delicada, ya que su éxito (o fracaso) gobernará el buen trabajo del sistema de sonar completo. En el dominio de las frecuencias bajas, la instalación es complicada debido a que el tamaño de los transductores es muy grande (posibles dimensiones de varios metros), mientras que el medio ambiente no tiende a modificar demasiado sus características de trabajo, dadas las largas longitudes de onda involucradas.

A la inversa, en el campo de las altas frecuencias, la integración mecánica usualmente es más fácil gracias al pequeño tamaño de los transductores, pero los efectos del medio ambiente circundante pueden ser muy perjudiciales para los desempeños del sonar resultante, dado que las pequeñas longitudes de onda son fácilmente perturbadas por obstáculos mecánicos o perturbadas por resonadores o reflectores cercanos. Los transductores con desempeños satisfactorios al ser medidos en tanques de prueba pueden resultar decepcionantes si están instalados incorrectamente. Sin embargo, los principios básicos para instalación exitosa hoy en día son bien conocidos. El emplazamiento seleccionado debe cumplir varias condiciones:

- Bajas perturbaciones acústicas por ruido propio desde el buque. Luego la ubicación debe estar suficientemente lejos de la propulsión u otras fuentes principales de ruido.
- Mínimo riesgo de aireación, es decir, de enmascaramiento por plumas de burbujas buceando desde la proa y avanzando bajo la popa del casco. Esto se asegura al instalar el transductor suficientemente cerca de la proa.

- Por otra parte, debe evitarse el riesgo que el transductor, al estar muy cerca de la proa, emerja desde el agua, como resultado del movimiento de cabeceo del buque.
- Para los transmisores, éstos deben estar sumergidos a una profundidad suficiente para evitar fenómenos de cavitación.
- Limitación del largo del cable entre los transductores y la electrónica. En particular para transductores de recepción, la distancia a la electrónica de pre amplificación debe ser lo más corta posible para limitar los riesgos de interferencia eléctrica y degradación en la razón señal-ruido.
- Compatibilidad entre los varios sistemas acústicos, para evitar acoplamiento mecánico entre transductores y para minimizar la radiación acústica directa entre diferentes sistemas.
- Mínima perturbación de la hidrodinámica del buque
- Compatibilidad con requerimientos de operaciones en diques secos.

Sin embargo, estas condiciones pueden ser mutuamente excluyentes y la instalación final usualmente resulta en compromisos entre diferentes objetivos. Por ejemplo, las tres primeras condiciones de la lista anterior resultan en localizar el transductor a una distancia de la proa aproximadamente igual a un tercio del largo del casco. Más aún, ciertas operaciones del diseño aún son grandemente empíricas, dado que ninguna simulación, cómputo o prueba en tanque puede garantizar totalmente el resultado final (Ayala *et al.*, 1985).

#### **1.4 ELECONDA MONOHAZ**

Los ecosondas monohaz (single beamechosounder o SBES) son equipos para la determinación de la profundidad al medir el intervalo de tiempo entre la emisión de un pulso sónico o ultrasónico y el retorno de su eco desde el fondo marino. Tradicionalmente, el principal propósito del ecosonda es de producir una alta resolución vertical constante y del fondo marino, en el trazado del eco. El trazado del eco, después de una interpretación cuidadosa, digitalizado manualmente para producir los sondeos. Durante la última década,

la tecnología aplicada en el SBES ha mejorado progresivamente con los digitadores automáticos, los grabadores sin partes móviles y posiciones de anotación en el trazado de eco. Recientemente, las computadoras y los procesadores de señales han permitido que el procesamiento de las señales de tiempo real sea más sofisticado y la presentación de los datos o la visualización en color gráfico, en vez de un grabado en papel (Aparicio *et al.*, 2011).

Un ecosonda monohaz funciona al convertir la energía eléctrica, del generador de pulso, en energía acústica. Como los transductores no transmiten en todas las direcciones, la energía acústica es proyectada en el agua en forma de un haz orientado verticalmente. El pulso acústico viaja a través de la columna de agua y toca el fondo marino. La interacción con el fondo marino resulta en una reflexión, transmisión y dispersión.

La energía reflejada que regresa al transductor, el eco, es percibido por el mismo. La fuerza del eco disminuye rápidamente con el tiempo. Por esa razón el eco es ajustado automáticamente, de acuerdo a su nivel de energía, usando un Control de Ganancia Automática (AGC) o una Ganancia de Tiempo Variable (TVG) para compensarla atenuación del eco como una función de tiempo. Después de la amplificación la señal eléctrica es pasada a un detectorenvoltente y comparada para el ajuste del umbral para filtrar el ruido de la señal. La señal de salida es entonces visualizada o grabada. El resultado observable es el intervalo de tiempo entre la transmisión y la recepción del eco,  $t$ , siendo la profundidad medida dada por:

$$z_m = \left( \frac{t}{2} \right) \bar{c}$$

Donde  $\bar{c}$  es la velocidad del sonido promedio en la columna de agua.

## **1.5 PERFILADORES DE SUBFONDO**

### **1.5.1 Generalidades**

Los perfiladores de subfondo (sub-bottom profiler o SBP) son ecosondas diseñados para explorar las primeras capas de sedimentos bajo el fondo marino, sobre un espesor que comúnmente alcanza decenas de metros (excepcionalmente 100 metros o más en sedimentos blandos con un coeficiente de absorción bajo). Tecnológicamente, los SBP usualmente son ecosondas monohaz trabajando con un alto nivel de sonido y a baja frecuencia (en el rango 1-10kHz, comúnmente siendo 3,5kHz la frecuencia nominal de la señal). Los perfiladores de subfondo mayoritariamente usan técnicas de compresión en el pulso para mejorar el rango de penetración. Algunos modelos usan fuentes paramétricas no lineales, brindando una directividad muy estrecha a pesar que así se genere una frecuencia baja.

La señal del eco proviene desde la reflexión (no de la retrodispersión) de las interfaces entre capas, correspondiendo a discontinuidades de impedancia acústica. Los ecos colectados a lo largo del track del buque son yuxtapuestos gráficamente, reconstituyendo una sección transversal vertical de las capas de sedimento. Por años estos registros estuvieron limitados a una representación pictórica de las capas de sedimentos. Hoy en día, el procesamiento de las amplitudes de los ecos con SBP calibrados hace posible obtener los coeficientes de reflexión y los coeficientes de absorción asociados a las capas de los sedimentos a partir de la señal recibida (Lurton, 2010).

### **1.5.2 Principio de Funcionamiento**

Los perfiladores de subfondo están basados en un interesante concepto de medición híbrido entre sistemas de sonar y sísmico. Por una parte, la estructura general de su hardware es similar a ecosondas monohaz para batimetría o pesquería, con algunas notables diferencias en los principios de funcionamiento físico. Por otra parte, sus funcionalidades son más bien similares las de las herramientas de reflexión sísmica.

La función de un perfilador de subfondo es registrar ecos desde las interfaces entre capas de sedimentos. Estas interfaces corresponden a discontinuidades en impedancia acústica, generando reflexiones en la señal acústica.

En cada interface, una parte de la energía incidente es reflejada hacia la superficie y otra parte es transmitida hacia las capas más profundas. Similarmente a los ecosondas monohaz usados en batimetría, el movimiento horizontal de la plataforma de soporte permite reconstruir una sección transversal vertical del ambiente sedimentario investigado.

La sección transversal así obtenida es, en una primera aproximación, una imagen de las fronteras entre capas, es decir, de la morfología de las capas sedimentarias y de los rasgos enterrados. Esta imagen puede ser cuantificada al tomar en cuenta: (1) a lo largo de la dirección horizontal, la posición de la plataforma (usualmente en los tiempos de transmisión); (2) a lo largo de la dirección vertical, la penetración dentro de los sedimentos (a menudo expresada en segundos, siguiendo el uso de la sismología, pero trasladable a profundidad, al hacer supuestos acerca de valores de la velocidad de propagación dentro de los sedimentos). Esta representación gráfica es suficiente para muchas aplicaciones.

Si la cadena de adquisición está correctamente diseñada, implementada y calibrada, se puede tener acceso al nivel absoluto de los ecos desde el fondo y, por ello, a las características del fondo marino que actuaron en la recepción.

Luego, la representación gráfica de estructuras sedimentarias es complementada con una estimación de sus parámetros físicos accesibles para investigación acústica, tales como reflectividad, impedancia acústica y coeficiente de absorción (Theuillon *et al.*, 2008). Este potencial uso de los perfiladores de subfondo para caracterización del lecho marino ha relanzado el interés científico para tales dispositivos acústicos. En verdad, contrariamente a los testigos (“cores”), los cuales brindan mediciones locales de las propiedades del fondo marino, los datos de perfiladores de subfondo pueden ser de gran interés cuando se logran hacer estimaciones de las propiedades geoacústicas del fondo marino, tanto a lo largo del track del buque, como en la dirección vertical.

### 1.5.3 Señales “Chirp”

Una señal “Chirp” en su forma más simple consiste en una frecuencia transportadora modulada linealmente en el tiempo, limitada por una ventana rectangular de duración  $T$ :

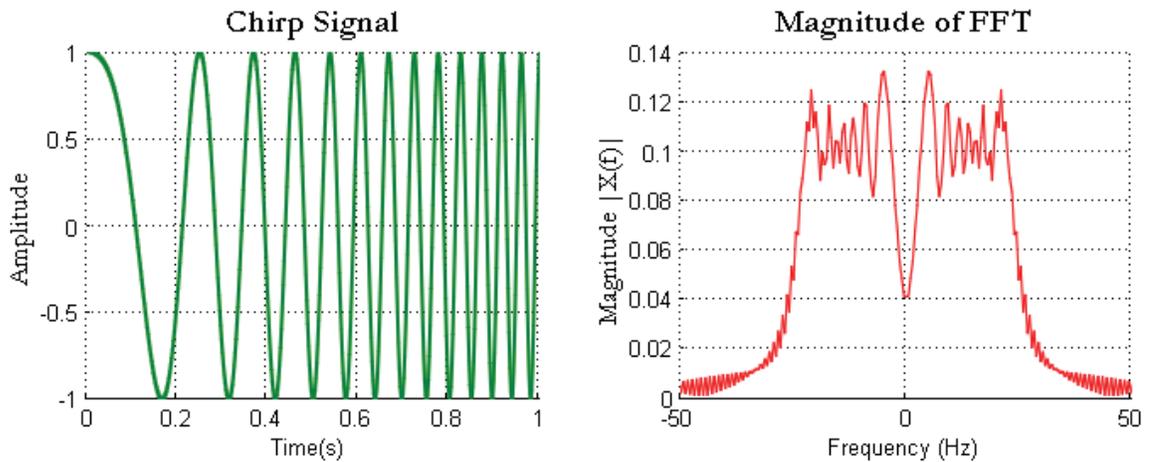
$$S(t) = A \sin \left( 2\pi \left[ f_0 + m \frac{t-T}{2} \right] t \right) \quad \text{con } 0 < t < T$$

La frecuencia instantánea de la señal modulada se obtiene de la derivada en el tiempo de la fase  $\Phi(t) = 2\pi[f_0 + m(t - T)/2]t$ . Luego:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = f_0 + m \left( t - \frac{T}{2} \right)$$

Luego,  $f(t)$  varía entre  $f_0 - mT/2$  y  $f_0 + mT/2$ , con un ancho de banda  $B = mT$ .

El espectro de frecuencia Chirp puede aproximarse, en términos gruesos, a un rectángulo de ancho  $B$  centrado en  $f_0$  (Figura 7).



**Figura 7.** Izquierda: señal Chirp en el dominio del tiempo. Derecha: espectro de frecuencia del Chirp.

Hoy en día, los perfiladores de subfondo usan sistemáticamente señales de frecuencia modulada tipo Chirp y procesamiento de compresión de pulso. Esta evolución trajo consigo una mejora crucial a la tecnología de los SBP. Ciertamente, la ganancia de la razón señal-ruido a partir de procesamiento coherente es esencial para lograr profundidades de penetración más grandes que con señales tradicionales. Para lograr un orden magnitud las señales moduladas usadas comúnmente tienen factores  $BT$  en torno a 100 (es decir, una ganancia de procesamiento  $10\log(BT)$  de unos 20dB). Esta ganancia correspondería a una pérdida por absorción sobre 100m en un sedimento blando (como la arcilla), caracterizado por un coeficiente de atenuación de  $0,1\text{dBm}^{-1}$ . La resolución en el tiempo de la medición está definida por el inverso del ancho de banda del Chirp, comúnmente de varios kHz (Lurton, 2010).

#### 1.5.4 Frecuencia

La mayoría de los perfiladores de subfondo trabajan dentro del rango 2-10kHz, es decir, para longitudes de onda (en agua) típicamente entre 0,15 y 0,75m. Comúnmente se usa una frecuencia central de 3,5kHz. Este valor es un buen compromiso entre profundidad de penetración y dimensiones de la antena. Frecuencias que excedan estos límites pueden ser a veces también encontradas.

Frecuencias de 2kHz y más bajas a veces son usadas, por su buen desempeño en penetración. Frecuencias más altas pueden ser interesantes para perfiladores sujetos a restricciones de peso. Frecuencias más altas que 10kHz son de poco interés, dado que la absorción llega a ser prohibitiva y los fenómenos de dispersión ya no son despreciables comparados con la reflexión especular.

La elección de la frecuencia de trabajo principal es muy importante, ya que restringe principalmente el rango de penetración del perfilador. Suponiendo, en una primera aproximación, que la atenuación en los sedimentos es proporcional a la frecuencia, el rango de penetración sigue aproximadamente la misma dependencia.

El ancho de banda de la señal,  $B$ , es una muy importante característica, en la medida en que determina tanto la ganancia de procesamiento  $10\log(BT)$  y luego la razón señal-ruido, como la resolución en tiempo de los ecos ( $\delta t=1/B$ ). Los anchos de banda usuales, con rangos típicos desde 1 a 5kHz, corresponden a resoluciones en tiempo entre 1ms y 0,2ms. Esta resolución vertical da el espaciamiento mínimo observable entre ecos sucesivos, y consecuentemente la resolución espacial entre interfaces de capas.

### 1.5.5 Dominio del Tiempo

Según la teoría de señales de frecuencias modulada, la duración del Chirp transmitido debe ser tan largo como sea posible, dado que mejora la ganancia de la razón señal-ruido sin degradar la resolución en tiempo. Sin embargo, esto no es tan simple en la práctica. Primero, como la mayoría de los sonares, los SBP no pueden recibir ecos mientras están transmitiendo, y esto trae consigo la primera limitación, especialmente en áreas de aguas someras. Por lo tanto, para adquisición de datos en aguas someras, se han diseñado SBP específicos con arreglos separados para transmisión y recepción para superar este problema. Segundo, el riesgo de transmitir una secuencia muy larga está ligado al efecto Doppler que aparece desde el movimiento vertical del SBP (acoplado al movimiento vertical de la plataforma).

Una variación en frecuencia con el tiempo causa una pérdida de coherencia entre la señal transmitida y su eco, y limita el nivel de salida de los datos. Así, las duraciones prácticas de señales de Chirp de SBP están restringidas a varias decenas de milisegundos, y se gana poco al incrementarlas más.

La frecuencia de repetición (pulse repetition frequency, PRF) es ajustada para obtener una alta densidad de datos puntuales a lo largo del track, incrementando la calidad de la representación. En particular a grandes profundidades, PRF puede ser mucho mayor que la frecuencia  $c/2H$ , definida por el tiempo de ida y vuelta (two-way travel time, TWTT) en la columna de agua. La porción interesante de la señal recibida (la que se propaga dentro del fondo marino) frecuentemente es más corta que el ciclo total. Raramente excede 0,2s, mientras que la propagación en la columna de agua, la cual no genera “ninguna” información, puede durar mucho más (6s para una profundidad de 4.500m). Entonces, en aguas profundas, los pings se entrelazan: luego que un ping ha sido transmitido, los siguientes pings son transmitidos sin esperar al primer eco.

### 1.5.6 Transductores de SBP

Tecnológicamente, el mayor desafío en el diseño de los SBP yace en los transductores. Estos transductores deben brindar altos niveles de transmisión y deben ser tanto de baja frecuencia, así como de banda ancha (son deseables anchos de banda mayor que  $1/8$ ). La tecnología Tonpilz es una de las mejores respuestas para estos requerimientos.

Los transductores de este tipo deben satisfacer los requerimientos de frecuencia especificada y de eficiencia, manteniendo un rango de dimensiones razonable. Pueden estar posiblemente agrupados en arreglos para incrementar el nivel transmitido disponible.

Este agrupamiento también mejora el patrón de directividad de la transmisión, aunque este aspecto no es crucial. Obviamente, se debe recordar que las características de directividad (ancho de haz, índice de ruido, etc.) inevitablemente cambian con la frecuencia dentro del ancho de banda; pero esto tampoco tiene grandes consecuencias.

Los transductores y arreglos de SBP pueden tener variadas formas y tamaños, de acuerdo con el contexto de su implementación. Mientras que para buques de superficie se encuentra el diseño e instalación clásicos de Tonpilz, la implementación en plataformas remolcadas plantea problemas específicos, dado que el peso restringe una restricción, se debe tomar en cuenta posibles requerimientos de alta presión para uso en aguas profundas. En tales casos la tecnología Tonpilz puede ser reemplazada ventajosamente por los conceptos de transductor Janus-Helmholtz.

## 1.6 DESEMPEÑO DE LOS SBP

### 1.6.1 Máxima profundidad de penetración

La máxima profundidad de penetración es una muy importante característica de un perfilador de subfondo. Se obtiene desde una forma particular de la ecuación del sonar, donde:

- El objetivo interactúa con la onda acústica por un proceso de reflexión, más que por retrodispersión. Luego, se debe considerar una onda esférica reflejada por el fondo marino, con una pérdida por transmisión de  $20\log(2R)$  en vez de  $40\log(R)$ .
- La pérdida por transmisión debe ser dividida en dos partes (agua y sedimento) con diferentes valores de coeficientes de absorción.

La ecuación del sonar puede escribirse en este caso como:

$$SL - 20 \log( 2H + 2H_s ) - 2\alpha H - 2\alpha_s H_s + 20 \log( W_{ws} W_{sw} ) + 20 \log V - NL + DI + PG = RT$$

Donde:

- $SL$  es nivel de transmisión de la fuente;
- $H$  es la profundidad del agua;
- $H_s$  es la profundidad de penetración dentro del sedimento;
- $\alpha$  y  $\alpha_s$  son los coeficientes de absorción en el agua y en el sedimento, respectivamente;
- $20\log(W_{ws}W_{sw})$  es el coeficiente de transmisión de ida y vuelta (en dB) en la interface agua-sedimento;
- $20\log V$  es el coeficiente de reflexión (en dB) en la capa enterrada, considerada como objetivo;
- $NL$  es el nivel de ruido;

- $DI$  es el índice de directividad asociado con el patrón de directividad de la antena receptora;
- $PG$  es la ganancia de procesamiento de la señal y del receptor usado; y
- $RT$  es el umbral de recepción correspondiente al nivel deseado de desempeño.

Al considerar todo, la máxima profundidad de penetración para un perfilador de subfondo está principalmente ligada al coeficiente de absorción, el cual depende fuertemente de la frecuencia. Para un sedimento como arcilla ( $\alpha_s$  de unos  $0,1\text{dB}/\lambda$ ), la penetración típica puede alcanzar 50 a 200m de acuerdo con las características del sistema. Luego, para incrementar la máxima profundidad, es mucho más importante disminuir la frecuencia de la señal más que incrementar el nivel de la fuente.

### 1.6.2 Resolución

La resolución vertical de un perfilador de subfondo es la clásica resolución de un sonar que usa señal Chirp. Como se señaló anteriormente, la resolución es dependiente directamente de su ancho de banda:  $\delta z = c/2B$ . Para anchos de banda desde 1 hasta 5kHz, esto corresponde a resoluciones verticales desde 0,75 hasta 0,15m.

Al estar controlada por el ancho de banda de la señal transmitida, esta resolución debería permanecer constante cualquiera sea la profundidad del agua. Sin embargo, bajo el fondo marino, las más altas frecuencias de la señal son más rápidamente atenuadas debido a la absorción y el ancho de banda tiende a reducirse con una frecuencia central más baja. Luego, bajo el fondo marino la resolución vertical decrece con profundidad.

Dado que el eco es causado por una reflexión más que por retrodispersión, la resolución horizontal está dada por la extensión de la primera zona de Fresnel  $\delta x \approx \sqrt{\lambda H_t / 2}$ , con  $H_t = H + H_s$ , (Profundidad total = Profundidad del agua + Profundidad del sedimento) = y  $\lambda$  tomada para la frecuencia promedio del espectro de la señal. Nótese que  $\delta x$  no depende del valor de ancho de banda, y que es usualmente bastante más pequeño que el tamaño de la huella delimitada por la proyección del haz.

### **1.6.3 Formación de ecos y sus consecuencias**

A diferencia de los otros tipos de sonares de mapeo del fondo marino, el perfilador de subfondo usa ecos reflejados y no ecos retrodispersados. Esto proviene de la configuración geométrica de la medición (el sistema es dirigido en la vertical hacia el fondo marino y por ello puede recibir el eco reflejado de vuelta en la misma dirección), y mayormente de la frecuencia utilizada. A baja frecuencia, la contribución de la retrodispersión se torna pequeña comparada con el eco coherente, no tan afectada por la topografía de microescala de las interfaces, cuya amplitud es pequeña compara con la longitud de onda.

Este comportamiento distintivo es absolutamente esencial cuando se interpretan datos desde un perfilador de subfondo. Dado que el eco es generado por reflexión especular en las interfaces, corresponde a una porción local del fondo marino limitada por el proceso de reflexión mismo, y no por la huella del haz. Luego, el ancho del haz no influye en la duración del eco. Las consecuencias son:

- La calidad de la imagen resultante no depende del ancho del haz, lo cual contradice lo que sí aplica para otros sonares de mapeo. Los perfiladores de subfondo, que tienen pobres características de arreglo pueden producir muy buenas secciones transversales de unidades sedimentarias. La calidad de las imágenes está más bien relacionada con la resolución en tiempo de la señal utilizada. Esta resolución permanece constante en áreas de aguas someras o profundas.
- La exactitud del direccionamiento angular del haz es de importancia secundaria. La dirección de la reflexión especular sólo debe ser incluida en la directividad del lóbulo principal. Un perfilador de subfondo puede, por ello, ignorar correcciones por cabeceo y balanceo. También puede tolerar las pendientes del fondo marino. Paradojalmente, esta tolerancia será mejor, cuanto más ancho sea el patrón de directividad. Lo que sería de pobre calidad al ser evaluado con los criterios usuales.
- El perfilador de subfondo puede solamente trabajar apropiadamente con incidencia especular. Con incidencia oblicua o con señal de retrodispersión solamente puede registrar ecos muy débiles, escondidos en el ruido y en las reflexiones especulares. Más aún, la resolución espacial del eco retrodispersado ya no es de la resolución espacial, sino de dimensión de la huella, como en sonares de alta frecuencia. Esto impide la separación de interfaces de sedimento próximas entre sí. Al inclinar el eje de medición se incrementa la huella y luego se degrada la resolución.

## **1.7 TRES CONCEPTOS ORIGINALES DE SBP**

### **1.7.1 SBP Paramétrico**

Varios intentos han sido hechos por varios constructores para desarrollar perfiladores de subfondo que usen arreglos paramétricos, basados en el principio de la transmisión no lineal. La idea detrás de esto es lograr un patrón de directividad estrecho a baja frecuencia. Esto, en verdad, se logra bien con técnicas acústicas no lineales, las cuales brindan tanto la ventaja de una disponibilidad de banda ancha, como un patrón de haz independiente de la frecuencia. La limitante es que la eficiencia de generación no lineal es muy pobre y los niveles transmitidos son bastante bajos. Esto da lugar a penetraciones someras en los sedimentos. El otro inconveniente es que para operaciones de sondaje clásicas, no es absolutamente necesario tener una directividad estrecha, dado que el filtrado angular del eco especular es provisto por la reflexión coherente, mientras que el haz paramétrico debe ser dirigido en forma exacta a la dirección especular. Así, finalmente, el precio que hay que pagar con la pérdida de eficiencia puede no valer la pena. Sin embargo, este tipo de perfilador de subfondo puede ser interesante cuando la reflexión especular no es especialmente esperada, pero más bien ecos detallados desde objetivos enterrados superficialmente; por ejemplo para la detección de tuberías o minas. En verdad, estas aplicaciones, usando técnicas no lineales, son las más promisorias, dado que el perfilador de subfondo de haz clásico tiene problemas para lograr resoluciones laterales satisfactorias.

### 1.7.2 SBP Multihaz

Un concepto único de perfilador de subfondo multihaz fue propuesto a principios de los años 2000 por un constructor de ecosondas multihaz. La banda de frecuencia de este SBP es de 2,5 a 7kHz.

El principio de “Mills crossarray” es implementado con un largo arreglo transmisor a lo largo del buque y otro largo arreglo receptor a través del buque. Un abanico de haces receptores es formado a través del track, mientras que el sector transmisor puede ser inclinado a lo largo del track. Basada en arreglos de baja frecuencia de ecosondas multihaz, la directividad lograda es en verdad atractiva dado que el ancho del haz es típicamente tan estrecho como  $3^{\circ} \times 3^{\circ}$  a 4kHz. Luego, esto es un orden de magnitud mejor que en los sistemas convencionales. Sin embargo, a pesar de su capacidad de escanear a través del track, esta configuración no brinda la capacidad de registrar simultáneamente múltiples secciones transversales de las capas sedimentarias como en configuraciones de sísmica 3D. Solamente los ecos correspondientes a la reflexión especular son de real calidad.

Los haces inclinados brindan una contribución muy baja de la retrodispersión, posiblemente enmascarada por contribuciones especulares de lóbulos laterales. Hoy en día, está bien establecido que el interés en un sistema de este tipo yace esencialmente en la mejora que brinda sobre sonares clásicos en términos de razón señal-ruido (gracias a los altos niveles de emisión y haces de recepción estrechos) y de la resolución horizontal (permitiendo filtrar la influencia de reflectores no deseados a través de la selectividad espacial). La posibilidad de dirigir el haz perpendicular hacia el fondo marino puede ser útil para recibir ecos desde interfaces inclinadas, pero para propósitos prácticos, el manejo de estas configuraciones ha probado ser bastante complicado. No obstante, algunos de los mejores resultados de ecogramas de perfiladores de subfondo jamás obtenidos han sido registrados usando esta tecnología.

Estos resultados prueban el interés en tal complejo dispositivo acústico. Algunos registros muestran que los ecos provienen principalmente desde la reflexión especular (recibidos en el haz ortogonal al fondo marino, es decir, desde el haz vertical sobre un fondo marino horizontal). Estos registros ilustran como decrece rápidamente la intensidad recibida, cuando los haces se mueven afuera de los  $0^\circ$  ( $3^\circ$  y  $6^\circ$ ).

### **1.7.3 SBP de apertura sintética**

En este párrafo se ilustra cómo podría ser una futura evolución de los perfiladores de subfondo. Un arreglo paramétrico de SBP (pero el principio podría funcionar también con SBP clásicos) se mueve a lo largo de una línea, y los ecos son registrados con una redundancia suficientemente alta. Las señales en el tiempo son sumadas para focalizar las señales desde varios pings sobre puntos objetivos comunes. El propósito de este procesamiento es mejorar la razón señal-ruido (a través del apilamiento o “stacking” de la señal) y mejorar la resolución espacial (al focalizar las señales de una arreglo virtual largo). Este procesamiento es actualmente comparable tanto con el sonar de apertura sintética, como con el procesamiento usado en reflexión sísmica (Lurton, 2010).

## **1.8 APLICACIONES DE LOS SBP**

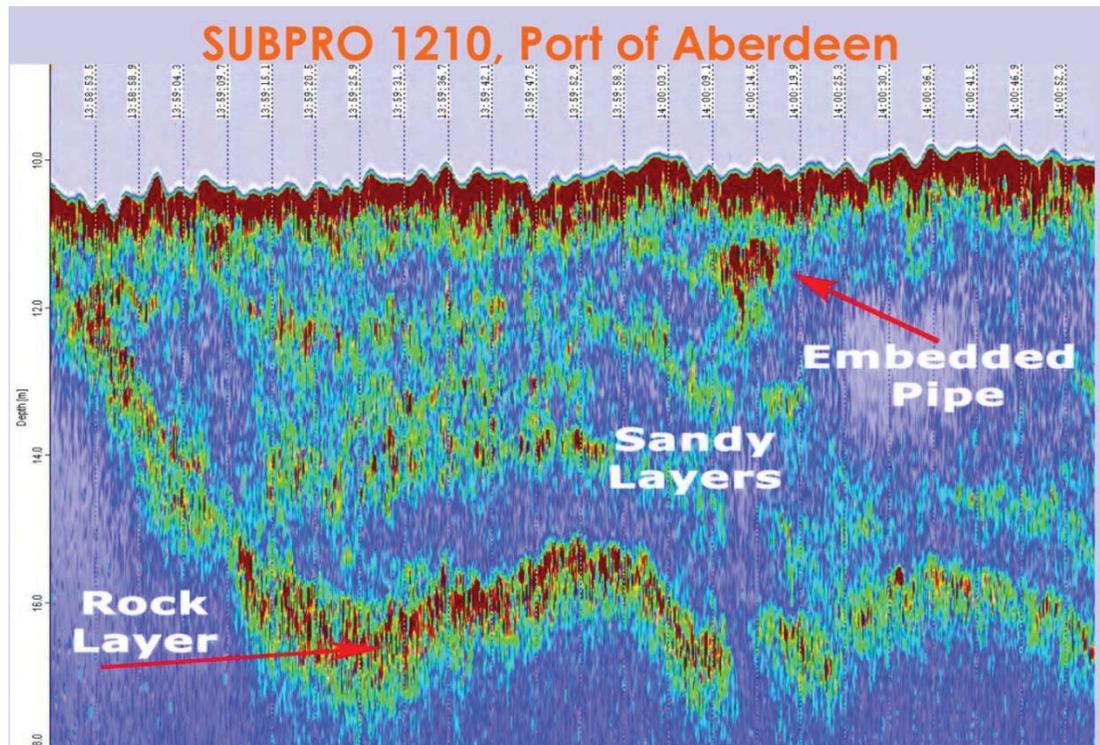
El uso de perfiladores de subfondo tiene múltiples aplicaciones, entre las que se pueden destacar:

- Exploración geológica y geofísica.
- Investigación de sedimentos para proyectos de dragado.
- Definición de rutas para tendido de tuberías y cables submarinos.
- Búsqueda de recursos minerales.
- Campañas en cuerpos de agua pequeños y someros, tales como puertos, esclusas o playas.

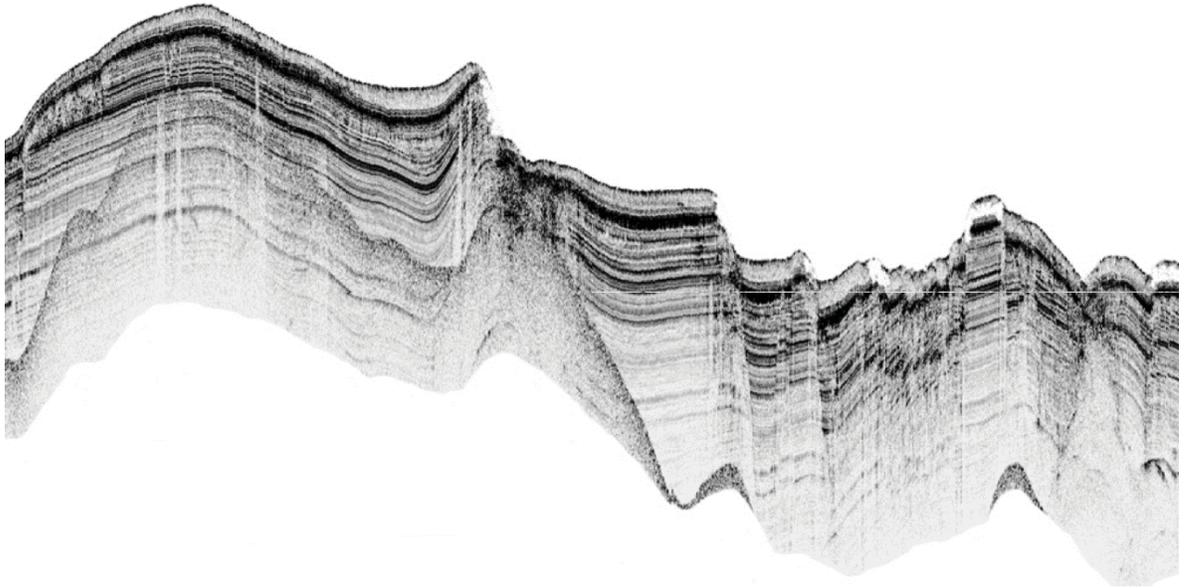
- Búsqueda de objetos, tales como naufragios, tuberías, cables submarinos, obstáculos para la navegación, minas, rocas, etc.
- Investigaciones arqueológicas de naufragios, edificios históricos o asentamientos.
- Visualización de la columna de agua.
- Monitoreo de escapes de gas.

### 1.9 EJEMPLOS DE PERFILES OBTENIDOS CON SBP

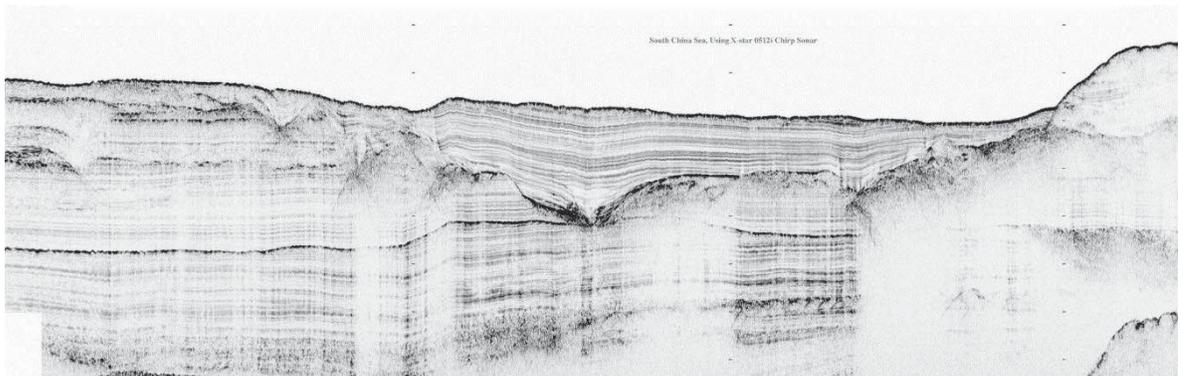
Las siguientes figuras constituyen ejemplos de estudios realizados con perfiladores de subfondo. El denominador común de estos ejemplos es que corresponden a resultados que se pueden considerar de “buena calidad”, a excepción de la figura 8 que muestra una calidad de imagen más baja con respecto al resto de figuras presentadas más adelante.



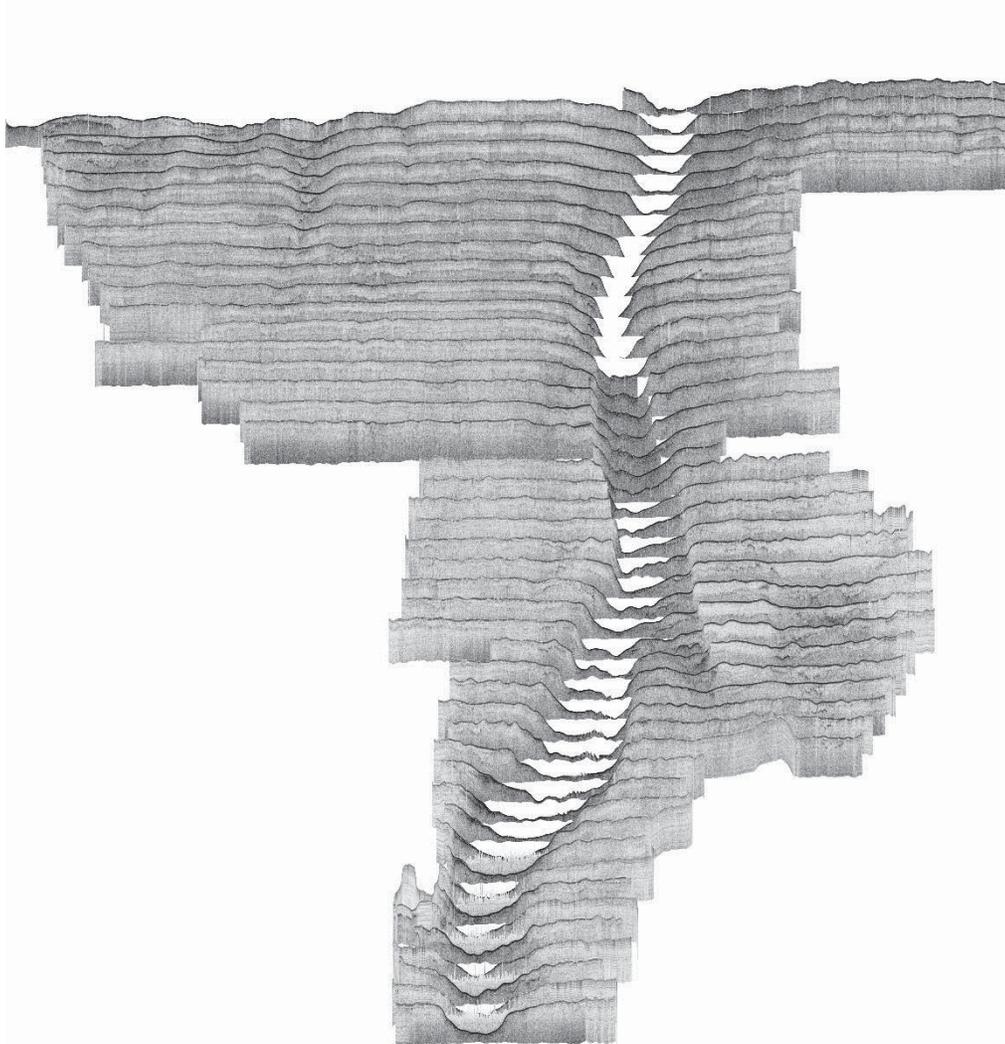
**Figura 8.** Imagen lograda con el perfilador SUBPRO 1220 en el Puerto de Aberdeen, Escocia (General Acoustics, 2015).



**Figura 9.** Segmento de un registro de subfondo de un sondaje efectuado para la ruta de la tubería de British Petroleum – Troika (Williamson&Associates, 2016).



**Figura 10.** Imagen del mar de China del Sur lograda con SBP EdgeTech X-star 0512i (Liu, 2016).



**Figura 11.** Perfiles de perfilador Knudsen 3,5kHz dispuestos sobre sus respectivos tracks de navegación (escala horizontal 2m por pixel, escala vertical 0,1m por pixel, más 0,1m por metro de alejamiento desde el observador) (Heron, 2003).

## **1.10 SOFTWARES**

### **1.10.a Software de Adquisición de Datos.**

La adquisición de datos sísmicos en el subsuelo marino se basa en la reflexión y refracción de ondas longitudinales (compresivas) emitidas por una fuente; estas llevan la información del subsuelo marino que es registrada por un conjunto de sensores comúnmente unidos a un barco sísmico. Los datos sísmicos son un conjunto de trazas donde en cada traza existen cientos de muestras; estos datos sísmicos pasan luego a ser procesados (Jiménez, 2011).

La adquisición de datos es la base del ciclo de vida de la sísmica por esto es crucial que se tomen las decisiones correctas durante el proceso de diseño de la adquisición. Para enfrentar estos desafíos las compañías requieren herramientas flexibles y robustas de diseño sísmico que les proporcionen un análisis acertado para obtener imágenes efectivas de sus objetivos en el subsuelo.

### **1.10.b Software de Procesamiento de Datos.**

El Procesamiento de Datos Sísmicos o simplemente Procesamiento Sísmico se encarga de optimizar la señal adquirida, filtrando todo tipo de ruidos que se encuentren en la señal y mejorando la resolución de esta. Existe una secuencia casi estándar de Procesamiento Sísmico: Atenuación de Ruidos Lineales y Aleatorios, Deconvolución, Supresión de reflexiones Múltiples y Migración. Normalmente para la atenuación de Ruidos Lineales se usa el filtro llamado filtro f-k, que se basa en la transformada de Fourier de la señal adquirida. Si bien es cierto el filtro f-k es muy recomendado, este no preserva la amplitud de la señal y no es efectivo cuando los ruidos lineales presentan alta velocidad (velocidades mayores a 1600 m/s). La otra opción es usar un filtro de Ruidos Lineales basado en una transformada de la señal del espacio (tiempo – distancia) al espacio ( $\tau$ -p) o también conocida como Slant Stack (en el caso de atenuación de ruidos lineales) (Jiménez, 2011).

El objetivo del Procesamiento Sísmico es suprimir en el mayor grado posible, todo aquel conjunto de amplitudes que no represente información del subsuelo marino (reflexiones primarias). Existe una secuencia estándar de Procesamiento Sísmico (Yilmaz O.:2001). Una vez que se tienen los datos sísmicos en su correcto posicionamiento (Asignación de coordenadas) y luego de eliminar los llamados “bad shots”; se atenúan los ruidos Lineales. El siguiente paso es la llamada “Deconvolución” en la cual se extrae de los datos sísmicos la onda generada por la fuente, quedando así solo las reflexiones primarias y múltiples en los datos. A continuación, se suprimen las reflexiones múltiples y luego se migran las reflexiones primarias a sus correctas posiciones en la llamada “Migración”. Finalmente se lleva a cabo un “apilamiento” de los datos migrados, obteniendo como resultado final una sección apilada (Jiménez, 2011).

## **OBJETIVOS**

El objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo de titulación son los siguientes:

### **Objetivo General**

Generar un ranking de los modelos de perfilador de subfondo más adecuados de ser considerados en una futura adquisición de un equipo de este tipo por parte de la Escuela de Ciencias del Mar de la PUCV.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar las distintas características de los perfiladores de subfondo de tipo acústico que están disponibles en el mercado internacional.
- Efectuar un análisis comparativo entre los diversos perfiladores documentados.
- Clasificar los perfiladores más adecuados para la Escuela de Ciencias del Mar a través de un ranking final, de acuerdo a una metodología basada en una serie de criterios primarios, secundarios y terciarios.

### **Importancia de este trabajo**

En la actualidad, se utilizan diversos tipos de perfiladores de subfondo o SBP (sub-bottom profiler, en inglés), para estudiar las diferentes estructuras geológicas insertas en el subfondo marino. A su vez, se utilizan ampliamente en prospecciones petrolíferas y en encontrar objetos hundidos en la zona antes mencionada. Dentro de la investigación que la Escuela de Ciencias del Mar (ECM) de la Pontificia Universidad Católica (PUCV) realiza, se encuentran la investigación del fondo y subfondo marinos tanto en proyectos científicos y como en proyectos de asesoría a empresas, además de aplicar algunos conceptos teóricos de sismica acústica y principios físicos de reflexión en actividades prácticas en terreno de diversos cursos de pregrado y postgrado. Por lo tanto un equipo de perfilador de subfondo acústico sería muy útil para dichas aplicaciones, y, al contar con equipamiento propio, se podría abaratar en costos de arriendo y/o traslado, además de fortalecerla formación de los estudiantes de la ECM para conocer los componentes y correcto uso práctico del instrumento para fines académicos y prácticos.

### **Contribuciones de este trabajo**

Dado que la investigación del fondo marino utilizando perfiladores de subfondo es bastante amplia y diversa, y dado que se cuenta con una gran cantidad de fabricantes que producen los diferentes modelos presentes en el mercado mundial, se pretende determinar en base a diferentes criterios de análisis cual sería el perfilador más idóneo (dependiendo del objetivo de cada estudio en particular) de ser adquirido por la ECM-PUCV.

Dado que en la actualidad no se cuenta con un ranking actualmente que detalle, cuáles son los mejores modelos en base a criterios tan importantes, como el número de investigaciones donde se usó, rangos de profundidad utilizados, zonas geográficas, penetración máxima, resolución, etc. Por tanto este análisis descriptivo, generará un documento de consulta para investigadores del fondo marino y facilitará futuras adquisiciones, de manera segura y basada en criterios objetivos, generales y/o comunes.

## **DESARROLLO DEL TRABAJO**

**Capítulo 2:** *Catastro y preselección de SBP disponibles en el mercado internacional.* Se describen los principales fabricantes que comercializan el SBP, además de una descripción detallada de los modelos acústicos presentes más utilizados en cada caso.

**Capítulo 3:** *Preselección de modelos en base a cantidad de apariciones en investigaciones publicadas (papers).* Una vez descritos los modelos en el Capítulo 2, en el Capítulo 3 se mostrará cuáles han sido los modelos más utilizados por parte de los investigadores en el registro de Internet entre el 2005-2015, preseleccionando los más importantes para su posterior análisis en base a diferentes criterios.

**Capítulo 4:** *Metodología.* Se detallará la metodología empleada, basada en criterios primarios, secundarios y terciarios de selección de SBP, los cuales ayudarán a dirimir qué equipos son los más idóneos de adquirir por parte de la ECM-PUCV.

**Capítulo 5:** *Resultado.* En este capítulo se confeccionará la tabla comparativa con los modelos de SBP preseleccionados. En base a los criterios antes mencionados, se detallarán las características de cada uno de los modelos de SBP, además se presentarán los respectivos porcentajes de funcionalidad por modelo y el respectivo Ranking Final.

**Capítulo 6:** *Análisis y Consideraciones Finales.* Este capítulo es el más importante dentro del trabajo de titulación, debido a que se analizará, en definitiva los modelos de SBPs que ya fueron seleccionados y también los que quedarán en la categoría “Alternativos”. De acuerdo con esto, la ECM-PUCV, tendrá a su disposición la mejor opción de SBP del mercado según el objetivo que plantee para la compra y adquisición de este.

**Capítulo 7:** Conclusiones.

## 2. CATASTRO Y PRESELECCIÓN DE SBPS DISPONIBLES EN EL MERCADO INTERNACIONAL

### 2.1. Introducción

En este capítulo se realizará una presentación de los principales modelos de perfiladores de subfondo(SBP) comercializados en el mercado internacional, haciendo hincapié en las principales características que los diferencian unos de otros, a través de sus especificaciones técnicas, listadas en los sitios en Internet por cada fabricante. Para poder establecer cuáles son los fabricantes más idóneos y, por supuesto ,los modelos más adecuados a considerar, se determinaron varios criterios de búsqueda para su preselección. En primera instancia, se realizó una búsqueda en Internet de los principales fabricantes que actualmente trabajan y comercializan los perfiladores de subfondo a nivel mundial, seleccionados por el grado de penetración de sus modelos en las investigaciones, importancia y reconocimiento en Internet y por foros científicos de especialistas que trabajan actualmente o han trabajado con los SBP, los cuáles se listan por orden alfabético a continuación:

- *Atlas Elektronik* (Alemania),fuente: <http://www.atlas-elektronik.com>
- *AppliedAcoustics* (Reino Unido), fuente: <http://www.appliedacoustics.com>
- *EdgeTech* (Estados Unidos), fuente: <http://www.edgetech.com>
- *Falmouth Scientific, Inc.* (Estados Unidos), fuente: <http://www.falmouth.com>
- *General Acoustics* (Alemania), fuente: <http://www.generalacoustics.com>
- *Geosonics Australia* (Australia), fuente: <http://www.geosonicsaustralia.com>
- *InnomarTechnology GmbH* (Alemania), fuente: <http://www.innomar.com>
- *iXBlue* (Francia), fuente:<http://www.ixblue.com>
- *KnudsenEngineering Limited (KEL)* (Canadá),  
fuente:<http://www.knudsenengineering.com>
- *Kongsberg Maritime* (Noruega), fuente: <http://www.km.kongsberg.com>

- *MeridataFinlandLtd* (Finlandia), fuente: <http://www.meridata.fi>
- *Ocean Engineering Corporation* (Japón), fuente: <http://www.ocean-eng.com>
- *SIG France* (Francia), fuente: <http://www.marine-seismic-equipments.net>
- *SonarTech Co. Ltd.*(Corea), fuente: <http://www.sonartech.com>
- *Syqwest Inc.* (Estados Unidos), fuente: <http://www.syqwestinc.com>
- *Teledyne Gavia* (Islandia), fuente: <http://teledynegavia.com>
- *Tritech International Limited* (Reino Unido), fuente: <http://www.tritech.co.uk>

A partir de estas 17 empresas, se realizó una preselección en base al siguiente criterio de búsqueda:

- Ingresar en Internet al sitio Google Scholar (<https://scholar.google.com/>).
- Buscar por: “Nombre de Firma’sub-bottom profiler”.
- Registrar el número de resultados de búsqueda.
- Analizar la relación efectiva que tienen los resultados de la búsqueda con respecto al tema de los SBP y, en base aquello, categorizarlos en niveles de concordancia (alta, media obaja).
- Realizar una tabla comparativa preliminar, la cual permita preseleccionar las empresas más representativas, a través de los siguientes parámetros:
  - número de modelos,
  - número de resultados de búsqueda y
  - nivel de relación con el tema de los SBP.

El criterio "Nivel de Relación con el tema de los SBP" hace referencia al nivel o grado de concordancia del resultado de búsqueda de cada una de las firmas en Internet (metodología explicada anteriormente con el concepto SBP). En base a eso se categorizó de la siguiente forma:

- *Nivel Alto*: En el resultado de búsqueda en Internet, al menos las 8 primeras páginas deben estar relacionadas con el concepto de SBP. Ejemplo: el primer lugar de la Tabla 1 correspondió a Innomar Technology GmbH, el cual arrojó 119 resultados de búsquedas, dentro de los cuales más del 60% de la información correspondió a páginas relacionadas con el concepto de SBP, superando las 8 primeras páginas de búsqueda.
- *Nivel Medio*: En el resultado de búsqueda en Internet, al menos las 5 primeras páginas deben estar relacionadas con el concepto de SBP. Ejemplo: el quinto lugar de la Tabla 1 correspondió a Meridata Finland Ltd, el cual arrojó 31 resultados de búsquedas, dentro de los cuales más del 50% de la información correspondió a páginas relacionadas con el concepto SBP, superando las 5 primeras páginas de búsqueda.
- *Nivel Bajo*: En el resultado de búsqueda en Internet, dentro de las 5 primeras páginas no hay mucha relación con el de concepto SBP. Ejemplo: el décimo cuarto lugar de la Tabla 1 correspondió a SIG France, el cual arrojó 19.700 resultados de búsquedas, dentro de los cuales menos del 20% de la información correspondió a páginas relacionadas con el concepto de SBP, habiendo menos de 5 páginas de búsqueda relacionada con el tema.

La tabla comparativa preliminar que se realizó, queda representada de la siguiente forma:

**Tabla 1.** Fabricantes que producen SBP, según país de origen, número de modelos de SBP que fábrica, frecuencia con que aparece publicado un trabajo dónde se utilizó un SBP de la firma y grado de relación del trabajo con los SBP.

Nº	Fabricante	País	Nº modelos	Número de resultado de búsqueda	Nivel de relación con SBP
1	Innomar Technology GmbH	Alemania	8	119	Alto
2	Kongsberg Maritime	Noruega	5	2020	Alto
3	Syqwest Inc.	E.E.U.U.	3	172	Alto
4	Falmouth Scientific Inc.	E.E.U.U.	1	2870	Alto
5	Meridata Finland Ltd	Finlandia	4	31	Medio
6	EdgeTech	E.E.U.U.	3	21600	Medio
7	Ocean Engineering Corporation	Japón	1	19800	Medio
8	Teledyne Gavia	Islandia	1	37	Medio
9	iXBlue	E.E.U.U.	4	52	Bajo
10	Knudsen Engineering	Canadá	2	15900	Bajo
11	Atlas Elektronik	Alemania	2	443	Bajo
12	General Acoustics	Alemania	1	26600	Bajo
13	Applied Acoustics	Reino Unido	1	26100	Bajo
14	SIG France	Francia	1	19700	Bajo
15	Tritech International Limited	Reino Unido	1	219	Bajo
16	SonarTech Co. Ltd.	Corea	1	34	Bajo
17	Geosonics Australia	Australia	1	4	Bajo

En base a los criterios que se señalaron anteriormente y en orden de importancia, se preseleccionaron 11 fabricantes, porque presentan en la búsqueda un nivel de relación con los SBP medio o alto (8 de ellos). Cabe destacar que los modelos 9, 10 y 11 se escogieron debido a que contaban con más de 1 modelo a disposición, por ende, otorga mayor variabilidad de elección y tal vez uno de ellos sea de real interés para algún investigador en la adquisición de datos del subfondo marino, Mientras que el resto se rechazó por tener nivel bajo y además presentar tan solo 1 modelo en análisis, por tanto, no fueron considerados representativos.

A continuación, se presenta el listado de los fabricantes seleccionados:

1. Innomar Technology GmbH,
2. Kongsberg Maritime,
3. Syqwest Inc.,
4. Falmouth Scientific, Inc.,
5. Meridata Finland Ltd,
6. EdgeTech,
7. Ocean Engineering Corporation,
8. Teledyne Gavia,
9. iXBlue,
10. Knudsen Engineering Limited y
11. Atlas Elektronik.

De estas 11 empresas preseleccionadas, se contabilizaron un total de 34 modelos, cantidad que se consideró excesiva para el objetivo de este trabajo de titulación.

Entonces, de manera de reducir el número de modelos a analizar, se agregó un nuevo criterio de selección, referido al tamaño físico del modelo, denominada “*Numero de modelos con tamaño menor*”. Así se pudo acotar el número de empresas y equipos a ser analizados y que solo puedan ser instalados y utilizados en **embarcaciones menores** que, en definitiva, son de mayor utilidad para posteriores proyectos académicos de la PUCV.

Cabe destacar que el término “embarcación menor” en Chile, corresponde a todas las naves menores a 50TRG (Toneladas de Registro Grueso o Arqueo Bruto), independiente de su actividad y que además tengan un máximo de 18mde eslora (DIRECTEMAR-Armada de Chile, 2014).

El TRG o arqueo es una medida del tamaño de los buques, a partir de su volumetría, generalmente medida en toneladas, con una connotación fiscal importante (Araya, 2012).

Por otro lado, internacionalmente, se denomina “embarcación menor”, a las embarcaciones con una eslora (largo) menor de 24m y con 50TRG o menos de volumen interno.

Entonces para efectos de este trabajo de titulación, debido a que una posible utilización del perfilador requerido sería en mares chilenos, se eligió el criterio nacional, máximo eslora (18m) y un tonelaje máximo de arqueo de 50TRG.

Según la búsqueda especializada que se realizó en Internet, de acuerdo a la totalidad de equipos analizados en todas las firmas de acuerdo a sus tamaños y pesos máximos encontrados y con la finalidad, se estableció de acuerdo a una media que el tamaño menor corresponde a todo modelo que cumpla las siguientes características:

- Peso en aire < 120kg.
- Altura máxima de transductor < 0,55m
- Ancho máximo de transductor < 0,75m.
- Largo máximo de transductor < 1,25m.

**Tabla 2.** Segunda preselección de fabricantes y modelos respectivos en relación al número de modelos de tamaño físico menor.

<b>Lugar</b>	<b>Fabricante</b>	<b>País</b>	<b>N° modelos</b>	<b>N° modelos con tamaño físico menor</b>
1	InnomarTechnology GmbH	Alemania	8	6
2	SyqwestInc.	Estados Unidos	3	3
3	Falmouth Scientific, Inc.	Estados Unidos	1	1
4	EdgeTech	Estados Unidos	3	3
5	Teledyne Gavia	Islandia	1	1
6	iXBlue	Estados Unidos	4	1
7	Knudsen Engineering Limited	Canadá	2	1
<b>Total</b>	<b>7Fabricantes</b>	<b>4 países</b>	<b>22</b>	<b>16</b>

A partir de la Tabla 2 se preseleccionaron en una segunda fase una cantidad de 16 modelos, los cuales cumplen con el requisito acorde a lo establecido en el párrafo anterior. Por lo tanto, de aquí en más, estos 16 modelos serán analizados en los siguientes capítulos con mayor detalle.

Los 16 modelos pertenecen a 7 de las 11 empresas preseleccionadas. Esto es debido a que los modelos considerados originalmente, para los fabricantes Meridata FinlandLtd., Atlas Elektronik, Kongsberg Maritime y Ocean Engineering Corporation, no cumplen con los requisitos de acoplamiento a embarcaciones pequeñas. Además, no entregan especificaciones técnicas suficientes para los propósitos de este trabajo.

En la sección 2.2 se listarán todos los modelos de SBP acústicos por empresa, destacando sus especificaciones técnicas, para luego encontrar parámetros comunes, que puedan ser relevantes para su comparación y análisis en capítulos posteriores.

Por último en la sección 2.3, se intentará explicar estos parámetros mayoritariamente comunes entre modelos y se descartarán los que menos se repitan, justificando su poca presencia a través del número de modelos.

## **2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS POR FABRICANTE**

### **2.2.1 Innomar Technology GmbH: 6 modelos**

#### *2.2.1 a) Modelo 1.SES 2000 COMPACT*

*Descripción:* Es el perfilador más pequeño de la familia SES 2000 de Innomar Technology GmbH. Diseñado para obtener perfiles en aguas someras a menos de 400m de profundidad o también para zonas costeras y en embarcaciones pequeñas. Se puede operar en tiempo real a través de Ethernet desde cualquier computadora que incorpore el sistema operativo Windows. Además, si el investigador lo requiere existe una extensión PASde sonar de barrido lateral disponible para complementar la investigación.

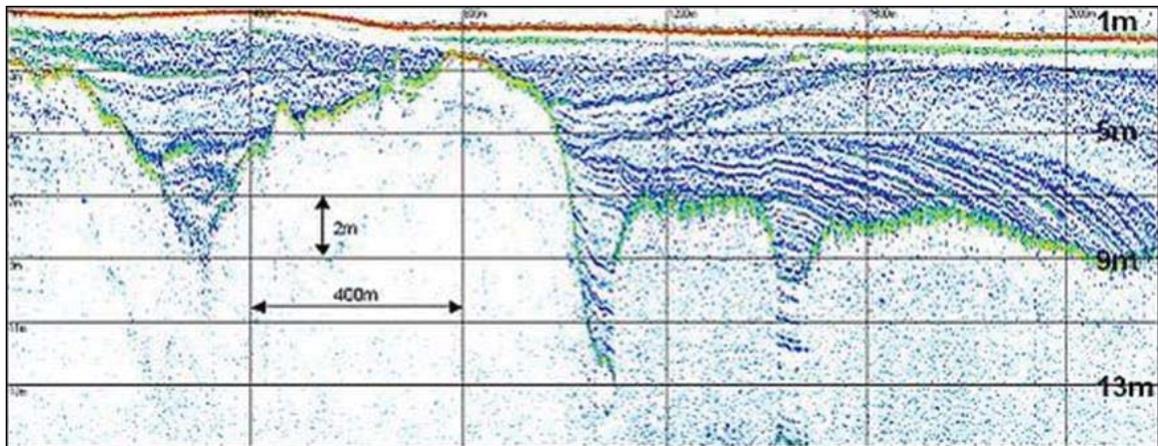
*Software:* SESWIN convierte los datos a las plataformas SEG-Y, XTF o ASCII. Contiene además el software SES Net View para la visualización de impresiones de ecos en línea e información del sistema en equipos remotos (a través de Ethernet) para un adecuado control de calidad. Además incluye el software ISEde post-procesamiento con un módulo GIS.

**Tabla 3.** Especificaciones técnicas de SBP Innomar SES 2000 COMPACT. Fuente: <http://www.innomar.com/ses2000compact.php>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Rango de profundidad	0,5 – 400m
Penetración en el sedimento	Más de 40m (dependiendo del tipo de sedimento y ruido)
Rango de resolución / Capa de sedimento	aprox. 1cm / sobre los 5cm
Transmisión de Ancho de haz (-3dB)	aprox. $\pm 2^\circ$ / huella < 7% de la Prof. de agua
Frecuencias primarias (PF)	aprox. 100kHz (ancho de banda: 85 – 115kHz)
Nivel primario de fuente	> 238dB/ $\mu$ Pa re 1m
Frecuencias secundarias bajas (SLF), Secondary Low Frequency)	seleccionable: 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15kHz
Ancho de haz de SLF total	2 – 22kHz
Tipo de pulso	Ricker, CW
Longitud del pulso	Uso seleccionable (0,07 – 1,0ms)
Tasa de disparos	sobre los 40 pingss <sup>-1</sup>
Dimensiones y Peso en aire Transductor.	0.30m $\times$ 0.40m $\times$ 0.30m ( $\frac{1}{2}$ 19"/6U) / 19kg
Dimensiones y Peso en agua Transductor (20m cable)	0,34m $\times$ 0,26m $\times$ 0,08m / peso 22kg incl. cable
Adquisición de datos	digital 24bit / 70kHz; sobre SLF forma de onda completa
Entrada auxiliar	GNSS, sensor HRP, Disparador (TTL)
Salida Auxiliar	Disparador (TTL), trayectoria de fondo, SLF análogo
Fuente de Alimentación	100–240V AC o 12/24V DC (opcional) / < 200W



**Figura 12.** Transceptor, cable y transductor de SBP Innomar SES 2000 COMPACT.



**Figura 13.** Ejemplo de perfil característico realizado con un SBP Innomar SES 2000 COMPACT (Prof. agua: 1–2 m; rango: 1–15mbajo nivel del mar; frecuencia: 10kHz; duración de pulso: 0,2ms).

### 2.2.1 b) Modelo 2. SES 2000 LIGHT

*Descripción:* Está diseñado para aplicaciones en aguas someras hasta los 400 m de profundidad y en zonas costeras. Su principal ventaja es el PC de control integrado y la adquisición de datos en tiempo real sobre baja frecuencia secundaria (Secondary Low Frequency, SLF) en forma de onda completa.

**Tabla 4.** Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 LIGHT. Fuente: <http://www.innomar.com/ses2000light.php>.

Especificación Técnica	Valores
Rango de profundidad de columna de agua.	0,5 – 400m
Penetración en el sedimento.	Más de 40m (dependiendo del tipo de sedimento y ruido)
Rango de resolución / Capa de sedimento.	aprox. 1cm / sobre los 5cm
Transmisión de Ancho de haz (-3dB).	aprox. $\pm 2^\circ$ / huella < 7% de la Prof. de agua
Frecuencias primarias (PF).	aprox. 100kHz (ancho de banda 85 – 115kHz)
Nivel primario de fuente.	>238dB// $\mu$ Pa re 1m
Frecuencias secundarias bajas (SLF).	seleccionable: 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15kHz
Ancho de haz SLF total.	2 – 22kHz
Tipo de disparos.	Ricker, CW
Longitud del pulso.	Uso seleccionable 0.07 – 1.0ms
Tasa de pings.	sobre los 50 pings <sup>-1</sup>
Unidad lado superior (transductor)	0,52m × 0,40m × 0,35m (19"/7U) / peso 31kg
Largo, Ancho, Alto y peso en aire del Transductor.	0,34m × 0,26m × 0,08m / 22kg incl. Cable
Adquisición de datos.	digital 24bit / 95kHz; sobre SLF en forma de onda completa
Entrada auxiliar.	GNSS, sensor HRP, Disparador (TTL)
Salida Auxiliar.	Disparador (TTL), trayectoria de fondo, análogo SLF
Fuente de Alimentación.	100–240V AC o 12/24V DC (opcional) / <250W

### 2.2.1c) Modelo 3. SES 2000 STANDARD

*Descripción:* Es el modelo más versátil, en cuanto a que es lo suficientemente pequeño como para ser utilizado en embarcaciones pequeñas en aguas someras, así como también es potente para ser operado en mar abierto hasta los 500 m de profundidad. Dentro de sus ventajas, posee una alta resolución y contiene además estabilización electrónica del haz.

**Tabla 5.** Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 STANDARD. Fuente: <http://www.innomar.com/ses2000standard.php>.

Especificación Técnica	Valores
Rango de profundidad de columna de agua.	0,5 – 500m
Penetración en el sedimento.	Más de 50 m (dependiendo del tipo de sedimento y ruido).
Rango de resolución / Capa de sedimento.	aprox. 1cm / sobre los 5cm.
Transmisión de Ancho de haz (-3dB).	aprox. $\pm 2^\circ$ / huella < 7% de la Prof. de agua.
Frecuencias primarias (PF).	aprox. 100kHz (ancho de frecuencia 85 – 115kHz).
Nivel primario de fuente.	>240 dB// $\mu$ Pa re 1m.
Frecuencias secundarias bajas (SLF).	uso seleccionable: 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15kHz.
Ancho de haz total (SLF).	2 – 22kHz.
Tipo de pulso.	Ricker, CW, Chirp LFM.
Longitud del pulso.	Uso seleccionable 0,07 – 1,3ms.
Tasa de disparos.	sobre los 60 pingss <sup>-1</sup>
Largo, Ancho, Alto y peso en aire Transductor.	0,52m $\times$ 0,40m $\times$ 0,44 m (19"/9 U) / 39 kg.
Adquisición de datos.	digital 24bit / 96kHz; sobre SLF forma de onda completa.
Entrada auxiliar.	GNSS, sensor HRP, Disparador (TTL).
Salida Auxiliar.	Disparador (TTL), trayectoria de fondo, análogo SLF.
Fuente de Alimentación.	100–240V AC o 12/24V DC (opcional) / <350W.

2.2.1. d) *Modelo 4. SES 2000 STANDARD PLUS*

*Descripción:* Es un modelo estándar, que funciona simultáneamente con los datos de sonar de barrido lateral en aguas someras. Todos los transductores tienen el mismo punto de referencia, lo cual reduce el tiempo de estudio y minimiza el riesgo de pérdida o daño del equipo.

*Software:* El software de Innomar SESWIN se puede complementar con softwares de otras firmas, como por ejemplo como el QTC (QuesterTangentSwannView) del fabricante QuesterTangentCorporation (USA)

**Tabla 6.** Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 STANDARD PLUS. Fuente: <http://www.innomar.com/ses2000standardplus>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Rango de profundidad de columna de agua.	0.5 – 500m
Penetración en el sedimento.	Más de 50m (dependiendo del tipo de sedimento y ruido)
Rango de resolución / Capa de sedimento.	aprox. 1cm / sobre los 5cm
Transmisión de Ancho de haz (-3dB).	aprox. $\pm 2^\circ$ / huella < 7% de la prof. de agua
Frecuencias primarias (PF).	aprox. 100kHz (ancho de banda: 85 – 115kHz)
Nivel primario de fuente.	>240dB/ $\mu$ Pa re 1m
Frecuencias secundarias bajas (SLF).	uso seleccionable: 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15kHz
Ancho de haz SLF total.	2 – 22kHz
Tipo de pulso.	Ricker, CW, Chirp LFM
Longitud del pulso.	Uso seleccionable 0,07 – 1,3ms
Tasa de disparos.	sobre los 60 pingss <sup>-1</sup>
Largo, Ancho, Alto y peso en aire del Transductor.	0,52m $\times$ 0,40m $\times$ 0,44 m (19" / 9 U) / 42 kg
Adquisición de datos.	digital 24bit / 96kHz; sobre SLF forma de onda completa
Entrada auxiliar.	GNSS, sensor HRP, Disparador (TTL)

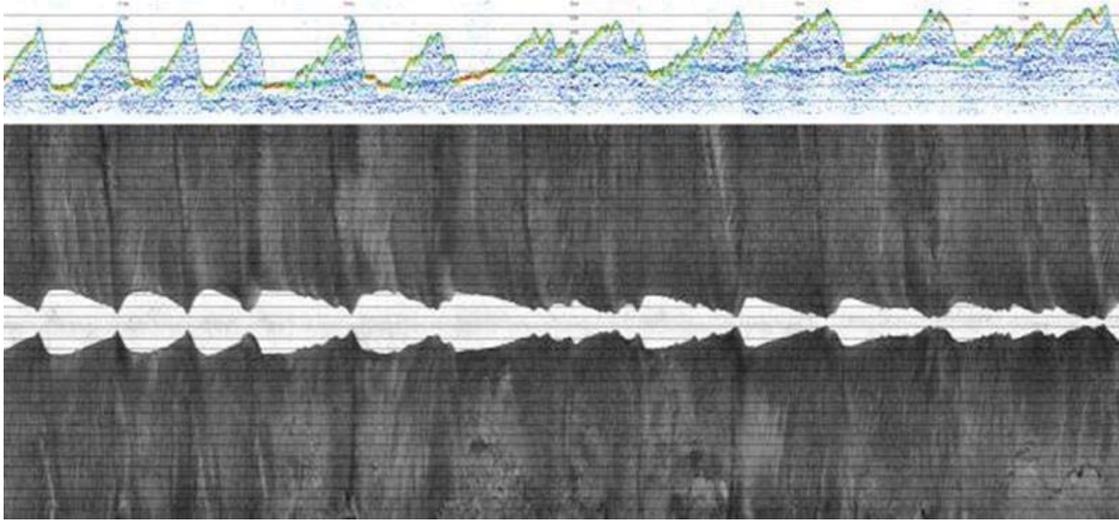
Salida Auxiliar.	Disparador (TTL), trayectoria de fondo, análogo SLF
Fuente de Alimentación.	100–240V AC o 12/24V DC (opcional) / <400W

**Tabla 7.** Especificaciones técnicas de Sonar de barrido lateral, complemento del modelo 4. Fuente: <http://www.innomar.com/ses2000standardplus>.

Especificación Técnica	Valores
Rango de profundidad de columna de agua.	0.5 – 30m
Frecuencia.	250, 410, 600kHz.
Nivel de Fuente.	<210dB/ $\mu$ Pa re 1m
Tipo de pulso.	CW (40 $\mu$ s, 80 $\mu$ s) / Chirp LFM (500 $\mu$ s /35kHz)
Ancho de haz (-3 dB).	aprox. 0.8° $\times$ 58° para todas las frecuencias
Angulo de depresión.	30° / 40°
Adquisición de datos.	digital 24 bit / sobre los 96kHz
Transductor (SSS; 30 m cable).	0,50m $\times$ 0,06m $\times$ 0,06m / peso 12kg incl. Cable



**Figura 14.** Perfilador y sonar barrido lateral SES 2000 Standard Plus



**Figura 15.** Ejemplo de registro característico del sistema SES 2000 Standard Plus, incluyendo perfil de SBP (arriba, en colores) y sonograma de SSS (abajo, en grises) (frecuencias: SBP 6kHz, sonar de barrido lateral 410kHz; Prof. Agua 16m con ondas de arena superpuestas de 4m de altura).

#### 2.2.1. e) Modelo 5. SES 2000 MEDIUM

*Descripción:* Está diseñado para aplicaciones en aguas profundas hasta los 2.000m. El transductor puede ser montado en el casco o de forma lateral. El perfilador obtiene datos de onda completa y puede ser procesado por cualquier software sísmico (formato SEG-Y).

**Tabla 8.** Especificaciones técnicas de SBPSES 2000 MEDIUM. Fuente: <http://www.innomar.com/ses2000medium-100.php>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Rango de profundidad de columna de agua.	2 – 2.000m
Penetración en el sedimento.	Más de 70 m (dependiendo del tipo de sedimento y ruido)
Rango de resolución / Capa de sedimento.	aprox. 1cm / sobre los 5cm
Transmisión de Ancho de haz(-3dB).	aprox. $\pm 1^\circ$ / huella < 3.5 % de la Prof. de agua
Frecuencias primarias (PF).	aprox. 100kHz (ancho de banda 85 – 115kHz)
Nivel primario de fuente.	>247 dB/ $\mu$ Pa re 1m
Frecuencias secundarias bajas (SLF).	uso seleccionable: 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15kHz
Ancho de banda SLF total.	2 – 22kHz
Tipo de pulso.	Ricker, CW, Chirp LFM
Longitud de pulso.	Uso seleccionable 0,07 – 2ms
Tasa de disparos.	sobre los 40 pingss <sup>-1</sup>
Largo, Ancho, Alto y peso en aire del Transductor.	0,52m $\times$ 0,50m $\times$ 0,74 m (19"/ 14 U) / 79 kg
Adquisición de datos.	digital 24bit / 96kHz; sobre SLF forma de onda completa
Entrada auxiliar.	GNSS, sensor HRP, Disparador (TTL)
Salida Auxiliar.	Disparador (TTL), trayectoria de fondo, análogo SLF
Fuente de Alimentación.	100–240V AC o 12/24V DC (opcional) / <700W

*2.2.1 f) Modelo 6.SES 2000 ROV*

*Descripción:* Está diseñado para ser utilizado montado en un ROV, hasta los 2.000m de profundidad. Garantiza una alta resolución y muy buena penetración en sedimentos. También este modelo utiliza una estabilización electrónica del haz, para compensar los movimientos del ROV cuando desciende en la columna de agua.

**Tabla 9.** Especificaciones técnicas de SBP SES 2000 ROV. Fuente: <http://www.innomar.com/ses2000rov.php>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Rango de profundidad de columna de agua	1 – 1000m (opción 2000m) bajo el nivel del mar.
Penetración en el sedimento	Sobre los 50m
Rango de resolución / Capa de sedimento	aprox. 1cm / sobre los 5cm
Transmisión de Ancho de banda (-3dB).	aprox. $\pm 1^\circ$ / huella < 7 % de la prof. de agua
Frecuencias primarias (PF).	aprox. 115kHz (ancho de banda 100 – 130kHz)
Nivel primario de fuente.	>240dB/ $\mu$ Pa re 1m
Frecuencias secundarias bajas (SLF).	uso seleccionable: 5, 6, 8, 10, 12, 15kHz
Ancho de banda de SLF total.	4 – 22kHz
Tipo de pulso.	Ricker, CW, Chirp LFM
Longitud del pulso.	Uso seleccionable (0,07 – 1,3ms)
Tasa de disparos.	sobre los 40 pingss <sup>-1</sup>
Largo, Ancho, Alto y peso en aire del Transductor.	0,52m $\times$ 0,50m $\times$ 0,74 m (19" / 14 U) / 79 kg
Carcasa submarina (clasificación 1000 m).	0,3m $\times$ 0,75m / peso: 49kg en aire, 7kg en agua
Transductor (clasificación 2000 m).	0,47m $\times$ 0,06m / peso: 32kg en aire, 24kg en agua
Adquisición de datos.	digital 24bit / 70kHz; sobre SLF forma de onda completa
Salida Auxiliar.	Disparador (TTL), trayectoria de fondo, análogo SLF
Fuente de Alimentación.	100–240V AC o 12/24V DC (opcional) / < 250W

## 2.2.2 Syqwest Inc: 3 modelos

### 2.2.2. a) Modelo 7. STRATABOX

*Descripción:* El Stratabox es un SBP portátil de imagen de alta resolución, capaz de entregar 6 cm de resolución en el subfondo marino, con una penetración de hasta 40 metros. Está diseñado exclusivamente para zonas de aguas someras desde la costa de hasta 150 metros de profundidad de agua.

**Tabla 10.** Especificaciones técnicas de SBP STRATABOX. Fuente: <http://www.sqwestinc.com/products/sub-bottom-profilers/stratabox>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Frecuencia de salida.	10kHz
Rango de profundidad columna de agua.	0-5, 0-10, 0-20, 0-40, 0-80, 0-150 m
Rango de zoom.	5, 10, 20, 40, 80m
Modos de Zoom.	Zoom fondo, subfondo, marcadores.
Visualización.	zoom, navegación, profundidad, etc.
Resolución.	0,1 m
Precisión de la profundidad.	0,5 %
Posición geográfica.	NMEA 0183, GLL, GGA, RMC, VTG, VHW, HDT. Seleccionable Baud Rate, RS-232, COM2
Datos de entrada.	Interface ODEC Stratabox, 57,6kbaud, RS-422. COM1
Salida de la impresora.	Centronic (puerto paralelo) interface a serie TDU de impresoras térmicas
Operación en aguas someras.	< 2,5m, dependiente del tipo de fondo.
Tasa de transmisión.	Sobre los 10Hz, depende de la profundidad y del operador.
Marca de objetivos.	Manual o periódica (seleccionable en un intervalo de 1min)
Datos de archivos de salida.	Graba profundidad, navegación, datos graficados en formato ODC y zooms respectivos

Largo, Ancho y Alto Transductor.	0,06x 0,22 x 0,25m
Peso en aire transductor.	0,9kg (2.0lbs)
Ambiente.	-25° C a +60°C operando a temperatura de -55°C y Resistente al agua EN60529 IP65.

### 2.2.2. b) Modelo 8. STRATABOX 3510

*Descripción:* El Stratabox 3510 cuenta con un sensor compacto y portátil, el cual puede conectarse directamente a un PC portátil estándar. Además es muy fácil de usar y acoplar a embarcaciones pequeñas.

**Tabla 11.** Especificaciones técnicas de SBP STRATABOX 3510. Fuente: <http://www.sqwestinc.com/products/sub-bottom-profilers/stratabox-3510>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Frecuencia de salida.	3,5kHz o 10kHz (Uso Seleccionable)
Rango de profundidad de columna de agua.	0-10, 0-20, 0-40, 0-80, 0-150, 0-300, 0-500, 0-800m
Rango de zoom.	5, 10, 20, 40, 80m
Modos de Zoom.	Zoom fondo, subfondo, marcadores.
Visualización.	zoom, navegación, profundidad, etc.
Resolución.	10cm
Precisión de la profundidad.	0,5 %
Posición Geográfica.	NMEA 0183, GLL, GGA, RMC, VTG, VHW, HDT. Seleccionable Baud Rate, RS-232, COM2
Datos de entrada.	Interface Syqwest Stratabox, 57,6Kbaud, RS-422. COM1
Salida de la impresora.	Centronic (puerto paralelo) interface a serie TDU de impresoras térmicas
Operación en aguas someras.	< 2,5m., dependiente del tipo de fondo.

Tasa de transmisión.	Sobre los 10Hz, depende de la profundidad y del operador.
Marca de objetivos.	Manual o periódica (seleccionable en un intervalo de 1 min)
Datos de archivos de salida.	Guarda profundidad, navegación, datos graficados en formato ODC, formato SEG-Y y zooms respectivos
Largo, Ancho y Alto del Transductor.	0,06 x 0,29 x 0,34m
Peso en aire transductor.	3,8kg (solo sensor)
Ambiente.	-25° C a +60°C operando a temperatura de -55°C a +90° C y Resistente al agua EN60529 IP65. EMC cumple con emisiones EN60945; Cumple con CE
Tasa de transmisión.	Sobre los 10Hz, depende de la profundidad y del operador.
Marca de objetivos.	Manual o periódica (seleccionable en un intervalo de 1min)
Datos de archivos de salida.	Graba profundidad, navegación, datos graficados en formato ODC <sup>(16)</sup> y zooms respectivos
Potencia de transmisión desalida.	300 Watts (pulso), 10kHz.
Resolución de Strata.	6cm sobre los 40cm de penetración del fondo.

### 2.2.2. c) Modelo 9. BATHY 2010

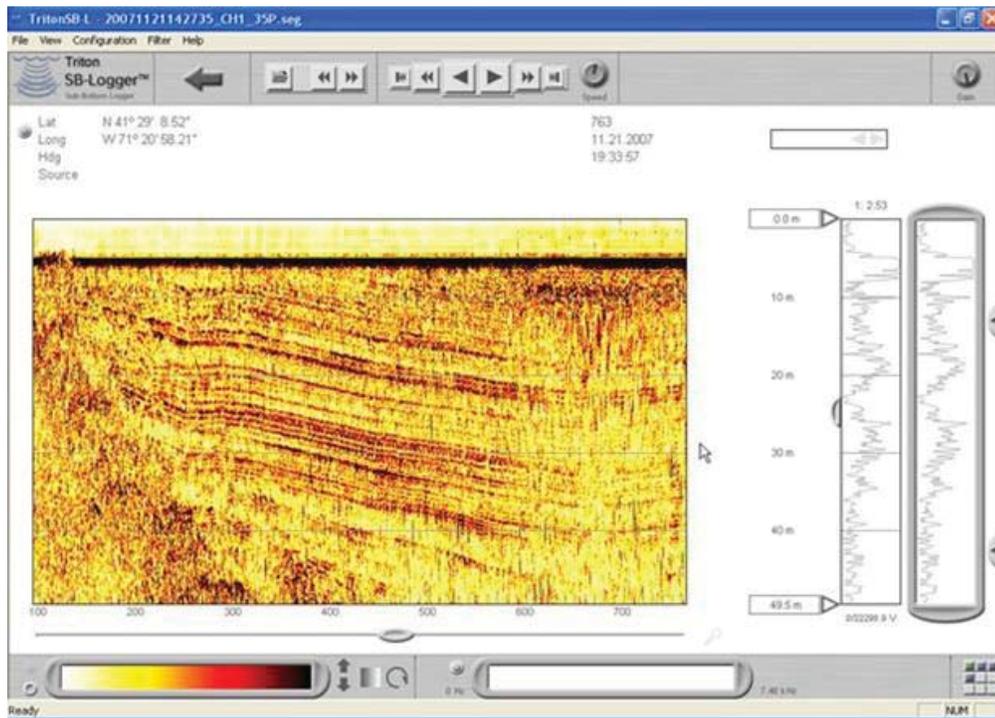
*Descripción:* El BATHY 2010 es un SBP con tecnología Chirp de alta resolución, capaz de entregar hasta 8 cm de resolución del subfondo marino. Está diseñado para estudios geofísicos en aguas someras y profundas hasta los 12.000m de profundidad del agua, característica que lo hace ser muy útil.

**Tabla 12.** Especificaciones técnicas de SBPBATHY 2010.Fuente: <http://www.sqwestinc.com/products/sub-bottom-profilers/bathy-2010>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Rango de profundidad de columna de agua.	10, 20, 40, 80, 150, 300, 500, 750, 1000, 2000, 5000, 12000m
Rango de zoom	5, 10, 20, 40, 80m
Modos de Zoom	Zoom fondo, subfondo, marcadores.
Visualización	zoom, navegación, profundidad, etc.
Resolución	0,1m
Precisión de la profundidad	± 10cm a 100m, ± 3% a 6.000m.
Posición Geográfica	NMEA 0183, GLL, GGA, RMC, VTG, VHW, HDT. Seleccionable Baud Rate, RS-232, 4.800, 9.600, 19.200, 38.400.
Salida de la impresora	Centronic (puerto paralelo) interface a serie TDU de impresoras térmicas
Operación en aguas someras	< 10m, dependiente del tipo de fondo.
Tasa de transmisión	Sobre los 4Hz, depende de la profundidad y del operador.
Marca de objetivos	Manual o periódica (seleccionable en un intervalo de 1min)
Datos de archivos de salida	Graba profundidad, navegación, datos graficados en formato ODC, formato SEG-Y y zooms respectivos
Frecuencia de salida	3,5kHz o 12kHz (Uso Seleccionable)
Largo , Ancho y Alto Transductor	0,06 x 0,21 x 0,34m
Peso en aire transductor	3kg
Ambiente	0 a 50° C
Potencia de transmisión de salida	2kW (pulso), 5kW y 10kW (w/pulso) opcional LPT- 2,5, o Amplificador de potencia 10
Resolución de Strata	8 cm sobre los 30 m de penetración del fondo (depende del tipo de fondo)



**Figura 16.** Rack del computador de adquisición de datos con el sistema BATHY 2010.



**Figura 17.** Ejemplo de perfil del subfondo marino(formato SEG-Y) con BATHY 2010.

### 2.2.3 Falmouth Scientific, Inc: 1 modelo



#### 2.2.3. a) Modelo 10. HMS-622 CHIRPceiver

*Descripción:* El HMS-622 CHIRPceiver, está disponible en configuraciones de frecuencias duales e individuales, y es compatible con tres bandas de frecuencia: LF estándar (1kHz-10kHz), así como ULF opcional (200Hz-2kHz) y HF (8kHz-23kHz). Un convertor análogo digital (A/D) está disponible para el FSI Bubble Gun<sup>TM</sup> u otros sistemas sísmicos, y tiene una interfaz Ethernet estándar para datos y señales de control

**Tabla 13.** Especificaciones técnicas de SBP HMS-622 CHIRPceiver Canal de baja frecuencia (estándar). Fuente: [http://www.falmouth.com/images/HMS-622\\_Chirp\\_Subbotom\\_10april2015.pdf](http://www.falmouth.com/images/HMS-622_Chirp_Subbotom_10april2015.pdf).

Especificación Técnica	Valores
Medidas transductor.	0,28 × 0,37 × 0,30m (peso:17kg)
Transmisor y Transductor.	Sistema de 1 a 4 transductores con frecuencias bajas de 3,5kHz, transductores para sistemas de torres y montados lateralmente y de 4 a 35 para sistemas montados en el casco
Potencia de Salida.	2,3kW, 15% del ciclo de trabajo a 650Hz para 212dB a 1μPa a 1m nominal- 4kW máximo para reducir el ciclo de trabajo.
Rango de Frecuencia.	Barridos entre los 1 y 8kHz.
Radiación del transductor.	45° cónica (para 4 sistemas 2×2)

**Tabla 14.** Especificaciones técnicas de SBP HMS-622 CHIRPceiver Canal de **ultra** baja frecuencia (opcional). Fuente: [http://www.falmouth.com/images/HMS-622\\_Chirp\\_Subbotom\\_10april2015.pdf](http://www.falmouth.com/images/HMS-622_Chirp_Subbotom_10april2015.pdf).

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Transmisor y Transductor.	Transductores QTY 2 AT-650
Potencia de Salida.	2,3kW, 15% del ciclo de trabajo a 650 Hz para 204dB a 1μPa a 1m nominal- 4kW máximo para reducir el ciclo de trabajo.
Rango de Frecuencia.	Barridos entre los 200Hz y 2kHz.
Radiación del transductor.	Omni.

**Tabla 15.** Especificaciones técnicas de SBP HMS-622 CHIRPceiver Canal de alta frecuencia (opcional). Fuente: [http://www.falmouth.com/images/HMS-622\\_Chirp\\_Subbotom\\_10april2015.pdf](http://www.falmouth.com/images/HMS-622_Chirp_Subbotom_10april2015.pdf).

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Transmisor y Transductor.	1 sistema de 7 Transductores de alta frecuencia
Potencia de Salida.	1kW, 15% del ciclo de trabajo a 650Hz para 214dB a 1μPa a 1m nominal- 4kW máximo para reducir el ciclo de trabajo.
Rango de Frecuencia.	Barridos entre los 8 y 23kHz.
Radiación del transductor.	27° cónica

## 2.2.4 EdgeTech: 3 modelos

### 2.2.4. a) 3100 PORTABLE SBP SYSTEM

*Descripción:* El 3100 PORTABLE es un sistema de versión portátil. Funciona con la tecnología Chirp y proporciona excelente resolución y una buena penetración. El equipo es muy requerido para aplicaciones en ríos, lagos, lagunas y aguas someras y aguas oceánicas de hasta 300 m de profundidad. En general, el sistema fue diseñado para clientes que requieren un sistema portátil que se puede utilizar en barcos más bien pequeños y a su vez obtener una buena imagen de perfil del subfondo marino.

El sistema tiene dos tipos de perfiladores (SB-424 y SB-216S). Ambos son SBP tipo towfish, lo cual los hace independientes de los movimientos del barco y que operan en diferentes rangos de frecuencia y sirven para distintas aplicaciones, debido a que el primero ofrece mejor resolución; y el segundo, mejor penetración.

#### 2.2.4. a1) Modelo 11. SB-424

**Tabla 16.** Especificaciones técnicas de SBP SB-424. Fuente: <http://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2014/09/3100-Brochure-072414.pdf>

Especificación Técnica	Valores
Rango de Frecuencia.	4 – 24kHz
Resolución Vertical (depende o un pulso seleccionado).	4 – 8cm
Penetración en arenas calcáreas.	2m
Penetración en arcilla.	40m
Medidas del transductor.	0,34 × 0,50 × 0,77m
Peso en el agua transductor.	18kg
Peso en el aire transductor.	45kg
Máxima profundidad columna de agua towfish.	300m

2.2.4. a2) Modelo 12. SB-216S

**Tabla 17.** Especificaciones técnicas de SBP SB-216S Fuente: (<http://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2014/09/3100-Brochure-072414.pdf>).

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Rango de Frecuencia.	2- 16kHz
Resolución Vertical (depende o un pulso seleccionado).	6 - 10cm
Penetración en arenas calcáreas.	6m
Penetración en arcilla.	80m
Medidas del transductor.	0,40 × 0,67 × 1,05m
Peso en el aire.	32kg
Peso en el agua.	76kg
Máxima profundidad de columna de agua tow fish.	300m

2.2.4. b) Modelo 13.SB-0512i

*Descripción:* El SBP 3200 es un sistema de alta penetración, con tecnología Chirp Spectrum y utiliza banda ancha de frecuencia modulada (FM). Esto genera imágenes con una alta resolución. El equipo es útil para trabajos estratigráficos en el subfondo marino de océanos, lagos y ríos con una profundidad máxima de 300 m en la columna de agua.

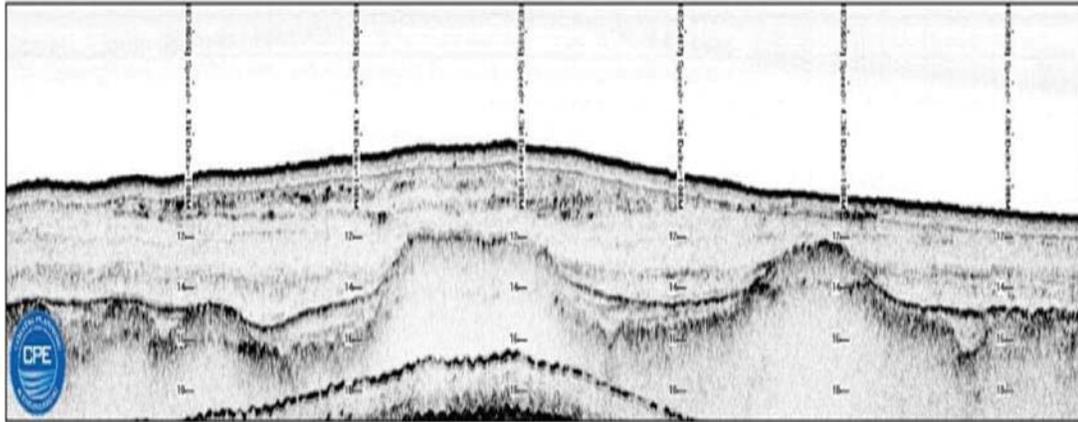
Este sistema cuenta con tres diferentes opciones de towfish: el SB-0512i y los dos towfish mencionados anteriormente para el Sistema 3100 (SB-216S y SB-424), a frecuencias diferentes, dependiendo de la penetración y resolución que se requiera obtener.

**Tabla 18.** Especificaciones técnicas de SBP SB-0512i. Fuente: <http://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2014/09/3200-Brochure-072414.pdf>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Rango de Frecuencia.	500Hz - 12kHz
Resolución Vertical (depende del pulso seleccionado).	8 - 20cm
Penetración en arenas calcáreas.	20m
Penetración en arcilla.	200m
Medidas del transductor.	160cm
Peso en el aire transductor.	68kg
Peso en el agua transductor.	204kg
Máxima profundidad de columna de agua towfish.	300m



**Figura 18.** Towfish del sistema SB-0512 de EdgeTech.



**Figura 19.** Perfil de capas de Arena obtenidos con el equipo SB 424.

### **2.2.5 Teledyne Gavia: 1 modelo**

#### *2.2.5. a) Modelo 14.GAVIA AUV*

*Descripción:* El equipo Gavia AUV creado por Teledyne Gavia, funciona a través de la Tecnología Chirp III, la cual utiliza acústica digital de transmisión y procesamiento de filtro adaptivo para conseguir, tanto una alta resolución, cómo una buena penetración.

**Tabla 19.** Especificaciones técnicas de GAVIA AUV. Fuente: [http://teledynegavia.com/\\_\\_\\_documents/Gavia\\_SBP\\_AUV\\_Data\\_Sheet\\_lo](http://teledynegavia.com/___documents/Gavia_SBP_AUV_Data_Sheet_lo).

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Resolución de la señal	16 bit
Almacenamiento de datos	Formato SEG-Y
Tasa de disparos	15 pulsos por segundo máximo
Longitud del Pulso	Uso seleccionable de 1ms a 15ms
Potencia de salida	1,8kW peak con 16kHz o 216Watts de promedio a 12% del ciclo de trabajo.
Tipo de Transductor y frecuencia utilizable	Banda de Chirp entre 14 y 21kHz
Máxima profundidad columna de agua	1.000m
Consumo de potencia	35watts
Medidas del transductor	0,20 x 0,50 x 0,62m
Peso en aire transductor	19,4kg

## **2.2.6iXBlue: 1 modelo**

### *2.2.6. a) Modelo 15.ECHOES 10000*

*Descripción:* ECHOESS 10000 es un SBP de baja frecuencia, diseñado para ambientes de aguas someras. Dentro de su configuración están incorporados transductores cerámicos Tonpiz, los cuales permiten la entrega de datos con una alta calidad, en términos de resolución de la estratigrafía del subfondo marino.

**Tabla 20.** Especificaciones técnicas de ECHOES 10000. Fuente: <https://www.ixblue.com/products/sub-bottom-profilers-and-very-low-frequency-transducers>.

<b>Especificación Técnica</b>	<b>Valores</b>
Configuración.	Montado en una pértiga
Frecuencia.	5 – 15kHz
Resolución.	8cm
Poder de transmisión.	2 a 4kVA
Largo , Ancho y Alto del Transductor.	0,20 x 0,47 x 0,68m
Peso en el aire / Peso en el agua transductor.	13 kg / 26kg



**Figura 20.** Configuración Típica del ECHOES 1000.

## 2.2.6 Knudsen Engineering Limited: 1 modelo

### 2.2.6. a) Modelo 16.PINGER SBP

*Descripción:* Es un nuevo equipo de Knudsen Engineering Limited, diseñado para aguas someras, a través de la tecnología Pinger, que proporciona una mayor directividad, además de trabajar con un ancho de banda mayor, lo cual permite una operación simultánea en múltiples frecuencias.

**Tabla 21.** Especificaciones técnicas de PINGER SBP. Fuente: <https://knudseneng.com/files/pdfs/D131-05191-Rev5.0-Pinger%20SBP.pdf>.

Especificación Técnica	Valores
Rango de Frecuencia utilizable.	3,5 – 200kHz
Poder de Salida.	Sobre los 2kW
Longitud del Pulso.	62,5µs / 64ms
Tasa de repetición del pulso.	20Hz
Ganancia.	Manual, Automática (AGC) y variada en el tiempo (TVG)
Ganancia Análoga.	96dB programable con ganancia análoga
Ganancia de tiempo variable(TVG).	20logR, 40logR
Visualización del Zoom.	Dinámica de posicionamiento de ventanas y tamaños
Interface.	Usando control standard para PC Windows
Largo , Ancho , Alto y peso en aire Transductor.	0,38 x 0,51 x 0,86m (Peso: 21kg)

### 2.3 Parámetros Comunes

De la revisión actualizada que se realizó de todos los folletos por fabricante con especificaciones técnicas para los 16 modelos preseleccionados en sus respectivos sitios en Internet, se logró determinar varios parámetros comunes.

Estos parámetros o variables, permitirán efectuar una tabla comparativa en el Capítulo 4, para posteriormente poder realizar un análisis detallado en el Capítulo 6 de cada uno de los modelos y asociarlos a varios criterios, los cuales podrán determinar cuál es el más idóneo, dependiendo del objetivo o uso que se le pretenda dar en una futura investigación o trabajo de campo.

Referido a lo anterior, los principales parámetros en común están listados en la Tabla 22, la cual se refiere al número de veces que se repitió cada una de estas especificaciones dentro de los 16 modelos estudiados.

**Tabla 22.** Principales parámetros en común (con su respectiva frecuencia) descritos en las especificaciones técnicas de los 16 modelos de SBP preseleccionados.

Parámetro	Frecuencia
Resolución	16
Penetración	16
Rango de frecuencias	16
Profundidad máxima de columna de agua	16
Ancho y alto de transductor	16
Forma de montaje	13
Nivel primario fuente	10
Largo del transductor	10
Ancho de pulso	9
Tipo de transductor	8

<b>Parámetro</b>	<b>Frecuencia</b>
Transmisión (ancho banda)	7
Tasa de disparos (pings)	7
Formato de datos digitales	7
Peso en aire del transductor	7
Entrada auxiliar	6
Salida auxiliar	6
Fuente de alimentación	6
Potencia de salida	6
Longitud del pulso	5
Modo de zoom	4
Peso en agua del transductor	4
Orientación del haz	3
Rango zoom	3
Visualización	3
Precisión de profundidad	3
Posición geográfica	3
Datos de entrada	3
Salida de impresora	3
Tasa de transmisión	3
Marca de objetivos	3
Datos de salida	3
Número de haces simultáneos	1
Estructura lóbulo lateral	1
Resolución horizontal	1
Software utilizado	1
Controles	1
Consumo de potencia	1
Ganancia	1
Interface	1

Se estableció que si el parámetro técnico se repetía en más de 1 modelo, pasaba a denominarse “parámetro en común” (color gris en Tabla 22). A su vez, todos los parámetros que tan solo fuesen mencionados en una oportunidad, fueron descartados para posteriores comparaciones y análisis en los capítulos 4 y 5 (color blanco en Tabla 22).

En base a lo anterior, se pudo apreciar que 31 de los 40 parámetros que se listaron en los folletos técnicos por empresa, corresponden a parámetros en común. También, cabe destacar que solo cinco parámetros se repitieron en todos los modelos:

- resolución,
- penetración,
- profundidad máxima,
- medidas del transductor y
- rango de frecuencias.

Los 31 parámetros comunes serán agrupados en una tabla comparativa en los resultados de este trabajo y servirán de indicadores, que junto a los Criterios Primarios y Criterios Secundarios de comparación (que serán descritos en los próximos capítulos), servirán como herramienta de análisis y toma de decisiones al momento de adquirir uno de estos modelos.

### 3. ESTUDIOS DE CASO CON APLICACIÓN DIRECTA DE SBP

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo muestra una selección y presentación de artículos científicos en Internet asociados a investigaciones publicadas y citadas, como también a folletos técnicos entregados por las firmas para la mayor parte de los modelos presentados en el Capítulo 2. Concretamente se verificará el grado de utilización que han tenido los modelos preseleccionados en el Capítulo 2, tanto en investigación científica, como en aplicaciones comerciales.

Todos los artículos y folletos presentados en este capítulo deben estar relacionados de alguna manera con el uso de los 16 SBP preseleccionados anteriormente. En caso contrario, se descartarán.

Específicamente, se investigó, de manera directa en Internet en el sitio *webScielo* (<http://www.scielo.cl>) y se creó una cuenta en los portales *Scopus* (<http://www.scopus.com>) y *Web of Science* (<http://login.webofknowledge.com>), todos asociados al sistema de biblioteca de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, PUCV (<http://biblioteca.ucv.cl/>). Todo esto, debido a que es más fácil tener acceso a todas las publicaciones computadores radicados en edificios de la PUCV, que de manera particular. De esta revisión se destacan publicaciones en las siguientes revistas:

- Marine Geology,
- Deep- Sea Research I y II,
- Revista Brasileira de Geofísica,
- Earth and Planetary Science Letters,
- Quaternary Research,
- Marine Geophysical Research,
- Marine and Petroleum Geology,

- Quaternary Science Reviews,
- Global Biogeochemical Cycles,
- Geomorphology,
- Geological Journal,
- Continental Sea Research,
- Journal of Archeological Science,
- Chinese Journal of Geophysics,
- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology y
- Tectonics.

Se encontraron un total de 57 estudios relacionados con el área de interés. Luego, se filtró la búsqueda en base al siguiente criterio: primero, se pesquisó con el nombre de “**sub-bottom profiler**” en el buscador; luego, se consideraron todos los artículos que fueron publicados en los últimos 10 años, esto quiere decir, en el período 2005 – 2015.

Se consideró el período 2005-2015 para efectuar un análisis actualizado con respecto a las investigaciones asociadas a los SBP y de manera tal que quienes utilicen este documento en el ámbito comercial o académico, dispongan de información representativa a la hora de adquirir alguno de estos equipos.

Finalmente, se tomó en consideración sólo aquellos estudios que fueron citados más de 10 veces en otras publicaciones. El procedimiento anterior arrojó un total de 27 artículos seleccionados.

En orden por año de publicación, el listado de estudios seleccionados por cita es el siguiente:

1. Jakobsson *et al.*, 2005.
2. Evans *et al.*, 2006.
3. Beck *et al.*, 2007.
4. Fanetti *et al.*, 2008.
5. Dowdeswell *et al.*, 2008.
6. Ramana *et al.*, 2009.
7. Noormets *et al.*, 2009.
8. Evans *et al.*, 2009.
9. Marsset *et al.*, 2010.
10. Chen *et al.*, 2010.
11. Dewangan *et al.*, 2011.
12. Larter *et al.*, 2012.
13. Ferland *et al.*, 2012.
14. Klages *et al.*, 2013.
15. Baeten *et al.*, 2013.
16. Hayashiet *al.*, 2013.
17. Martínez *et al.*, 2013.
18. Hsu *et al.*, 2013.
19. Da Silva *et al.*, 2014.
20. Iacono *et al.*, 2014.
21. Gales *et al.*, 2014.
22. De Santis *et al.*, 2014.
23. Saint-Ange *et al.*, 2014.
24. Mazieres *et al.*, 2015.
25. Mattei & Giordano, 2015.
26. Liu *et al.*, 2015.
27. Hao *et al.*, 2015.

De estos 27 estudios mencionados, se optó por un total de 8, debido a que en estos realmente se utilizaron alguno de los 16 perfiladores de las firmas pre-seleccionadas en el Capítulo 2. Por ende, se descartaron los restantes 19 estudios, por no tener sus metodologías relación con los propósitos de este trabajo de titulación.

Los ocho estudios seleccionados son los siguientes:

- 10: Gas seepage, pockmarks and mud volcanoes in the near shore of SW Taiwan.
- 14: First geomorphological record and glacial history of an inter-ice stream ridge on the West Antarctic continental shelf.
- 18: Tide-modulated gas emissions and tremors off SW Taiwan.
- 19: Interpretation of sedimentary processes using echo-character distribution: case study of Piraque-AÇU and Piraque-Mirim estuarine system, Aracruz – ES (Brazil).
- 20: The West Melilla cold water coral mounds, Eastern Alboran Sea: Morphological characterization and environmental context.
- 23: Multiple failure styles related to shallow gas and fluid venting, upper slope Canadian Beaufort Sea, northern Canada
- 25: Integrated geophysical research of Bourbonic shipwrecks sunk in the Gulf of Naples in 1799.
- 27: Long-lived deformation in the southern Mississippi Embayment revealed by high-resolution seismic reflection and sub-bottom profiler data.

La sección 3.2 denominada INFORMACIÓN CIENTÍFICA, muestra estos ocho estudios, específicamente presentados en la sub-sección 3.2.1, donde se realizó una caracterización de cada uno de ellos, identificando los siguientes parámetros de análisis:

- investigación científica / aplicación comercial;
- objetivo planteado (caracterización, prospección, localización o reconocimiento de estructuras);
- modelo de SBP utilizado;
- lugar (zona geográfica de estudio);
- resolución y penetración logradas y
- software de procesamiento de datos, en el caso de ser mencionado en la publicación.

De los 16 perfiladores descritos en el Capítulo 2, solo fueron utilizados 6 en los 8 estudios mencionados anteriormente, habiendo 2 modelos de perfiladores que se mencionan cada uno en 2 estudios. A continuación, se listan los 6 modelos utilizados:

- Modelo 2: *SES 2000 Light* de la firma Innomar (estudio 25).
- Modelo 7: *Stratabox* de la firma Syqwest (estudio 19).
- Modelo 10: *HMS-622 CHIRPceiver* de la firma Falmouth Scientific, Inc. (estudios 18 y 20).
- Modelo 11: *SB-424* de la firma EdgeTech (estudio 27).
- Modelo 13: *3200 High Penetration SBP* de la firma EdgeTech (estudio 14).
- Modelo 15: *ECHOES* de la firma iXBlue (estudios 10 y 23).

Por su parte, en la sub-sección 3.2.2 se presentan todas las aplicaciones que se encontraron para los perfiladores preseleccionados, pero obtenidas directamente de resúmenes presentados en congresos, almacenados por cada firma en Internet.

En la sección 3.3, se agrupan los parámetros nombrados en la sección anterior en una tabla, con el objeto de tener una base de datos para los resultados que se plantean en una tabla comparativa en el Capítulo 4 y posteriormente se analizan en el 5. Por otra parte se analizan los datos obtenidos de los resúmenes presentados en congresos encontrados en los diferentes sitios en Internet, intentando ser un complemento a la información recabada en las publicaciones científicas mencionadas anteriormente.

## 3.2 INFORMACIÓN CIENTÍFICA

### 3.2.1 Publicaciones Científicas

- a) **Chen, S.-C., S.-K. Hsu, C.-H. Tsai, C.-Y. Ku, Y.-C. Yeh & Y. Wang. 2010. Gas seepage, pockmarks and mud volcanoes in the near shore of SW Taiwan. Mar. Geophys. Res., 31: 133-147.**

- Datos generales:
  - Tipo de Estudio: investigación científica.
  - Embarcación utilizada: datos de R/V Ocean Research 1.
  - Fecha de muestreo: noviembre de 2007.
  - Lugar: zona costera de Taiwán.
  - Objetivo: características del subsuelo marino, relacionada con hidratos de gas.
  
- Datos técnicos:
  - SBP utilizado: Modelo 15.
  - Frecuencia utilizada: 6,1kHz.
  - Penetración lograda: no hay datos específicos.
  - Resolución obtenida: 15 a 25cm.
  - Software procesamiento: PROMAX.

- Aplicación del SBP en el estudio:  
En este estudio se utilizó el perfilador ECHOES de la firma iXBlue para los sedimentos de la zona costera de Taiwán. En la metodología descrita, se realizaron tres perfiles, los cuales ayudaron a revelar la existencia de cinco filtraciones de gases. Lo anterior se complementó con un sonar de barrido lateral e imágenes de towcam.
- b) **Klages, J.P., G. Kuhn, C.-D. Hillenbrand, A.G.C. Graham, J.A. Smith, R.D. Larter & K. Gohl.2013. First geomorphological record and glacial history of an inter-ice stream ridge on the West Antarctic continental shelf. Quaternary Science Reviews, 61: 47- 61.**
- Datos generales:
  - Tipo de Estudio: investigación científica.
  - Embarcación utilizada: datos de ANT-XXVI / 3 del RV Polarstern.
  - Fecha de muestreo: enero de 2010.
  - Lugar: plataforma continental, Antártica Occidental.
  - Objetivo: estudio geomorfológico de una zona glacial.
- Datos técnicos:
  - SBP utilizado: Modelo 13.
  - Frecuencia utilizada: 2,5 – 5,5kHz.
  - Penetración lograda: 15 m (sustrato homogéneo).
  - Resolución obtenida: no hay datos específicos.
  - Software procesamiento: DISCOVER.
- Aplicación del SBP en el estudio:  
Los perfiles obtenidos en este estudio, con el modelo 3200 HP-SBP de la firma EdgeTech, sirvieron para obtener resultados detallados en la plataforma continental de la Antártica occidental. Específicamente los perfiles se obtuvieron entre los valles de la isla del Pino-Thwaites (PITPIS) y la corriente paleo-hielo (COPIS).

En conjunto, ambas localidades formaron un relieve particular, que es totalmente diferente a la de los canales de transmisión en hielo adyacentes, y al parecer único en el contexto de estudios de geomorfología previamente efectuados en el fondo marino antártico. Cabe destacar que el subfondo, en el cual se trabajó, era un fondo relativamente blando y homogéneo.

**c) Hsu, S.-K., Shiou-Ya Wang, Yen-Che Liao, T.F. Yang, S. Jan, J.-Y. Lin & S.-C. Chen. 2013. Tide-modulated gas emissions and tremors off SW Taiwan. Earth and Planetary Science Letters, 369-370: 98-107.**

- Datos generales:
  - Tipo de Estudio: investigación científica.
  - Embarcación utilizada: no hay datos específicos.
  - Fecha de muestreo: no hay datos específicos.
  - Lugar: costa oeste de Taiwán.
  - Objetivo: correlación de las emisiones de gases con mareas y temblores.
  
- Datos técnicos:
  - SBP utilizado: Modelo 10.
  - Frecuencia utilizada: 3,8kHz.
  - Penetración lograda: no hay datos específicos.
  - Resolución obtenida: no hay datos específicos.
  - Software procesamiento: no hay datos específicos.

- Aplicación del SBP en el estudio:

Los datos obtenidos del perfilador HMS-622 CHIRPceiver de la firma Falmouth Scientific, entregaron resultados favorables para los objetivos del estudio, el cual era correlacionar los parámetros de marea y temblores del fondo marino de la costa oeste de Taiwán con las emisiones de gases resultantes de los perfiles efectuados en la zona.

Con los perfiles que se obtuvieron, se pudo apreciar presencia de filtraciones de gases en forma de chimeneas y columnas de supresión acústica vertical.

**d) Da Silva, A. E., P. S. Menandro, K. A. do Nascimento, V.da S.Quaresma & A. C. Bastos.2014. Interpretation of sedimentary processes using echo-character distribution: case study of Piraque-AÇU and Piraque-Mirim estuarine system, Aracruz – ES (Brazil). Revista Brasileira de Geofísica, 32: 301-309.**

- Datos generales:

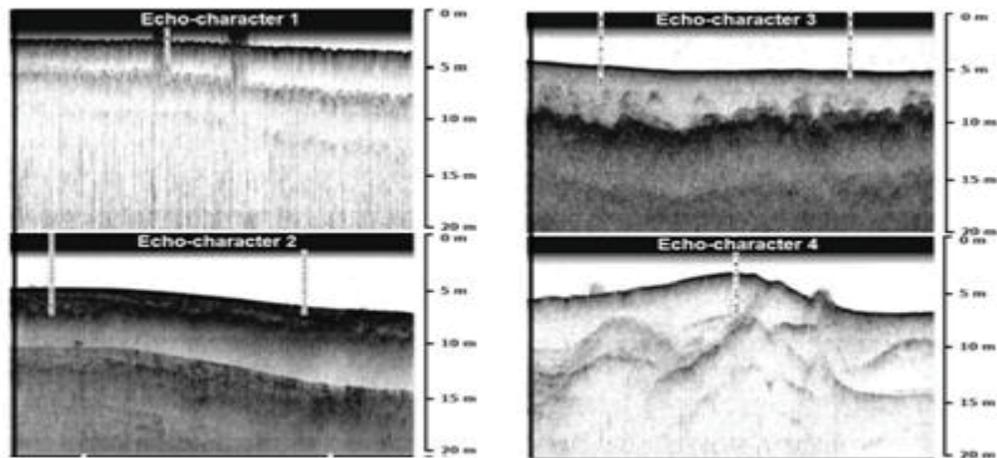
- Tipo de Estudio: investigación científica.
- Embarcación utilizada: no hay datos específicos.
- Fecha de muestreo: no hay datos específicos.
- Lugar: sistema estuarino de Piraque-Açu y Piraque-Mirim, Aracruz,Brasil.
- Objetivo: correlación de datos acústicos históricos con características del sedimento efectuadas por un SBP.

- Datos técnicos:

- SBP utilizado: Modelo 7.
- Frecuencia utilizada: 10kHz.
- Penetración lograda: 20m.
- Resolución obtenida: no hay datos específicos.
- Software procesamiento: SonarWiz-Mapa 5.

- Aplicación del SBP en el estudio:

En este estudio realizado en el sistema estuarino de Aracruz, Brasil, se analizaron 42 perfiles de subfondo, dentro de las cuales operó el perfilador Stratabox de la firma Syqwest, el cual ayudó a identificar en los sedimentos 4 tipos distintos de ecos o reflexiones relacionadas con el tipo de fondo. El primero de ellos EC1 es muy reflectivo en la parte superficial inferior y a su vez con una baja penetración de la señal acústica. El EC2 también dio como resultado una baja penetración. El EC3, por el contrario, presentó una alta reflectividad en la superficie y una buena penetración, lo que permitió distinguir la presencia de gas en los sedimentos. Por último, el EC4 se caracterizó por presentar una alta penetración, con una geometría irregular dentro del sedimento (Figura 21).



**Figura 21.** Los diferentes tipos de ecos obtenidos por el perfilador de subfondo Stratabox a 20 m de profundidad (da Silva *et al.*, 2014).

e) **Lo Iacono, C, E. Gràcia, C. R. Ranero, M. Emelianov, V. A. I. Huvenne, R. Bartolomé, G. Booth-Rea, J. Prades & MELCOR Cruise Party. 2014. The West Melilla cold water coral mounds, Eastern Alboran Sea: Morphological characterization and environmental context. Deep-Sea Research, 99: 316- 326.**

- Datos generales:

- Tipo de Estudio: investigación científica.
- Embarcación utilizada: no hay datos específicos.
- Fecha de muestreo: 2011-2012.
- Lugar: Mar de Alborán.
- Objetivo: caracterización morfológica y contexto ambiental de corales.

- Datos técnicos:

- SBP utilizado: Modelo 10.
- Frecuencia utilizada: 0,5 – 6kHz.
- Penetración lograda: no hay datos específicos.
- Resolución obtenida: 0,2m.
- Software procesamiento: Surfer y ESRI ArcGis.

- Aplicación del SBP en el estudio:

Los perfiles obtenidos con el perfilador HMS-622 CHIRPceiver de la firma Falmouth Scientific ayudaron a caracterizar el contexto ambiental de los corales en el Mar de Alborán, ubicado frente a Marruecos y se complementó la información obtenida con datos de ADCP y ROV en los cruceros TOPOMED GASSIS en 2011 y MELCOR 2012.

f) **Saint-Ange, F., P. Kuus, S. Blasco, D. J.W. Piper, J. H. Clarke, K. MacKillop. 2014. Multiple failure styles related to shallow gas and fluid venting, upper slope Canadian Beaufort Sea, northern Canada. Marine Geology, 355: 136-149.**

- Datos generales:

- Tipo de Estudio: investigación científica.
- Embarcación utilizada: no hay datos específicos.
- Fecha de muestreo: 2009.
- Lugar: Mar de Beaufort, Canadá.
- Objetivo: estudio de fallas múltiples relacionado con gases.

- Datos técnicos:

- SBP utilizado: Modelo 15.
- Frecuencia utilizada: 3,5kHz.
- Penetración lograda: no hay datos específicos.
- Resolución obtenida: 0,15m.
- Software procesamiento: PROMAX.

- Aplicación del SBP en el estudio:

El perfilador ECHOES en este estudio fue operado en doble hilera, transmitiendo uno siempre antes que el otro, para obtener una cobertura completa del fondo marino del Mar de Beaufort en Canadá.

Este perfilador también recogió datos de retrodispersión, no viéndose afectada la geometría del fondo en ningún caso.

**g) Mattei, G.& F.Giordano. 2015. Integrated geophysical research of Bourbonic shipwrecks sunk in the Gulf of Naples in 1799. Journal of Archeological Science, 1: 64-72.**

- Datos generales:

- Tipo de Estudio: investigación científica.
- Embarcación utilizada: no hay datos específicos.
- Fecha de muestreo: 2015
- Lugar: Golfo de Nápoles
- Objetivo: localización de barcos de guerra hundidos de 1799.

- Datos técnicos:

- SBP utilizado: Modelo 2.
- Frecuencia utilizada: 15kHz.
- Penetración lograda: no hay datos específicos.
- Resolución obtenida: 1 m.
- Software procesamiento: Sonarweb.

- Aplicación del SBP en el estudio:

Para localizar los barcos de guerra hundidos en la batalla de 1799 en las costas de Nápoles en Italia, se utilizó el perfilador SES 2000 Light de la firma alemana Innomar. Para ello, los perfiles se obtuvieron en una línea de navegación oeste-este de 4.900m de longitud. Se utilizó una fuente acústica, con muy alta resolución y una acústica de impulso de aproximadamente  $1\text{pulso}\cdot\text{s}^{-1}$ , ya que es un perfilador adaptado para aguas profundas e investigación arqueológica, debido a su excelente resolución. Por último, los datos de naufragios se introdujeron como puntos en formato SIG para procesarlos finalmente y lograr el objetivo de este estudio.

**h) Hao, Y., K. McIntosh & M. B. Magnani. 2015. Long-lived deformation in the southern Mississippi Embayment revealed by high-resolution seismic reflection and sub-bottom profiler data. Tectonics, DOI: 10.1002/2014TC003750.**

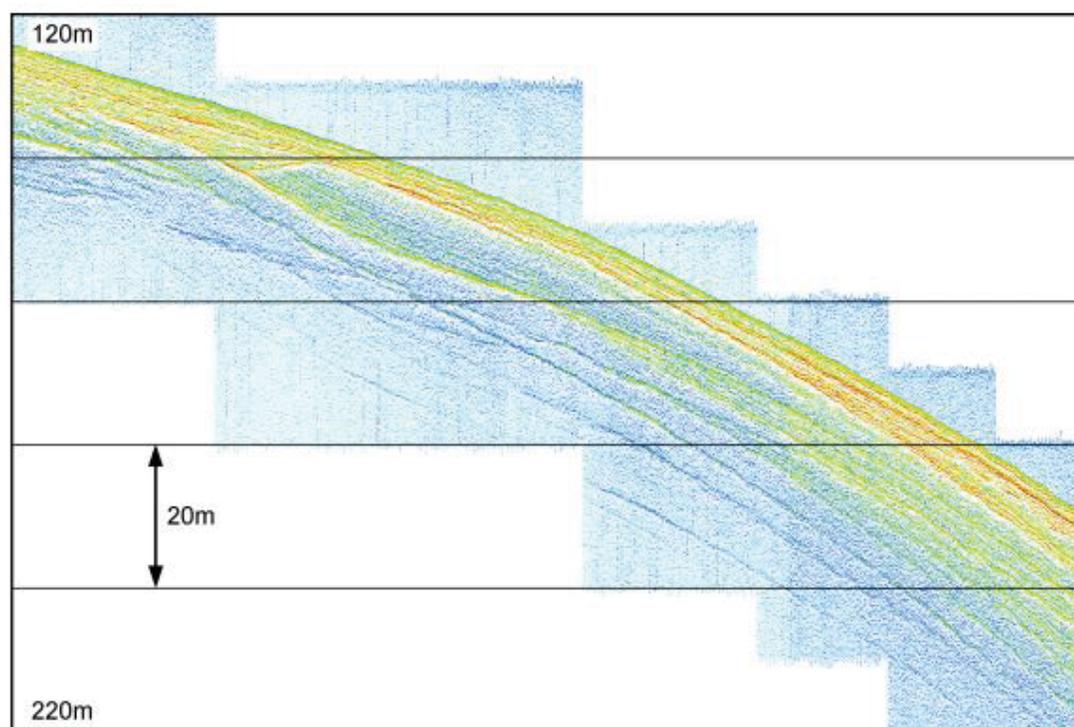
- Datos generales:
  - Tipo de Estudio: investigación científica.
  - Embarcación utilizada:
  - Fecha de muestreo: datos de 2011, tercera etapa del proyecto Mississippi.
  - Lugar: río Mississippi.
  - Objetivo: caracterización de la deformación del subfondo del río, en el período Cuaternario.
  
- Datos técnicos:
  - SBP utilizado: Modelo 11.
  - Frecuencia utilizada: no hay datos específicos.
  - Penetración lograda: 30 m
  - Resolución obtenida: no hay datos específicos.
  - Software procesamiento: no hay información.
  
- Aplicación del SBP en el estudio:

En este estudio se utilizó el perfilador SB-424 en dos secciones del río Mississippi, en la tercera etapa del proyecto Mississippi, Estos perfiles detallaron imágenes representativas de la situación del río, fallas y actividad tectónicas presentes en el período Cuaternario.

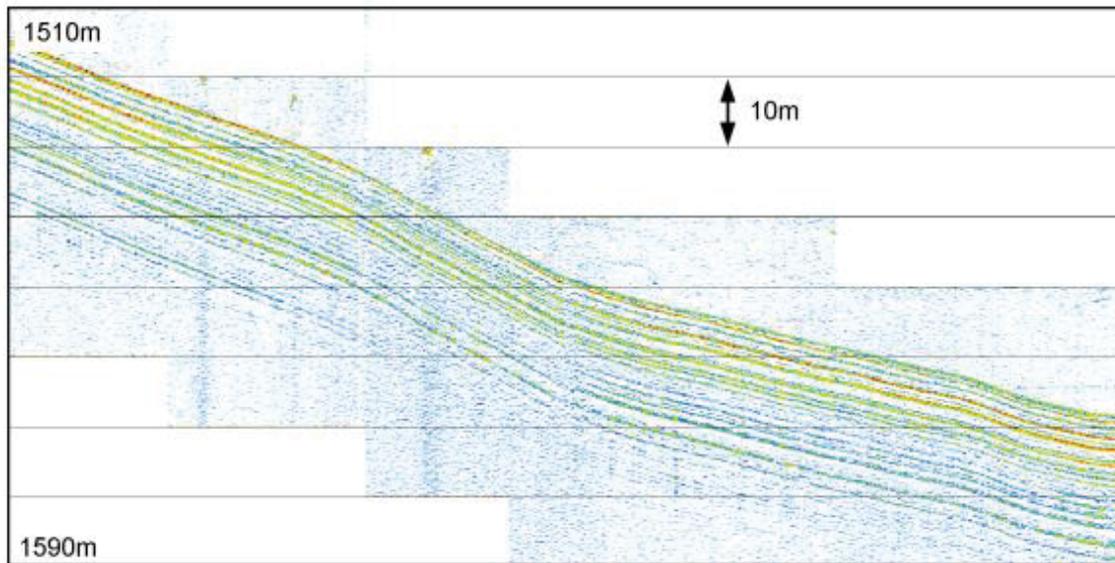
### 3.2.2. Resúmenes Presentados en Congresos

#### Modelos 1 al 6: SES-2000

La línea de perfiladores de subfondo SES-2000 de la firma Innomar se utilizan para una gran variedad de aplicaciones para clientes de todo el mundo, principalmente por empresas de dragado, oficinas de navegación marítima y transporte marítimo, obteniéndose muy buenos resultados en zonas someras, como también en lugares sobre los 1.500m de profundidad de agua. Esto se puede apreciar en las Figuras 22 y 23 (Wunderlich & Müller, 2003).



**Figura 22.** Ecograma SES- 2000 (Perú; frecuencia: 8kHz; rango: 120- 220m) (Innomar, 2006).



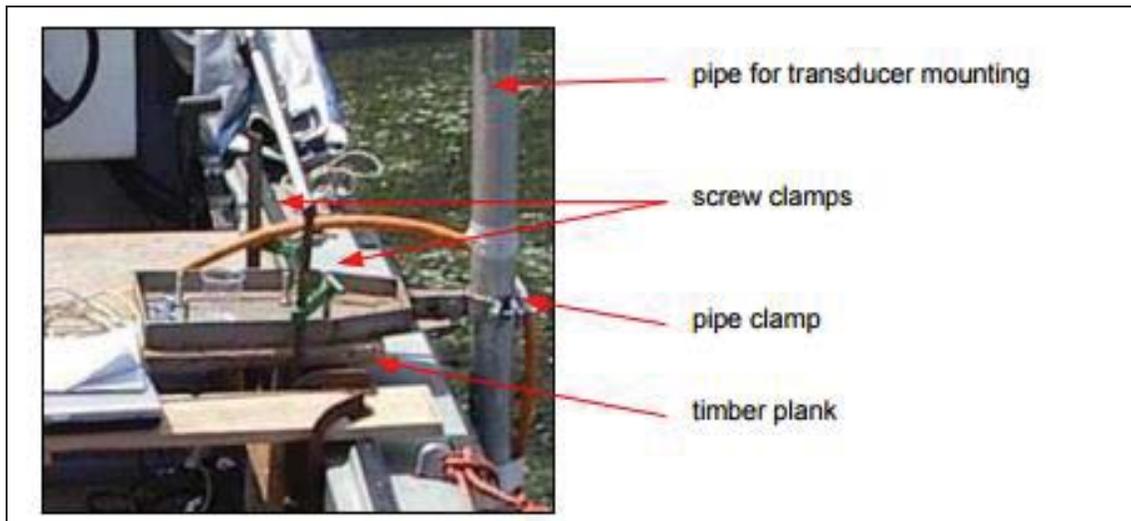
**Figura 23.** Ecograma obtenido con el SBP SES-2000 (Mar de Okhotsk; frecuencia: 8kHz; rango: 1510-1590m) (Innomar, 2006).

El transductor de estos SBP se instala en una embarcación, ya sea en el casco o junto a él, en el extremo de una pértiga, para mantener su funcionamiento normal y tener una buena toma de datos. Ejemplos de este uso en naves menores efectuados por Innomar se muestran a continuación:

*a) Estudio en laguna Venecia, Italia con un pequeño bote a motor*

Madricardo *et al.* (2006), llevaron a cabo un estudio en la Laguna de Venecia con el sistema SES-2000, en un pequeño bote de motor. Previamente, el perfilador de sub-fondo SES-2000 COMPACT debió ser probado para producir imágenes del subfondo marino en aguas someras (alrededor de 0,7m de profundidad) y para detectar objetos arqueológicos enterrados en los estratos sedimentarios.

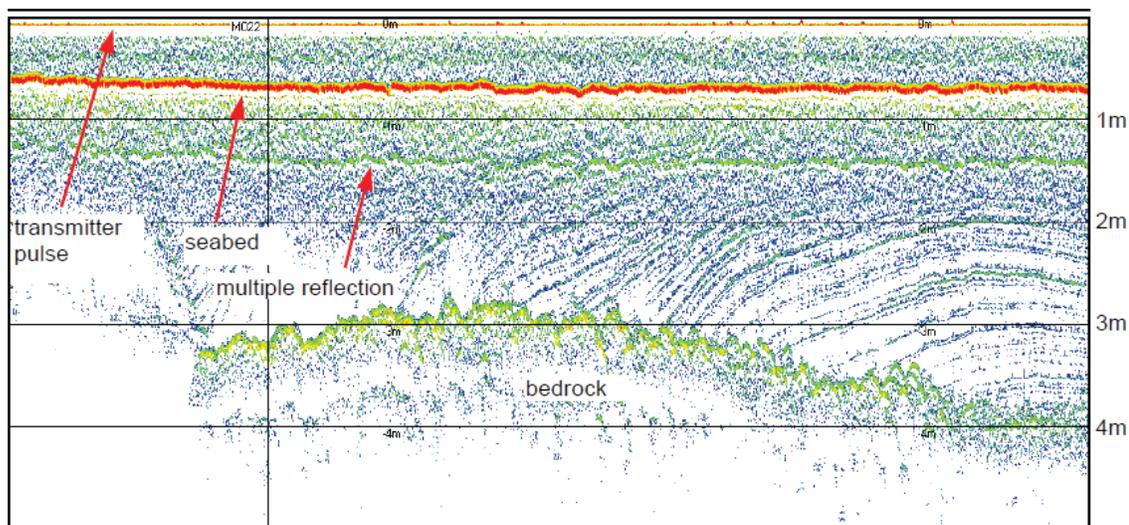
El transductor se fijó en la parte lateral de la embarcación usando una tubería. El tubo se montó en un tablón que se fijó en el barco con cuatro abrazaderas de tornillo. Como fuente de alimentación se utilizó un generador Honda EU10i.



**Figura 24.** Transductor montado en el bote y fijado con abrazaderas de tornillo (Madricardo *et al.*,2006).

La interpretación de los resultados de este estudio se aprecia en la Figura 25, donde se presentan dos ecos importantes (“seabed” y “bedrock”), mostrando una penetración de más de 3 metros a una profundidad de agua de 0,7m aproximadamente. Esto sólo es posible en los sedimentos blandos, los cuales son fuertes reflectores bajo el retorno de ecos múltiples del fondo marino.

Un problema con la penetración que se ve a menudo en aguas someras, especialmente en las zonas costeras durante el verano, es la formación de gases en los sedimentos, provocado por el aumento de temperatura en la columna de agua y a su vez la baja productividad biológica, lo cual genera una gran cantidad de materia orgánica en el fondo marino y / o en los decímetros superiores del sub-fondo marino. Este efecto hace que sea muy poco probable una buena penetración en el fondo marino.



**Figura 25.** Ecograma en la Laguna de Venecia, mostrando una penetración de más de 3m a una profundidad de agua de alrededor de 0,7m (Madricardo *et al.*,2006).

*b) Topografía en una zona de surgencia superficial utilizando un pequeño catamarán y un control remoto.*

En el marco de dos proyectos de investigación geológica, los autores Wunderlich *et al.* (2005), estudiaron los sedimentos del Holoceno tardío, en el área de Salzhaff costa afuera de Rerik (Alemania), principalmente para contribuir a la comprensión de los procesos sedimentarios de la Bahía de Mecklenburg. La profundidad del agua en esta área mostró valores entre los 0,5 y 5 metros.

En este caso se utilizó el perfilador SES 2000 Standard, con una profundidad de agua en esta zona, entre 0,5 y 5 metros. El transductor se montó en la proa de la embarcación, utilizando un tubo. Para la compensación de movimientos verticales, con los movimientos del propio barco, se midió con un sensor de movimiento (Kongsberg-Seatex MRU-Z), que se colocó junto al transductor.

Gran parte de la zona estudiada pertenece a aguas someras, lo cual no hace posible el acceso mediante una embarcación mayor. Por lo tanto se utilizó un pequeño catamarán para llevar el equipo de sonar (Figura 6). El perfilador fue controlado de forma remota mediante un SHF adicional de (2,5GHz).



**Figura 26.** Catamarán de estudio MESSIN durante la operación(Wunderlich *et al.*, 2005)

### **Modelos 7-8-9: STRATABOX**

NSN consultores, empresa estadounidense, utiliza constantemente los perfiladores de sub-fondo STRATABOX, principalmente en proyectos de aguas dulces y de cartografía. Los valores típicos que se trabajan con este equipamiento son de una frecuencia de 10kHz, resolución de 6cm y una penetración de hasta 40 metros principalmente.

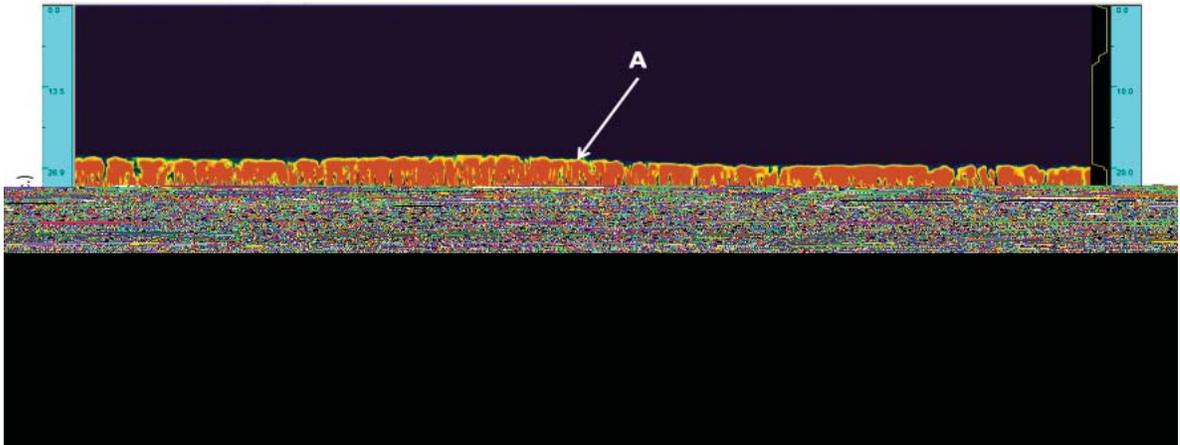
Algunas aplicaciones en las que NSN ha utilizado STRATABOX, incluyen:

- Cartografía geofísica.

- Investigaciones geotécnicas.
- Desarrollo de abastecimiento de agua.
- Análisis de impacto ambiental.
- Modelación hidrodinámica en Ambientes costeros.
- Asignación de recursos bentónicos.
- Análisis de estabilidad del suelo.
- Permisos Ambientales.
- Levantamientos Hidrográficos.
- Delineaciones de humedales.

NSN ha incorporado perfiles de SBP en una variedad de proyectos en todo el estado de Florida, así como en el Caribe. El volumen de arena y la profundidad a la superficie de la roca calculada en estos proyectos ha sido bastante precisa, y estas cuantificaciones han dado lugar a la utilización con éxito de las unidades de arena sumergidas (NSN, 2015).

El STRATABOX 3510 también ha sido utilizado en estudios geofísicos con una aplicación local, por ejemplo, en el río Shatt Al-Arab, en la parte central de la ciudad de Basora en Iraq el año 2010. El análisis de este estudio, hace referencia a que el perfil fue caracterizado por rasgos predominantes, bajo la superficie la penetración de la señal fue relativamente baja, atribuida a la existencia de una capa gruesa (soporte de carga de la zona). Por último, pudo apreciarse un objeto enterrado a más profundidad dentro del mismo perfil, como se puede apreciar en la figura 7 (Alaamer, 2010).



**Figura 27.** Porción de perfil STRATABOX 3510 en el río Shatt Al-Arab, Iraq (Alaamer, 2010)

### **Modelos 11 al 13: EdgeTech**

Un estudio hecho por la USGS en el cañón submarino Hells en E.E.U.U., muestra una aplicación directa por medio del perfilador SB-424 de EdgeTech. Todo está ejemplificado en un perfil efectuado con frecuencias de 4 a 24kHz, las cuales ayudaron a identificar la profundidad de los yacimientos del área (Figura 28).



**Figura 28.** Perfil SB-424 en el cañón Hells, USA (Alaamer, 2010).

En el resto de los modelos no se hallaron folletos comerciales dentro de los sitios web de las empresas que tuviesen una connotación aplicada, por ende se descartaron para su posterior análisis.

### **3.3 ANÁLISIS DE ESTUDIOS**

#### **3.3.1 Análisis de Publicaciones**

Los datos recopilados de cada uno de los estudios presentados en la sección 3.2, fueron agrupados en la Tabla 23, con el propósito de obtener una serie de parámetros comparativos, los cuáles ayuden a entender una posible tendencia y también a ejecutar un mejor análisis y entendimiento en el posterior análisis de los resultados de este trabajo de titulación en los capítulos 4, 5 y 6.

En la última columna de la tabla 23, se expresa un cálculo de la media o promedio de cada una de las variables presentadas (Frecuencia promedio, penetración y resolución ), de manera de generar un valor estándar de comparación de modelos que sirva de referencia para futuros cálculos.

**Tabla 23.** Agrupación de parámetros según estudio preseleccionado.

Parámetro	Estudio								
	10	14	18	19	20	23	25	27	Media
Tipo de estudio	IC	IC	IC	IC	IC	IEC	IC	IC	No aplica
Objetivo	CSG	GG	CP	CP	CM	CSG	LOE	CM	No aplica
SBP Usado	Modelo 15: ECHOES (iXBlue)	Modelo 13: 3200 HP-SBP (EdgeTech)	Modelo 10: HMS-622 CHIRPceiver (Falmouth)	Modelo 7: Stratabox (Syqwest)	Modelo 10: HMS-622 CHIRPceiver (Falmouth)	Modelo 15: ECHOES (iXBlue)	Modelo 2: SES 2000 LIGHT(Innomar)	Modelo 11: SB-424 (EdgeTech)	No aplica
Frecuencia promedio(kHz)	6,1	4	3,8	10	3,25	3.5	15	X	6,50
Penetración promedio(m)	X	15	X	20	X	X	X	30	21,6
Resolución promedio (m)	0,2	X	X	X	0,2	0,15	1	X	0,38
Software	PROMAX	X	X	SonarWiz-Mapa 5	X	X	X	X	No aplica
Lugar	Taiwán	Antártida Occidental	Taiwán	Aracruz, Brasil	Mar Alborán, Marruecos	Mar de Beaufort, Canadá	Golfo Nápoles	Río Mississippi, USA	No aplica
Notas:									
IC	Investigación científica								
CSG	Caracterización sedimento con gas								
GG	Geomorfología Glacial								
CP	Correlación parámetros								
CM	Caracterización morfológica								
LOE	Localización objeto enterrado								
X	Dato NO entregado								

En la Tabla 23, se aprecia que en cuanto al tipo de estudio, los 8 estudios en análisis coinciden (investigación científica), lo que es concordante con los propósitos de la mayoría de las publicaciones en revistas científicas, las cuales hacen énfasis en publicar investigación y no una aplicación de carácter comercial.

En cuanto al objetivo, 2 corresponden a CSG (caracterización de sedimento con gas), 2 a CP (correlación de parámetros), otros 2 a CM (caracterización morfológica) y por último 1 se refiere a GG (geomorfología glacial) y 1 a LOE (localización de objeto enterrado).

Los SBP más utilizados en estos estudios fueron los modelos 15 y 10 con dos participaciones cada uno. Luego le siguieron los modelos 13, 7, 2 y 11 con tan solo una utilización dentro de las publicaciones seleccionadas.

En términos de promedios se pudieron obtener los siguientes resultados para los estudios analizados:

- Frecuencia: 6,50kHz.
- Penetración: 21,60m.
- Resolución: 0,38m.

Estos promedios entregan un valor referencial de uso científico, que sirve de indicador para un posterior análisis de comparación para cada uno de los SBP de las firmas presentadas en el Capítulo 2.

Los softwares utilizados fueron los siguientes; PROMAX y SONARWIZ-5, cada uno de ellos es específico, de acuerdo al propósito que se le requiera. Por eso es bueno tener en cuenta cuál es el más idóneo al momento de adquirir un perfilador de subfondo.

La gran diversidad de lugares y continentes, demuestra que la aplicación de los SBP analizados en el mundo es amplia.

### **3.3.2 Análisis de Resúmenes presentados en Congresos.**

Los resúmenes presentados en congresos de los perfiladores estudiados por cada firma tenían una orientación principalmente enfocada en algo práctico y sustentado en un principio comercial.

El objetivo claramente no es el mismo que el de una publicación científica; sino más bien va netamente orientado a resolver un problema o contribuir a viabilizar un proyecto. Las firmas que más participaron con modelos propios en estos resúmenes fueron Innomar y EdgeTech.

Los estudios consistieron principalmente en el análisis y toma de datos a través de perfiladores de subfondo, con un énfasis investigativo. En otras ocasiones operadores de la misma empresa desarrolladora del proyecto, capacitados para manipular este equipamiento de la manera más eficiente dentro de zonas costeras y también en aguas profundas.

Las principales diferencias entre resúmenes presentados en congresos y publicaciones científicas, como fue nombrado anteriormente, hacen relación al objetivo que cada una de ellas pretende alcanzar. Por ejemplo, en el caso de los resúmenes el objetivo es presentar en congresos los diferentes estudios efectuados principalmente en zonas cercanas a la costa y con una aplicación directa a resolver un problema; más bien con un equipo reducido de profesionales. Mientras tanto, las publicaciones científicas buscan principalmente ser reconocidas en revistas asociadas de carácter científico, para así generar conocimiento en la comunidad científica, todo esto llevado a cabo, a través de un equipo multidisciplinario de profesionales, los cuales, a través de sus diferentes formaciones académicas, intentan cubrir los objetivos del estudio a cabalidad a una escala regional mucho mayor.

Las principales aplicaciones a escala local que pudieron obtenerse a través de estos resúmenes presentados en congresos fueron las siguientes:

- Estudios de dragado y morfología de fondo.
- Estudios de perforación para obtención de petróleo.
- Estudios de localización de objetos enterrados.

#### 4. METODOLOGÍA

Este capítulo se centra principalmente en la descripción y explicación de la metodología utilizada en esta investigación; se detallan los pasos desarrollados durante el estudio, lo que permitió la identificación de los criterios primarios, secundarios y terciarios de selección. Estos son un factor clave en el análisis comparativo de los 16 perfiladores de subfondo seleccionados anteriormente y su posterior ordenamiento en un ranking, el cual indique, en definitiva, cuál o cuáles son los mejores SBP disponibles, todo esto cómo parte del objetivo general planteado en este trabajo de titulación.

En la sección 4.1, se describen los distintos criterios primarios, secundarios y terciarios, justificando su elección, utilización e importancia que tienen, para el análisis de cada uno de los perfiladores. Todo esto asociado principalmente a sus fichas técnicas descritas por cada firma (Capítulo 2), experiencia internacional en estudios o publicaciones (Capítulo 3) y recopilación adicional en foros o sitios en internet.

En la sección 4.2, se explica de qué manera está conformada la tabla comparativa de los resultados del Capítulo 5. Además, define cada criterio presentado, nombrando y fundamentando su importancia en cada caso.

Posteriormente en la sección 4.3, se presenta en detalle el proceso de evaluación, el cual está conformado por ponderaciones y puntuaciones para cada uno de los criterios primarios, secundarios y terciarios de selección. Dicho proceso es el eje fundamental de la metodología, ya que sirve de base para la construcción del ranking a partir de la tabla comparativa de perfiladores que se presenta en el capítulo 5.

Es bueno tener presente, que se consideró inicialmente el criterio “Costo” de los perfiladores de subfondo, pero este fue descartado, debido a que no tenía una preponderancia relevante dentro de los objetivos de este trabajo de titulación, que es de carácter técnico-científico.

Tal vez, como recomendación, puede tomarse en cuenta el parámetro “costo”. En un futuro trabajo investigativo-financiero, donde sirva de complemento a este trabajo y así intentar ver la rentabilidad real que conlleva la adquisición de un perfilador de subfondo para la PUCV o la institución que requiera los servicios de este equipamiento.

La presente metodología es de carácter bibliográfico. Pretende agrupar toda la información importante disponible por equipo. Detalla procedimientos y normas, las cuales sirven como punto de comparación entre modelos. Por último, intenta entregar información representativa, la cual sirva de base para futuras investigaciones relacionadas con el tema tratado.

#### **4.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN**

Los criterios de selección considerados en esta metodología, fueron establecidos de acuerdo a la información agrupada por los 16 perfiladores de subfondo seleccionados en capítulos previos. Estás son: fichas técnicas, uso en investigaciones científicas o presentaciones a congresos, información en foros o sitios de internet, etc. Todos son fundamentales para evaluar el real funcionamiento de los equipos y son totalmente complementarios entre ellos.

Estos criterios fueron separados en tres clases de acuerdo al orden de importancia que se dio en esta investigación: *criterios primarios, secundarios y terciarios*

##### **4.1.1 Criterios Primarios**

Se seleccionaron 3 criterios primarios, de acuerdo a los parámetros de los cuales se logró obtener más información por cada perfilador y que se consideraron fundamentales para la operación eficiente de cada SBP en el subfondo marino, estos son:

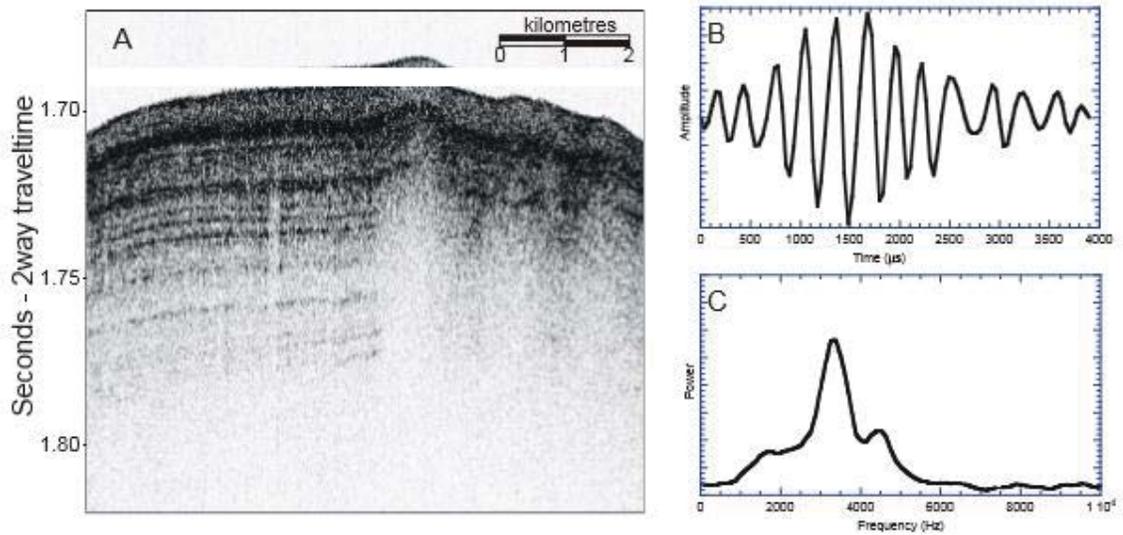
- a) Tipo de uso para el objetivo planteado.
- b) Rango de profundidad de agua y zona geográfica.
- c) Tipo de montaje en la embarcación.

#### **4.1.1 a) Tipo de uso para el objetivo planteado**

Este criterio se consideró el más importante, debido a que dice relación con el objetivo directo que se dio a la investigación y que es la base de cualquier estudio. Para simplificar el criterio, se tomaron en cuenta dos parámetros, considerados fundamentales para cualquier propósito investigativo dentro del subfondo marino; *máxima penetración* y *mínima resolución alcanzable*.

Estos dos parámetros son señalados en todos los perfiladores seleccionados y son indicadores representativos del éxito de una investigación. Como fue explicado en el Capítulo 1, ambos parámetros son totalmente complementarios: mientras haya una mayor resolución, existirá una baja penetración y viceversa. En la figura 29 se muestra un caso de estudio de SBP en las costas de Arequipa, Perú, con una penetración típica de 60m y un rango de profundidad en la columna de agua de 0 a 1250m prof.

También puede darse el caso, que en algunos perfiladores se dé un cierto equilibrio entre ambos parámetros y no tengan que ser necesariamente uno mucho mayor que el otro en términos de eficiencia. Ejemplo de esto puede ser una resolución media y una penetración también media. Es bueno tener en cuenta también, que ambos parámetros también tienen relación directa con la frecuencia que se utiliza en cada investigación.



**Figura 29.** Tipo de uso en las costas de Arequipa (Perú), 60 m de penetración dentro del subfondo marino y a un rango de profundidad de 0 - 1.250m.

#### 4.1.1 b) Rango de profundidad de agua y zona geográfica

Este criterio se agrupó en dos categorías; rango de profundidad de agua y zonas geográficas, debido que son complementarios dentro de los parámetros a tener en cuenta en una investigación y no se pueden considerar en forma separada.

La categoría rango de profundidad de agua, se separó a su vez en 4 sub-categorías, según la clasificación de profundidades del océano, éstas son;

- *Muy Somera*: 0 – 200m (o Epipelágica);
- *Somera*: 200 – 1.000m (o Mesopelágica);
- *Profunda*: 1.000 – 4.000m (o Batipelágica) y
- *Muy Profunda*: 4.000 – 6.000m (o Abisopelágica) (EoE, 2016).

Por su parte, la categoría zonas geográficas también se agrupó de acuerdo a los requisitos que exige operar una embarcación menor. Por tanto, se descartó la operatividad en aguas oceánicas, ya que en el caso chileno esa tarea podría ser asumida por embarcaciones de mayor tamaño (cómo por ejemplo el buque Cabo de Hornos de la Armada de Chile). Estas sub-categorías son las siguientes: *Zona Costera (0-50m profundidad)*, también llamada *zona infralitoral*, *Canales Australes* y *Lagos-Ríos-Estuarios*.

#### **4.1.1 c) Tipo de montaje en la embarcación**

El tipo de montaje en algunas ocasiones es de vital importancia, ya que la calidad de los datos en términos de una buena resolución de imagen, va directamente relacionado con lo estable que esté el equipo en la embarcación donde se opere. Por ejemplo, un punto a tener en cuenta en los remolques de superficie, es el largo del cable, ya que si es muy corto (<5m), podría acarrear tirones que desestabilice el equipo, además de generar muchas señales de ruido, por las hélices del moto, lo cual va directamente relacionado con una mala calidad de datos.

Debido a que hay diferentes maneras de acoplar un SBPa una embarcación menor, ya sea instalado directamente en la embarcación, ya sea bote, lancha, Zodiac, u otro similar; o remolcado en la superficie (por ejemplo, montado en un kayak); o remolcado sumergido (montado en un “pez” o towfish).

Algunas de las formas de instalar un SBP directamente en una embarcación se listan a continuación:

- Con un brazo junto a la banda de babor o estribor.
- Con brazo delante de la proa.
- Empotrado en el casco.



**Figura 30.**Montaje en bote de fibra de vidrio del SBP 3200 HP de EdgeTech.

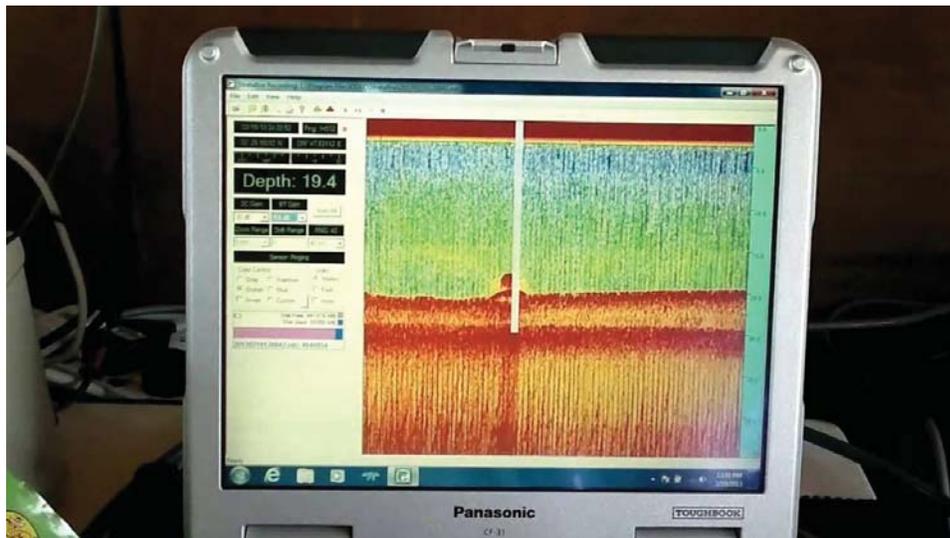
#### **4.1.2 Criterios Secundarios**

Adicionalmente a los criterios primarios o fundamentales, se seleccionaron tres criterios secundarios, los cuales ayudaron a complementar la evaluación de cada perfilador, debido a su grado de importancia para una investigación.

Los 3 criterios secundarios son:

- ***Software propio o de otra empresa:*** si la misma firma posee un software propio para su perfilador o el procesamiento se debe realizar con el software de otra firma.
- ***Compatibilidad con otro software:*** el perfilador analizado puede acoplarse a otro software diferente, ya sea de adquisición o de procesamiento, relacionado preferentemente con los datos de salida, en otras palabras, en este punto, se analiza la versatilidad del SBP.

- *Sensor de movimiento (IMU) adosado o integrado*: Este criterio sirvió como indicador, ya que este artefacto denominado IMU (unidad de medición inercial), es el cual ayuda a localizar la proveniencia de los ecos y se puede predecir con qué orientación se emitirán los haces, entre otros, de tal manera de reorientarlos, para que se emitan lo más próximos a la vertical posible



**Figura 31.** Post-Procesamiento a través del software Sonar-Wiz5 de un mapa de arrecifes artificiales usando Sub Bottom Profiler (Bathy 2010PC).

#### 4.1.3. Criterios Terciarios

De forma complementaria a los criterios fundamentales y secundarios, se integraron 26 criterios terciarios de comparación, los cuales sirvieron de complemento para efectuar un mejor y más completo análisis de comparación de SBPs.

Estos 26 criterios se separaron en 4 bloques (Bloques 1, 2, 3 y 4), más un criterio aparte denominado “Comentarios de la comunidad científica”, cada uno de estos se explica a continuación:

A. BLOQUE 1: Este bloque está conformado por 8 parámetros, en su mayoría de carácter técnicos y complementarios con otros equipos geofísicos, estos se detallan a continuación:

- Rango de frecuencias secundarias a utilizar (kHz).
- Altura del transductor (m).
- Ancho del transductor (m).
- Largo del transductor (m).
- Peso máximo en aire (kg).
- Peso máximo en agua (kg).
- Posibilidad de integración con: sonar de barrido lateral, ecosonda multihaz, magnetómetro u otro.
- Formato de dato digital utilizable.
- 

B. BLOQUE 2: Este bloque está conformado por 8 parámetros, en su mayoría de carácter técnico y el tipo de fondo, que es fundamental tenerlo en cuenta para cualquier tipo de investigación. Estos se detallan a continuación:

- Tipo y longitud máxima del cable (m) que conecta el transductor con el resto del equipo.
- Ancho del haz transmitido desde el transductor ( $^{\circ}$ ).
- Tasa de disparos ( $\text{disparos} \cdot \text{s}^{-1}$ ).
- Cantidad máxima de transductores a utilizar (1, 2 o más)
- Potencia de salida máxima (kW).
- Tipo de fondo utilizable (arena, grava, arcilla, etc.)
- Adaptación del equipo al tipo de embarcación menor por material.

C. BLOQUE 3: Este bloque está conformado por 7 parámetros, en su mayoría de carácter técnico. Estos se detallan a continuación:

- Nivel de sonido de la fuente (dB).
- Fuente de alimentación (VAC).
- Tipo de señal es Chirp u otro.
- Tipo de transductor (Magnetoestrictivo, electroestrictivo, piezoeléctrico, etc.)
- Cantidad de hidrófonos a utilizar.
- Garantía y soporte técnico.

D. BLOQUE 4: Este bloque está conformado por 2 parámetros, ambos de carácter descriptivo, estos se detallan a continuación:

- Descripción del modelo (tradicional, Chirp batimétrico y Chirp full Spectrum)
- Aplicaciones típicas del modelo.

Por último, se consideró un parámetro aparte denominado “Comentarios de la Comunidad Científica”, el cual se evaluó por separado, debido a que es representativo en términos de comparación, porque representa la experiencia de investigadores trabajando con un SBP y sirve de referencia para una posible adquisición de un buen SBP, dependiendo del objetivo que se plantee para el modelo.

#### **4.2 CREACIÓN DE TABLA COMPARATIVA.**

La tabla comparativa que se desarrolló en este trabajo de titulación, está conformada por 32 parámetros de evaluación. Muchos de ellos cuantificables, los cuales servirán de indicadores para la posterior comparación entre los diferentes modelos SBP. Otros parámetros, por ejemplo, corresponden a información representativa, la cual sirvió (en caso de haber sido incluido en las especificaciones de cada perfilador) para analizar las ventajas que posee ese perfilador con respecto a otro.

La tabla completa está presente en el Capítulo 5, la cual se subdividió por bloques para un mejor entendimiento. En ella están considerados, por supuesto, los criterios primarios, secundarios y terciarios mencionados anteriormente en la sección 4.1. Todos ellos son la base primordial del posterior análisis comparativo.

### 4.3 EVALUACIÓN DE CRITERIOS

#### 4.3.1 Calificación

Los 16 modelos SBP analizados y presentados en la tabla comparativa, tendrán una Calificación individual, con respecto a la eficiencia que obtengan en cada uno de los criterios primarios, secundarios y terciarios mostrados anteriormente.

Cada criterio tiene una escala de notas diferentes, que son mostradas a continuación:

##### 4.3.1.1 Criterios primarios

A) Tipo de uso para el objetivo planteado: Este criterio será evaluado con una escala de notas de 1 a 4 y se representa en la Tabla 24.

**Tabla 24.** Calificación asignada para el criterio primario A.

Nota	Comentario
4	Alta resolución y alta penetración.
3	Alta resolución y baja penetración (o viceversa).
2	Media resolución y media penetración.
1	Baja resolución y baja penetración.
0	No cuenta con información

B) Rango de Profundidad y Zonas Geográficas: Este criterio combinado será evaluado con una escala de notas de 1 a 7 y se representa en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Calificación asignada para el criterio primario B.

<b>Nota</b>	<b>Comentario</b>
7	Opera en los 4 rangos de profundidades y en las 3 zonas geográficas.
6	Opera en 3 rangos de profundidades y en las 3 zonas geográficas.
5	Opera en 3 rangos de profundidades y en 1 o 2 zonas geográficas.
4	Opera en 2 rangos de profundidades y en las 3 zonas geográficas.
3	Opera en 2 rangos de profundidades y en 1 ó 2 zonas geográficas.
2	Opera en 1 rango de profundidad y en las 3 zonas geográficas.
1	Opera en 1 rango de profundidad y en 1 ó 2 zonas geográficas.
0	No cuenta con información

C) Tipo de Montaje de la embarcación: Este criterio será evaluado con una escala de notas de 1 a 4 y se representa en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Calificación asignada para el criterio primario C.

<b>Nota</b>	<b>Descripción</b>
4	Es versátil con múltiples montajes (dentro de la embarcación y superficial)
3	Se monta sólo de 3 maneras diferentes (dentro de la embarcación y superficial).
2	Se monta sólo en la embarcación o sólo en superficie.
1	Solo se monta de una forma.
0	No cuenta con información

#### 4.3.1.2 Criterios secundarios

D) Software propio o de otra empresa: Este criterio será evaluado con una escala de notas de 1 a 2 y se representa en la Tabla 28.

**Tabla 27.** Calificación asignada para el criterio secundario D.

Nota	Descripción
2	El modelo puede operar con software propio o de otra empresa.
1	El modelo puede operar sólo con software propio.
0	No cuenta con información

E) Compatibilidad con otro software: Este criterio será evaluado con una escala de notas de 1 a 2 y se representa en la Tabla 29.

**Tabla 28.** Calificación asignada para el criterio secundario E.

Nota	Descripción
2	Es compatible con otro software.
1	No es compatible con ningún otro software.
0	No cuenta con información

F) Sensor de movimiento (IMU) adosable o integrado: Este criterio será evaluado con una escala de notas de 1 a 2 y se representa en la Tabla 31.

**Tabla 29.** Calificación asignada para el criterio secundario F.

Nota	Descripción
2	El modelo tiene integrado o adosado un sensor de movimiento IMU.
1	El modelo NO tiene integrado o adosado un sensor de movimiento IMU.
0	No cuenta con información

#### 4.3.1.3 Criterios terciarios

BLOQUE 1: Este bloque de criterios será evaluado con una escala de notas de 1 a 8 y se representa en la Tabla 32.

**Tabla 30.** Calificación asignada para el bloque 1 de criterios terciarios.

Nota	Descripción
8	Cuenta con la información de los 8 parámetros.
7	Cuenta con la información de 7 de los 8 parámetros.
6	Cuenta con la información de 6 de los 8 parámetros.
5	Cuenta con la información de 5 de los 8 parámetros.
4	Cuenta con la información de 4 de los 8 parámetros.
3	Cuenta con la información de 3 de los 8 parámetros.
2	Cuenta con la información de 2 de los 8 parámetros.
1	Cuenta con la información de 1 de los 8 parámetros.
0	No cuenta con información de ninguno de los parámetros.

BLOQUE 2: Este bloque de criterios será evaluado con una escala de notas de 1 a 7 y se representa en la Tabla 33.

**Tabla 31.** Calificación asignada para el bloque 2 de criterios terciarios.

<b>Nota</b>	<b>Descripción</b>
7	Cuenta con la información de los 8 parámetros.
6	Cuenta con la información de 7 de los 8 parámetros.
5	Cuenta con la información de 6 de los 7 parámetros.
4	Cuenta con la información de 5 de los 6 parámetros.
3	Cuenta con la información de 4 de los 5 parámetros.
2	Cuenta con la información de 3 de los 4 parámetros.
1	Cuenta con la información de 2 de los 3 parámetros.
0	Cuenta con información de menos de 2 parámetros

BLOQUE 3: Este bloque de criterios será evaluado con una escala de notas de 1 a 6 y se representa en la Tabla 34.

**Tabla 32.** Calificación asignada para el bloque 3 de criterios terciarios.

<b>Nota</b>	<b>Descripción</b>
6	Cuenta con la información de los 7 parámetros.
5	Cuenta con la información de 6 de los 7 parámetros.
4	Cuenta con la información de 5 de los 6 parámetros.
3	Cuenta con la información de 4 de los 5 parámetros.
2	Cuenta con la información de 3 de los 4 parámetros.
1	Cuenta con la información de 2 de los 3 parámetros.
0	Cuenta con información de menos de 2 parámetros.

**BLOQUE 4:** Este bloque de criterios será evaluado con una escala de notas de 1 a 2 y se representa en la Tabla 35.

**Tabla 33.** Calificación asignada para el bloque 4 de criterio terciarios.

Nota	Descripción
2	Cuenta con la información de los 2 parámetros.
1	Cuenta con la información de 1 de los 2 parámetros.
0	No cuenta con información de ninguno de los parámetros.

**BLOQUE 5:** Descripción COMUNIDAD CIENTÍFICA: Este criterio será evaluado con una escala de notas de 1 a 3 y se representa en la Tabla 36.

**Tabla 34.** Calificación asignada para la descripción de la comunidad científica.

Nota	Descripción
3	El criterio es bueno debido al acuerdo de la mayor parte de los autores involucrados.
2	El criterio es regular debido al acuerdo de sólo una parte de los autores involucrados.
1	El criterio es malo debido al escaso o nulo acuerdo de los autores involucrados.

#### 4.3.2 Conversión a Porcentajes en cada Criterio

La nota que obtenga cada SBP, será convertida a porcentajes, con el objeto de poder sumarse e integrarse todos los criterios en una sola fórmula matemática y así obtener una *Nota Final*, la cual se explica en la sección 4.3.3.

El sistema de puntajes va depender de la escala de notas adoptada por cada criterio, de acuerdo al siguiente ordenamiento:

- **Escala de 1 a 2:** (criterios E, F, G , bloque 4)
  - Nota 2: Representa el 100,00%.
  - Nota 1: Representa el 50,00%.
  - Nota 0: Representa el 0,00%.
  
- **Escala de 1 a 3:** (comentarios comunidad científica)
  - Nota 3: Representa el 100,00%.
  - Nota 2: Representa el 66,66 %.
  - Nota 1: Representa el 33,33%.
  - Nota 0: Representa el 0,00%.
  
- **Escala de 1 a 4:** (criterios A y C)
  - Nota 4: Representa el 100,00%.
  - Nota 3: Representa el 75,00%.
  - Nota 2: Representa el 50,00%.
  - Nota 1: Representa el 25,00%.
  - Nota 0: Representa el 0,00%.
  
- **Escala de 1 a 6:** (bloque 3)
  - Nota 6: Representa el 100,00%.
  - Nota 5: Representa el 83,33%.
  - Nota 4: Representa el 66,64%.
  - Nota 3: Representa el 49,98%.
  - Nota 2: Representa el 33,33%.
  - Nota 1: Representa el 16,66%.
  - Nota 0: Representa el 0,00%.

- **Escala de 1 a 7:**(criterio B, bloque 2)
  - Nota 7: Representa el 100,00%.
  - Nota 6: Representa el 85,68%.
  - Nota 5: Representa el 71,40%.
  - Nota 4: Representa el 57,12%.
  - Nota 3: Representa el 42,84%.
  - Nota 2: Representa el 28,57%.
  - Nota 1: Representa el 14,28%.
  - Nota 0: Representa el 0,00%.
- **Escala de 1 a 8:**(bloque 1)
  - Nota 8: Representa el 100,00%.
  - Nota 7: Representa el 87,50%.
  - Nota 6: Representa el 75,00%.
  - Nota 5: Representa el 62,50%.
  - Nota 4: Representa el 50,00%.
  - Nota 3: Representa el 37,50%.
  - Nota 2: Representa el 25,00%.
  - Nota 1: Representa el 12,50%.
  - Nota 0: Representa el 0,00%.

#### **4.3.4 Ponderación**

Conforme a lo mencionado en las secciones anteriores (creación de tabla comparativa), con el fin de realizar una comparación entre los 16 perfiladores de subfondo, se procederá en el capítulo 5 a realizar una evaluación de cada uno de los criterios primarios, secundarios y terciarios.

Esta evaluación está basada en ponderaciones y calificaciones, basadas en el *método de los porcentajes*. Esto quiere decir, que cada criterio tendrá un “porcentaje de importancia o peso relativo”, asignado a cada perfilador en análisis.

Los porcentajes de importancia de ambos criterios, se presentan a continuación.

*4.3.4.1 Criterios Fundamentales:*

- Tipo de uso para el objetivo planteado: 25,00%.
- Rango de profundidad y zona geográfica: 20,00%.
- Tipo de montaje en la embarcación: 10,00%.

*4.3.4.2 Criterios Secundarios:*

- Software propio o de otra empresa: 8,50%.
- Compatibilidad con otro software: 8,50%.
- Sensor de movimiento (IMU) integrado o adosable: 8,50%.

*4.3.4.3 Criterios terciarios:*

- Bloque 1: 4,25%.
- Bloque 2: 4,25%.
- Bloque 3: 4,25%.
- Bloque 4: 4,25%.
- Comentarios comunidad científica: 2,50%.

Estos porcentajes están asignados, conforme al análisis previo de los capítulos anteriores, basado en publicaciones, folletos técnicos y aplicaciones comerciales de ingeniería directa. En ese análisis se determinó que algunos criterios tenían un orden de preponderancia mayor en el uso y posterior calidad de datos de los SBP en diferentes tipos de aplicaciones, con respecto a otros, en el mismo contexto investigativo.

En base a lo anterior, la sumatoria final de cada uno de los porcentajes de importancia mencionados para cada criterio, da un total de 100 %. Lo que representa el **valor máximo de eficiencia** que podría obtener un perfilador, como resultado de su evaluación y análisis.

### 4.3.5 Porcentajes de Funcionalidad

El porcentaje de funcionalidad se obtuvo de la sumatoria de cada una de las multiplicaciones del porcentaje obtenido en cada criterio, en base al esquema presentado en la sub-sección 4.3.1.1 por la ponderación mostrado en la sesión 4.3.2 y este a su vez multiplicado por 100, que representa el 100% de eficiencia del modelo.

La fórmula matemática utilizada para obtener el porcentaje de funcionalidad, se representa en la siguiente fórmula:

$$SF = \sum_{i=1}^n (S_i \cdot W_i) \cdot 100$$

Donde:

- SF = Score Functionality (puntaje de funcionalidad)
- $i$  = número de criterio
- $n$  = total de criterios
- $S_i$  = Score (nota parcial) obtenido en cada criterio  $i$ .
- $W_i$  = Weight (peso o ponderación) que representa en cada criterio  $i$ .
- 100 = 100,00 %

Cada perfilador tendrá una denominación diferente, de acuerdo al porcentaje obtenido de la sumatoria obtenida al final de su evaluación y análisis. Esta nomenclatura es la siguiente:

- 75,00 a 100,00%: SBP Sobresaliente
- 50,00 a 75,00%: SBP Bueno
- 25,00 a 50,00%: SBP Regular
- 0,00 a 25,00 %: SBP Deficiente

A modo de ejemplo se representará una posible evaluación de un modelo X, para que se comprenda de mejor manera la metodología empleada.

Modelo X

- Criterios Primarios

Modelo X	Criterio A	Criterio B	Criterio C
Nota	3	5	4
Conversión a porcentajes (S)	75,00% (0,75)	71,40% (0,71)	100,00% (1,0)
Porcentaje de peso por criterio (W)	25,00% (0,25)	20,00% (0,20)	10,00% (0,10)
Puntaje por criterio PPC (S*W)	<b>0,19</b>	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>

- Criterios Secundarios

Modelo X	Criterio D	Criterio E	Criterio F
Nota	2	1	2
Conversión a porcentajes (S)	100,00% (1)	50,00% (0,5)	100,00%(1)
Porcentaje de peso por criterio (W)	8,50% (0,08)	8,50% (0,08)	8,50% (0,08)
Puntaje por criterio PPC (S*W)	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>	<b>0,08</b>

- Criterios Terciarios

Modelo X	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
Nota	8	7	6	3
Conversión a porcentajes (S)	100,00% (1,0)	100,00% (1,0)	100,00% (1,0)	100,00%(1,0)
Porcentaje de peso por criterio (W)	4,25% (0,04)	4,25% (0,04)	4,25% (0,04)	4,25% (0,04)
Puntaje por criterio PPC (S*W)	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>

- Comentarios comunidad científica

Modelo X	Comunidad Científica
Nota	2
Conversión a porcentajes (S)	66,66% (0,66)
Porcentaje de peso por criterio (W)	2,50% (0,02)
Puntaje por criterio PPC (S*W)	<b>0,01</b>

La sumatoria de todos los puntajes por criterio ( $0,19 + 0,14 + 0,10 + 0,08 + 0,04 + 0,08 + 0,04 + 0,04 + 0,04 + 0,04 + 0,01$ ) da un *porcentaje de funcionalidad* de 0,80. Por ende ese modelo multiplicándolo por el 100, tiene un porcentaje de eficiencia de un **80,00%**. Al tener este puntaje también recibe una denominación de **SBP** sobresaliente.

Luego, con este porcentaje se compara con los otros 15 modelos y de acuerdo a eso tendrá un lugar en el ranking final.

#### 4.3.6. Ranking Final

Una vez obtenido el porcentaje de funcionalidad y la denominación de cada uno de los modelos, estos serán ordenados en un ranking de mayor a menor, en el cuál serán categorizados de la siguiente manera cómo primera instancia:

Lugares 1 al 5: Modelos Seleccionados.

Lugares 6 al 16: Modelos Alternativos.

Cómo se explicó en el párrafo anterior, esta categorización está hecha sólo como primera instancia, ya que la cantidad de modelos seleccionados dependerá del resultado de los puntajes finales obtenidos en el análisis de los 16 perfiladores, donde, tal vez podría haber más o menos de 5 modelos seleccionados

## 5. RESULTADOS

Este capítulo está basado en la representación de los resultados obtenidos en este trabajo de titulación, preferentemente en tres ítems:

- Tabla comparativa,
- Porcentajes de funcionalidad y
- Ranking final.

La tabla comparativa que se realizó en este documento, hace referencia a un listado de criterios, parámetros y/o características presentes en los 16 modelos pre-seleccionados en el Capítulo 2. Esta tabla y tal como su nombre lo indica, sirvió para comparar modelo por modelo de SBP, diferentes parámetros en común.

Por otra parte, los porcentajes de funcionalidad, vienen dados en base a la metodología presentada en el Capítulo 4, en donde, a partir de la tabla comparativa, se consideraron 4 parámetros primarios y 4 secundarios, como los preponderantes para la obtención de este puntaje final para cada uno de los modelos. La unidad de dicho puntaje es en porcentaje (%) de eficiencia del modelo en una aplicación dada.

El tercer y último ítem presentado en este capítulo, hace referencia al ranking final. Este está basado en un ordenamiento de todos los puntajes de eficiencia de mayor a menor, generando así una clasificación general entre los 16 modelos, subdividiéndolos en dos categorías: modelos seleccionados y alternativos.

Los ítems están entrelazados entre sí y son la base fundamental del cumplimiento de los objetivos pactados en este trabajo de titulación y también del posterior análisis desarrollado en el Capítulo 6.

## 5.1 TABLA COMPARATIVA

La tabla se separó en 7 nuevos bloques (A, B, C, D, E, F, G) (**nota: no confundir estos bloques con aquéllos del Capítulo 4**), los cuales consideran criterios primarios, secundarios y terciarios. Todo lo anterior, debido al espacio que ocupa ésta en los bordes de la hoja. Las siglas ocupadas para cada uno de los criterios se presentan a continuación en la tabla 37:

**Tabla 35.** Siglas y unidades de cada uno de los criterios ocupados en la tabla comparativa.

N° Criterio	Nombre	Sigla	Criterio	Unidad Física
A	Máxima penetración alcanzable	MPA	Primario	M
A	Máxima resolución alcanzable	MRA	Primario	Cm
B	Rango de profundidad muy somera	RPMS	Primario	M
B	Rango de profundidad somera	RPS	Primario	M
B	Rango de profundidad profunda	RPD	Primario	M
B	Rango de profundidad muy profunda	RPMD	Primario	M
B	Área geográfica zona costera	AGZC	Primario	sin unidad
B	Área geográfica lagos-ríos-estuarios	AGLRE	Primario	sin unidad
B	Área geográfica canales australes	AGCA	Primario	sin unidad
C	Montaje remolcado en plataforma	MRP	Primario	sin unidad
C	Montaje en casco	MC	Primario	sin unidad
C	Montaje lateral	ML	Primario	sin unidad
C	Montaje remolcado en superficie	MRS	Primario	sin unidad
C	Montaje como pez libre	MPL	Primario	sin unidad
C	Montaje en un ROV/AUV	MRAUV	Primario	sin unidad
C	Tipo de embarcación utilizable	TEU	Primario	sin unidad
D	Tipo material de embarcación	TME	Primario	sin unidad
E	Software	S	Secundario	sin unidad
F	Compatibilidad de Software	CS	Secundario	sin unidad
G	Garantía y Soporte técnico	GST	Secundario	sin unidad
H	Sensor de movimiento integrado	SMI	Secundario	sin unidad
I	Rango de frecuencias a utilizar	RFU	Terciario	kHz

J	Altura del transductor	ATT	Terciario	m
K	Ancho del transductor	ANT	Terciario	m
L	Largo del transductor	LT	Terciario	m
M	Peso máximo en aire	PMAR	Terciario	kg
N	Peso máximo en agua	PMAG	Terciario	kg
Ñ	Independiente	I	Terciario	sin unidad
Ñ	Integrado con sonar barrido lateral	ISBL	Terciario	sin unidad
Ñ	Integrado con ecosonda Multihaz	IEM	Terciario	sin unidad
Ñ	Integrado con magnetómetro	IM	Terciario	sin unidad
Ñ	Integrado con otro	IO	Terciario	sin unidad
O	Formato de datos digitales utilizable	FDDU	Terciario	Tipo de formato
P	Tipo y longitud máxima de cable	TLMC	Terciario	Tipo de cable y m
Q	Ancho de banda transductor	ABT	Terciario	°
R	Velocidad de repetición de pulsos	VRP	Terciario	pulsos•s <sup>-1</sup>
S	Cantidad máximo de transductores	CMT	Terciario	Cantidad
T	Peso transductor	PT	Terciario	kg
U	Potencia de salida máxima	PSM	Terciario	kW
V	Tipo de fondo utilizable	TFU	Terciario	Tipo de fondo
W	Nivel primario fuente	NPF	Terciario	dB
X	Tasa de disparos	TD	Terciario	disparos•s <sup>-1</sup>
Y	Fuente de Alimentación	FA	Terciario	Volts DC/AC
Z	Sistema Chirp	SCH	Terciario	sin unidad
AA	Tipo de transductor	TT	Terciario	Tipo transductor
BB	Cantidad de hidrófonos utilizable	CHU	Terciario	Cantidad
CC	Aplicación típica modelo	ATM	Terciario	Aplicación
DD	Descripción preliminar modelo	DPM	Terciario	Tipo de SBP
EE	Comentarios comunidad científica	CCC	Terciario	Bueno / Regular / Malo

**Nota importante:** En lo sucesivo, la designación de los criterios analizados se hará utilizando solamente la sigla de la columna 3 de la Tabla 38. Por ello, si por ejemplo, en algún párrafo se hace mención al criterio “MRA”, esto significará que se hace mención al criterio “Máxima Resolución Alcanzable”.

Cómo se expresó en los capítulos anteriores el listado de modelos analizados en la tabla comparativa, se presenta en la Tabla 36:

**Tabla 36.** Listado de modelos por firma analizada.

N°	Firma	Modelo
1	INNOMAR	SES 2000 COMPACT
2	INNOMAR	SES 2000 LIGHT
3	INNOMAR	SES 2000 STANDARD
4	INNOMAR	SES 2000 STANDARD PLUS
5	INNOMAR	SES 2000 MEDIUM
6	INNOMAR	SES 2000 ROV
7	SYQWEST	STRATABOX
8	SYQWEST	STRATABOX 3510
9	SYQWEST	BATHY 2010
10	FALMOUTH	HMS-622 CHIRPceiver
11	EDGETECH	SB-424
12	EDGETECH	SB-2165
13	EDGETECH	SB-0512i
14	TELEDYNE G	GAVIA AUV
15	IXBLUE	ECHOES 1000
16	KNUDSEN	PINGER SBP

**Nota importante:** En lo sucesivo, la designación de los diferentes modelos de SBP analizados se hará utilizando solamente el número correlativo de la columna 1 de la Tabla 36. Por ello, si, por ejemplo, en algún párrafo se hace mención al modelo 11, esto significará que se hace mención al modelo SB-424 de la firma EdgeTech

La tabla comparativa se presenta separada en 7 bloques (A, B, C, D, E, F y G), con 32 parámetros de evaluación, como se mencionó anteriormente, los cuales se presentan a continuación:

- Bloque A - Criterios Primarios A y B**

Modelo	MPA	MRA	RPVS	RPS	RPD	RPVD	AGZC	AGLRE	AGCA
1	40	5	Sí	Sí (hasta 400m)	No	No	Sí	Sí	No
2	40	5	Sí	Sí (hasta 400m)	No	No	Sí	Sí	No
3	50	5	Sí	Sí (hasta 500m)	No	No	Sí	Sí	Sí
4	50	5	Sí	Sí (hasta 500m)	No	No	Sí	Sí	No
5	70	5	Sí	Sí	Sí (hasta 2000m)	No	Sí	Sí	Sí
6	150	15	Sí	Sí	Sí	Sí (hasta 7.000m)	No	Sí	Sí
7	100	S/I	Sí	Sí	Sí	Sí (hasta 11.000m)	Sí	No	Sí
8	100 y 40	15 y 6	Sí	Sí (hasta 800m)	No	No	Sí	Sí	No
9	300	8	Sí	Sí	Sí	Sí (hasta 11.000m)	Sí	Sí	Sí
10	50	5	Sí	Sí (hasta 500m)	No	No	Sí	Sí	No
11	40	4 a 8	Sí	Sí (hasta 300m)	No	No	Sí	Sí	No
12	80	6 a 10	Sí	Sí (hasta 300m)	No	No	Sí	Sí	No
13	200	8 a 20	Sí	Sí (hasta 300m)	No	No	Sí	Sí	No
14	20	S/I	Sí	Sí	Sí (hasta 1000m)	No	Sí	Sí	Sí
15	50	8	Sí	Sí (hasta 500m)	No	No	Sí	Sí	No
16	40	10	Sí	Sí (hasta 700m)	No	No	Sí	Sí	No

El parámetro MPA, perteneciente al primer criterio primario del bloque A, presentó un promedio de 85,33m de penetración. Sólo 7 modelos sobrepasaron este valor. El valor máximo de penetración lo tiene el modelo 13 SB-0512i de la firma EdgeTech. El de más baja penetración correspondió al modelo 14 GAVIA-AUV de la firma Teledyne Gavia.

El parámetro MRA, también correspondiente al primer criterio primario. Presentó una media de 7,10cm de resolución máxima. Aquí 8 modelos estuvieron por debajo de este valor. La resolución más pequeña correspondió al modelo 11 SB-42 con 4cm y también a los 6 modelos de la firma Innomar (1 al 6) con 5cm. Cabe destacar también que en los modelos 7 y 14 no se encontró información al respecto.

• **Bloque B -Criterio Primario C .**

Modelo	MRP	MC	ML	MRS	MPL	MRAUV
1	No	No	No	Sí	No	Sí
2	No	No	No	Sí	No	Sí
3	No	No	No	Sí	No	Sí
4	Sí	No	No	Sí	No	No
5	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí
6	No	Sí	No	No	No	Sí
7	Si	Sí	No	No	No	Sí
8	Si	Sí	No	No	No	Sí
9	Si	Sí	Si	Si	Si	No
10	Sí	No	No	Sí	No	No
11	Sí	No	No	No	Sí	No
12	Sí	No	No	No	Sí	No
13	Sí	No	No	No	Sí	No
14	Sí	No	Sí	No	No	Sí
15	Sí	Sí	No	No	No	No
16	Sí	Sí	Sí	No	No	No

En cuanto a los parámetros de máxima profundidad en la columna de agua, pertenecientes al bloque B, todos los modelos aplicaron en los rangos RPVS y RPS. En el rango RPD,

solo 5 modelos pueden operar allí (Modelos 5, 6, 7, 9 y 14); mientras que en el rango RPVD, sólo 3 modelos aplicaron (Modelo 5 hasta 2.000m, Modelo 7 y 9 hasta 11.000m).

En lo referente a los parámetros de áreas geográficas, pertenecientes también al criterio B Primario, solo un modelo no aplicó en la zona AGZC (Modelo 6), en tanto en la zona AGLRE se repitió el mismo patrón anterior, observándose un solo modelo que no cumplía esta condición (Modelo 7). Por último, en la zona AGCA sólo 6 modelos aplicaron (3, 5, 6, 7, 9 y 14).

El criterio C, referente a los tipos de montaje en una embarcación, se obtuvo que el montaje MRP, fue el más frecuente, teniendo una participación de 12 modelos (75%). Después viene MRAUV, con 8 modelos (50%) Luego lo siguen los montajes MC y MRS, con 7 modelos (43,75%), MPL, con 4 (25%) y, por último, ML, con 3 (18,75%).

• **Bloque C - Criterios Secundarios E,F,G y H.**

<b>Modelo</b>	<b>S</b>	<b>CS</b>	<b>SMI</b>
<b>1</b>	Propio (SESWIN)	No	No
<b>2</b>	Propio (SESWIN)	No	No
<b>3</b>	Propio (SESWIN)	Sí	No
<b>4</b>	Propio (SESWIN)	Sí	Sí
<b>5</b>	Propio (SESWIN)	Sí	Sí
<b>6</b>	Propio (SESWIN)	Sí	Sí
<b>7</b>	Propio (StrataBox PC Software)	No	No
<b>8</b>	Propio (StrataBox PC Software)	No	Sí
<b>9</b>	Propio (StrataBox PC Software)	Sí	No
<b>10</b>	Externo (Sonar Wiz)	Sí	Sí
<b>11</b>	Externo (Sonar Wiz)	No	No
<b>12</b>	Externo (Sonar Wiz)	No	No
<b>13</b>	Externo (Sonar Wiz)	No	No
<b>14</b>	Propio (SeeByteAutoTracke)	No	Sí
<b>15</b>	Propio(DELPH)	Sí	Sí
<b>16</b>	Externo (Sonar Wiz)	Sí	No

En cuanto a los criterios secundarios del bloque C, con el parámetro S se obtuvo una igualdad tanto para modelos propios de software (8 modelos), cómo para modelos externos a la firma (8 modelos). Mismo caso se dio en la compatibilidad con otro software otorgada por el parámetro CS, donde el 50% es compatible y el otro 50% no lo es, mientras que en SMI 7 modelos poseen un sensor de movimiento inercial IMU (Modelos 4, 5, 6, 8, 10, 14 y 15).

• **Bloque D- Criterios Terciarios I, J, K, L, M, N, Ñ, O.**

Mo- delo	RFU	ATT	ANT	LT	PMAR	PMAG	I	ISBL	IEM	IM	IO	FDDU
1	5,6,8,10,12, 15	0.3	0.35	0.4	23	25	Sí	Sí	No	No	No	SEG-Y, CODA, XTF y otros
2	4, 5, 6, 8, 10, 12, 15	0.34	0.26	0.08	31	33	Sí	Sí	No	No	No	SEG-Y, CODA, XTF y otros
3	4, 5,6,8,10,12, 15	0.52	0.40	0.44	49	51	Sí	Sí	No	No	No	SEG-Y, CODA, XTF y otros
4	4, 5, 6, 8, 10, 12, 15	0.52	0.4	0.44	42	44	Sí	Sí	Sí	No	No	SES/RAW,SEG -Y, XTF y ASCII
5	4, 5, 6, 8, 10, 12, 15	0.52	0.5	0.74	79	84	Sí	Sí	Sí	No	Sí	SES/RAW,SEG -Y, XTF y ASCII
6	2,3,4,5,6,7	2 x (0,52)	2 x (0,44)	2 x (0,40)	115	204	Sí	Sí	No	No	No	SEG-Y, CODA, XTF and Others
7	3,5 y 10	0.06	0.25	0.21	0.9	16.78	Sí	No	No	No	No	SEG-Y and ODC
8	3,5 y 10	0.06	0.29	0.34	0.9	16.78	Sí	Sí	No	No	No	SEG-Y and ODC
9	1,2,4,9,12 y 16	0.12	0.44	0.72	77	100	Sí	No	No	No	No	SEG-Y con datos procesados
10	(1-10) (0,2-	0.28	0.37	0.3	42	44	Si	Sí	Sí	No	No	SES/RAW,SEG

	2) (8-23)												-Y, XTF y ASCII
11	4 a 24	0.34	0.5	0.77	35	110	Si	Si	No	No	No	No	JSF, SEG-Y & XTF
12	2 a 16	0.40	0.67	1.05	62	72	Si	Si	No	No	No	No	JSF, SEG-Y & XTF
13	0,5 a 12	0.43	0.75	1.25	68	204	Si	Si	No	No	No	No	JSF, SEG-Y & XTF
14	14 a 21	0.20	0.5	0.62	70	88	Si	Si	No	No	No	No	SEG-Y
15	5 a 15	0.2	0.47	0.68	13	26	Si	No	No	No	No	No	24 bit raw data / SEG-Y 32 bits floating point
16	3,5 a 200	0.38	0.51	0.86	21	29	Si	Si	No	No	No	No	SEG-Y, XTF, KEB, ASCII

En el bloque D, perteneciente a los criterios terciarios, el parámetro RFU dio una frecuencia promedio de 10kHz; en general, resultando en una gran cantidad de frecuencias disponibles en la mayoría de los modelos. El ATT registró un promedio de 0,31m de altura de transductor, el ANT 0,44m de ancho y el LT 0,58m de largo.

En cuanto a los pesos de los equipos en agua y aire (PMAR y PMAG), estos dieron medias de 44,23kg y 71,72kg, respectivamente. Por otro lado, en cuanto a la integración que se le puede dar a cada modelo con otro equipamiento geofísico, este dio como resultado un 100% en el parámetro I de Independencia. En el ISBL solo 3 modelos no pueden acoplarse a un sonar de barrido lateral (modelos 7, 9 y 15). En IEM se da el caso contrario, solo aplicando los modelos 4, 5 y 10.

Por último, en el parámetro IM, no se da ninguna participación, mientras que, en IO, sólo el modelo 5 es compatible con otro equipamiento geofísico.

En base al parámetro FDDU, coincidieron en los 16 perfiladores, los siguientes formatos digitales de adquisición: SEG-Y y XTF. El resto de los formatos no se presentan en todos los perfiladores. Cabe destacar que del modelo 8 no se obtuvo información respectiva (S/I

• **Bloque E - Criterios Terciarios P, Q, R, S, T, U, V, W.**

Modelo	TLMC	ABT	VRP	CMT	PT	PSM	TFU
1	Multiconductor/ 20m	3,6°	30	1	22	12	Arcilla, arena y grava
2	Multiconductor/ 20m	3,6°	10	1	22	10	Arcilla, arena y grava
3	Multiconductor/ 40m	3,6°	50	1	39	20	Arcilla
4	Multiconductor / 20m	3,6°	60	1	42	20	Arcilla
5	Multiconductor / 20m	3,6°	40	1	79	20	Arcilla
6	Multiconductor/ 40m	3°	30	1 a 3	79	80	Arcilla
7	S/I	4°	10	1, 2 ó 4	3.8	0,30 a 1	Arena, limo
8	S/I	4°	10	4	3.8	0,30 a 2	Arena, limo
9	S/I	1,2 a 4°	4	0	S/I	5 ó 10	Limo y capas de arena
10	Multiconductor / 20m	3,6°	60	1	42	20	Arcilla
11	kevlar reforzado/ 35m	4°	20	2	40	15	Arcilla, arenas calcáreas
12	kevlar reforzado/ 35m	4°	20	2	42	15	Arcilla, arenas calcáreas
13	kevlar reforzado/ 75m	4°	40	2	46	2	Arcilla, arenas calcáreas
14	S/I	3°	20	1	19.4	16	Arcilla, grava
15	S/I	4°	20	7	S/I	S/I	Arcilla, grava
16	S/I	3,6°	30	1	S/I	> 2	Arcilla, grava

**Bloque E- Criterio W.**

Modelo	TEU	TME
1	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
2	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
3	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
4	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
5	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio

6	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
7	Lancha y bote pesquero	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
8	Lancha y bote pesquero	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
9	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
10	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
11	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
12	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
13	Lancha, bote Zodiac, bote pesquero y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
14	Lancha y Zodiac	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
15	Lancha y catamarán	Metal, madera, goma y fibra de vidrio
16	Lancha y bote pesquero	Metal, madera, goma y fibra de vidrio

En los resultados del bloque E que contiene los parámetros del bloque 2 de los criterios terciarios, dio como resultado que el parámetro TLMC presentó 7 perfiladores que usan el cable Multiconductor y otros 3 el kevlar reforzado, teniéndose 6 SBP sin información. Mientras tanto, para el dato de longitud de cable, se tiene que de los 12 perfiladores que contaron con la información, la longitud promedio es de 17,58m.

Por otra parte, es bueno mencionar que la letra X, indicada en el bloque E, se refiere a que no se encontró información disponible a ese parámetro.

Los parámetros ABT, VRP, CMT dieron un valor promedio de 3,7°, 56,75pulsoss<sup>-1</sup> y 2 transductores en cantidad máxima, respectivamente. Mientras tanto, para el caso del

parámetro PT referente al peso del transductor, sólo se contó con la información de 13 SBP, lo que dio un valor medio de 36,92 kg. El indicador PSM, por su parte, se registró en 15 perfiladores, dando un promedio de 16,3kW, como potencia máxima de salida.

El parámetro de los criterios terciarios TFU, dio como resultado que 13 perfiladores pueden trabajar en arcilla, 8 en arena, 5 en grava, 3 en limo y por último sólo 3 en arenas calcáreas. El resto de los tipos de fondo no se describieron en las especificaciones técnicas de cada modelo por firma.

El último Criterio W, que hace relación a la Adaptación del equipo al tipo de embarcación menor por material, obtuvo una totalidad absoluta en el parámetro TME, teniendo un 100% de aplicación, tanto en maderas, como en fibras de vidrio; mientras que en TEU, sólo 5 modelos no pueden ser sometidos a todo tipo de embarcación pequeña. Estos son los modelos 7, 8, 14, 15 y 16.

• **Bloque F - Criterios Terciarios X, Y, Z, AA, BB,CC.**

Mo- delo	NRF	TD [disparos·s <sup>-1</sup> ]	FA	SCH	TT	CHU
1	>238dB//μPa re 1m	min: 0.067, máx.: 0.5	115-230V AC +5%/- 10%, 50-60Hz	No	Electromagnético	0
2	>238dB//μPa re 1m	min: 0.067, max: 0.5	100-240V AC o 12/24V DC (opcional) / <250W	No	Electromagnético	0
3	>240 dB//μPa re 1m	min: 0.067, max: 0.8	115-230V AC +5%/- 10%, 50-60Hz	Sí opcional (5-15kHz)	Electromagnético	0
4	>240dB//μPa re 1m	0,07 a 1,3	100-240V AC o 12/24V DC (opcional) / <400W	No	Electromagnético	0
5	>247 dB//μPa re 1m	0,07 – 2	100-240V AC o 12/24V DC (opcional) / <700W	No	Electromagnético	1
6	>240dB//μPa re 1m	min: 0.25, máx.: 3.7	115-230V AC +5%/- 10%, 50-60Hz	Sí opcional (2-7kHz)	Electromagnético	0
7	X	0,1 a 0,8	12-30VDC	No	Transductor de cono	0

					(matriz TR-109)	
8	X	0,1 a 0,8	10-30VDC	No	Transductor de cono (matriz TR-109)	0
9	X	X	110 / 220 V 50/60 Hz 600 Watts	Sí (3,5 ó 12kHz)	Electromagnético	2
10	204 dB re 1 $\mu\text{Pa}$ @ 1 m nominal	0,07 a 1,3	100–240V AC o 12/24V DC (opcional) / <400W	No	Electromagnético	0
11	X	X	120–220 VAC, 50/60 Hz	Sí	Electromagnético	1
12	X	X	120–220 VAC, 50/60 Hz	Sí	Electromagnético	1
13	X	X	120–220 VAC, 50/60 Hz	Sí	Electromagnético	2
14	X	15	X	Sí	Electromagnético	0
15	X	X	> 230dB within the useful bandwidth @ 2kVA	Sí	Tonpiliz	0
16	X	X	X	Sí	Electromagnético	0

- **Bloque F – Criterio DD.**

Modelo	GST
1	Sí
2	Sí
3	Sí
4	Sí
5	Sí
6	Sí
7	Sí
8	Sí

9	Sí
10	Sí
11	Sí
12	Sí
13	Sí
14	No
15	Sí
16	Sí

En cuanto al bloque F que contiene los parámetros del bloque 3 de los criterios terciarios, el parámetro NPF, referente a nivel primario de fuente, entregó resultados para 7 perfiladores solamente, dando una media 235dB. La TD arrojó datos para 10 perfiladores, dando un mínimo promedio admisible de  $0,08 \text{disparos} \cdot \text{s}^{-1}$  y un máximo promedio de  $2,67 \text{disparos} \cdot \text{s}^{-1}$ . En cuanto al parámetro FA, referente a la fuente de alimentación, dio un resultado promedio de 200VAC a 50-60Hz de frecuencia para los 14 modelos registrados, ya que 2 SBP no presentaron información al respecto.

Al igual que el bloque E, el bloque F, presentó algunos valores con la letra X, que significa que no se encontró información en dichos parámetros. Para el parámetro SCH, hubo una pequeña similitud en cantidad de modelos Chirp (9) y no-Chirp (7). En cuanto al parámetro TT, 13 perfiladores usan el tipo de transductor electromagnético, 2 de ellos el transductor de cono simple y 1 un transductor de tipo Tonpilz.

En términos de garantía y soporte técnico, dados por el parámetro GST, todos los modelos cumplieron con tal servicio (Modelo 14).

• **Bloque G - Criterios Terciarios EE, FF, GG.**

<b>Modelo</b>	<b>ATM</b>	<b>DPM</b>	<b>CCC</b>
1	Exploraciones geológicas, geofísicas e investigaciones ambientales.	SBP Paramétrico	Malo
2	Exploraciones geológicas, geofísicas e investigaciones ambientales.	SBP Paramétrico	Regular
3	Exploraciones geológicas- geofísicas, tuberías enterradas, objetos y puentes	SBP Paramétrico	Regular
4	Exploraciones geológicas- geofísicas, tuberías enterradas, objetos y puentes	SBP Paramétrico	Bueno
5	Exploraciones geológicas- geofísicas, tuberías enterradas, objetos y puentes	SBP Paramétrico	Bueno
6	Exploraciones geológicas- geofísicas, estudio obras construcción y rutas	SBP Paramétrico	Bueno
7	Detección de materiales y capas de sedimentos (representación visual).	SBP Tradicional	Regular
8	Operación en aguas someras < 2,5m- depende tipo de fondo	SBP Tradicional	Regular
9	Está adaptado para penetrar bajo 11.000m de profundidad de agua	SBP Chirp batimétrico agua profunda	Bueno
10	Exploraciones geológicas- geofísicas, tuberías enterradas, objetos y puentes	SBP Chirp batimétrico	Bueno
11	Aplicaciones costeras con alta resolución	SBP Chirp full Spectrum	Regular
12	Aplicaciones costeras con alta resolución	SBP Chirp full Spectrum	Regular
13	Combinación de alta resolución + alta resolución	SBP Chirp full Spectrum	Regular
14	Alta precisión de datos	SBP Chirp	Regular
15	Específico para alta penetración en aguas someras	SBP Chirp	Bueno
16	Excelente resolución en aguas someras	SBP Chirp-Pinger	Malo

Por último, el bloque G que agrupa a los dos parámetros del bloque 4 de los criterios terciarios, más la opinión de la comunidad científica, mostró diversas aplicaciones típicas para cada modelo en el parámetro ATM, encontrándose como principales: exploraciones geofísicas y geológicas, estudio de tuberías enterradas u objetos, estudio ingeniería de puentes y dragados y aplicaciones costeras con alta resolución.

Para el parámetro DPM, resultó que 6 perfiladores son de tipo paramétrico, 2 tradicionales y los otros 8 son de tipo Chirp, ya sea de agua profunda, full Spectrum o Chirp-Pinger. En cuanto a la opinión de la comunidad científica, desplegada en las publicaciones científicas, en base al cumplimiento de los objetivos de los mismos y entregada en foros geofísicos en Internet, dio el siguiente dictamen: 6 SBP buenos, 8 SBP regulares y 2 SBP malos.

## **5.2 PORCENTAJES DE FUNCIONALIDAD**

Los porcentajes de funcionalidad resultan de la metodología explicada y desarrollada en el Capítulo 4. En ella se analizan los 3 tipos de criterios (primarios, secundarios y terciarios), en base a una fórmula matemática, la cual incluye ponderaciones ( $W_n$ ), una nota a cada uno de los parámetros de cada criterio, porcentajes de estas notas, una nota parcial ( $S_n$ ) (resultado de la multiplicación entre la ponderación y el % de la nota). Por último se multiplica por un factor de 100 para obtener los Porcentajes de Funcionalidad finales por modelo, cuya unidad está dada en porcentaje (%) de eficiencia del modelo en una aplicación dada.

Este análisis es la base de los resultados del Ranking Final y se realizó a los 16 modelos analizados uno a uno.

A continuación, se presentan en 16 tablas diferentes, los resultados de cada uno de los porcentajes de funcionalidad de los modelos de SBP analizados.

### 5.2.1 - SES 2000 Compact de INNOMAR (Modelo 1)

**Tabla 37.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 1.

Modelo 1 : SES 2000 Compact (INNOMAR)					
Criterios Primarios	Nota	% Nota (Sn)	Ponderación (Wn)	Nota parcial (Sn * Wn)	% Funcionalidad
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	4	0,570	20,00%	0,114	11,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
D (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
E (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	6	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	1	0,330	2,50%	0,008	0,8
<b>Sumatoria</b>					<b>74,2</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 1 -SES 2000 Compact de INNOMAR, obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 74,2% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 9° en el Ranking Final (Tabla 52).

## 5.2.2 Modelo 2 - SES 2000 Light de INNOMAR

**Tabla 38.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 2.

<b>Modelo 2 : SES 2000 Light (INNOMAR)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	4	0,570	20,00%	0,114	11,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	6	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>75,1</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 2 -SES 2000 Light de INNOMAR, obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 75,1% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75% a 100% y ocupó el lugar 8° en el Ranking Final(Tabla 52).

### 5.2.3 Modelo 3 - SES 2000 Standard de INNOMAR

**Tabla 39.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 3.

<b>Modelo 3 : SES 2000 Standard (INNOMAR)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	5	0,710	20,00%	0,142	14,2
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	6	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>82,1</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 3 -SES 2000 Standard de INNOMAR, obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 78,8% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75 a 100% y ocupó el lugar 4° en el Ranking Final(Tabla 52).

## 5.2.4 Modelo 4 - SES 2000 Standard Plus de INNOMAR

**Tabla 40.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 4.

<b>Modelo 4 : SES 2000 Standard Plus (INNOMAR)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	4	0,570	20,00%	0,114	11,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	6	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	3	1,000	2,50%	0,025	2,5
<b>Sumatoria</b>					<b>80,2</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 4 -SES 2000 Standard Plus de INNOMAR, obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 80,2% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75 a 100% y ocupó el lugar 5° en el Ranking Final(Tabla 52).

### 5.2.5 Modelo 5 - SES 2000 Mèdium de INNOMAR

**Tabla 41.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 5.

<b>Modelo 5 : SES 2000 Medium (INNOMAR)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	6	0,850	20,00%	0,170	17,0
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	6	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	3	1,000	2,50%	0,025	2,5
<b>Sumatoria</b>					<b>85,8</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 5 - SES 2000 Mèdium de INNOMAR, obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 85,8% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75 a 100% y ocupó el lugar 2° en el Ranking Final(Tabla 52).

## 5.2.6 Modelo 6 - SES 2000 ROV de INNOMAR

**Tabla 42.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 6.

<b>Modelo 6 : SES 2000 ROV (INNOMAR)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	6	0,850	20,00%	0,170	17,0
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	6	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	3	1,000	2,50%	0,025	2,5
<b>Sumatoria</b>					<b>85,8</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 6 -SES 2000 ROV de INNOMAR, obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 85,8% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75 a 100% y ocupó el lugar 1° en el Ranking Final(Tabla 52).

### 5.2.7 Modelo 7

**Tabla 43.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 7.

<b>Modelo 7 : STRATABOX (SYQWEST)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	2	0,500	25,00%	0,125	12,5
B (1-7)	6	0,850	20,00%	0,170	17,0
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	6	0,850	4,25%	0,036	3,6
Bloque 3	5	0,830	4,25%	0,035	3,5
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>77,3</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 7 (Stratabox de SYQWEST) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 77,3% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75% a 100% y ocupó el lugar 6° en el Ranking Final(Tabla 52).

## 5.2.8 Modelo 8

**Tabla 44.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 8.

<b>Modelo 8 : STRATABOX 3510 (SYQWEST)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	4	0,570	20,00%	0,114	11,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	6	0,850	4,25%	0,036	3,6
Bloque 3	5	0,830	4,25%	0,035	3,5
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>73,7</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 8 (Stratabox 3510 de SYQWEST) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 73,37% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 10° en el Ranking Final (Tabla 52).

## 5.2.9 Modelo 9

**Tabla 45.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 9.

<b>Modelo 9 : BATHY 2010 (SYQWEST)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	7	1,000	20,00%	0,200	20,0
C (1-4)	3	0,750	10,00%	0,075	7,5
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	6	0,850	4,25%	0,036	3,6
Bloque 3	4	0,660	4,25%	0,028	2,8
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	3	1,000	2,50%	0,025	2,5
<b>Sumatoria</b>					<b>84,9</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 9 (Bathy 2010 de SYQWEST) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 84,9% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75% a 100% y ocupó el lugar 3° en el Ranking Final (Tabla 52).

## 5.2.10 Modelo 10

**Tabla 46.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 10.

<b>Modelo 10: HMS-622 Chirp-ceiver (FALMOUTH SC.)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	4	0,570	20,00%	0,114	11,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	6	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	3	1,000	2,50%	0,025	2,5
<b>Sumatoria</b>					<b>75,9</b>
					<b>SBP SOBRESALIENTE</b>

El modelo 10 (HMS-622 CHIRPceiver de FALMOUTH SCIENTIFIC) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 75,9% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Sobresaliente, debido a que está en el rango de 75 a 100% y ocupó el lugar 7° en el Ranking Final(Tabla 52).

### 5.2.11 Modelo 11

**Tabla 47.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 11.

<b>Modelo 11 : SB-424 (EDGE-TECH)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	3	0,420	20,00%	0,084	8,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
F (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	4	0,660	4,25%	0,028	2,8
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>66,4</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 11 (SB-424 de EDGE-TECH) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 66,4% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 15° en el Ranking Final(Tabla 52).

### 5.2.12 Modelo 12

**Tabla 48.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 12.

<b>Modelo 12 : SB-2165 (EDGE-TECH)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	3	0,420	20,00%	0,084	8,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
F (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	4	0,660	4,25%	0,028	2,8
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>66,4</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 12 (SB-2165 de EDGE-TECH) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 66,4% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 13° en el Ranking Final (Tabla 52).

### 5.2.13 Modelo 13

**Tabla 49.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 13.

<b>Modelo 13 : SB-0512i (EDGE-TECH)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	3	0,750	25,00%	0,188	18,8
B (1-7)	3	0,420	20,00%	0,084	8,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
F (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	4	0,660	4,25%	0,028	2,8
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>66,4</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 13 (SB-0512i de EDGE-TECH) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 66,4% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 14° en el Ranking Final (Tabla 52).

### 5.2.14 Modelo 14

**Tabla 50.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 14.

<b>Modelo 14: GAVIA AUV (TELEDYNE G.)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	1	0,250	25,00%	0,063	6,3
B (1-7)	5	0,710	20,00%	0,142	14,2
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
G (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	7	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 3	4	0,660	4,25%	0,028	2,8
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	2	0,660	2,50%	0,017	1,7
<b>Sumatoria</b>					<b>59,7</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 14 (GAVIA AUV de TELEDUNE GAVIA) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 59,7% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 16° en el Ranking Final (Tabla 52).

## 5.2.15 Modelo 15

**Tabla 51.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 15.

<b>Modelo 15 : ECHOES 1000 (IXBLUE)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	2	0,500	25,00%	0,125	12,5
B (1-7)	3	0,420	20,00%	0,084	8,4
C (1-4)	2	0,500	10,00%	0,050	5,0
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	5	0,710	4,25%	0,030	3,0
Bloque 3	4	0,660	4,25%	0,028	2,8
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	4	1,000	2,50%	0,025	2,5
<b>Sumatoria</b>					<b>68,2</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 15 (ECHOES 1000 de IXBLUE) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 68,2% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 11° en el Ranking Final (Tabla 52).

## 5.2.16 Modelo 16

**Tabla 52.** Porcentajes de funcionalidad del SBP Modelo 16.

<b>Modelo 16 : PINGER (KNUDSEN)</b>					
<b>Criterios Primarios</b>	<b>Nota</b>	<b>% Nota (Sn)</b>	<b>Ponderación (Wn)</b>	<b>Nota parcial (Sn * Wn)</b>	<b>% Funcionalidad</b>
A (1-4)	2	0,500	25,00%	0,125	12,5
B (1-7)	4	0,570	20,00%	0,114	11,4
C (1-4)	3	0,750	10,00%	0,075	7,5
<b>Criterios Secundarios</b>					
E (1-2)	1	0,500	8,50%	0,043	4,3
F (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
G (1-2)	2	1,000	8,50%	0,085	8,5
<b>Criterios terciarios</b>					
Bloque 1	8	1,000	4,25%	0,043	4,3
Bloque 2	6	0,850	4,25%	0,036	3,6
Bloque 3	3	0,490	4,25%	0,021	2,1
Bloque 4	2	1,000	4,25%	0,043	4,3
Com. Cient	1	0,330	2,50%	0,008	0,8
<b>Sumatoria</b>					<b>67,7</b>
					<b>SBP BUENO</b>

El modelo 16 (PINGERSBP de KNUDSEN) obtuvo un porcentaje de funcionalidad de 67,7% de eficiencia, adjudicándose una descripción de SBP Bueno, debido a que está en el rango de 50 a 75% y ocupó el lugar 12° en el Ranking Final (Tabla 52).

### **5.3. RANKING FINAL**

El ranking final es una compilación y ordenamiento de los resultados de porcentajes de frecuencia obtenidos por cada modelo. Es la base primordial del cumplimiento de los objetivos de este trabajo de titulación, debido a que a través de este posicionamiento se genera un indicador comparativo de peso al momento de adquirir un SBP, para el objetivo que sea pertinente.

Los resultados de este Ranking Final, de mayor a menor se presentan a continuación en la Tabla 52:

**Tabla 53.** Ranking Final de los modelos SBP analizados.

Número de Ranking	Número de Modelo	Firma	Modelo	% Funcionalidad	Denominación	CATEGORÍA
1	6	INNOMAR	SES 2000 ROV	85,8%	SBP EFICIENTE	SELECCIONADO
2	5	INNOMAR	SES 2000 MEDIUM	85,8%	SBP EFICIENTE	SELECCIONADO
3	9	SYQWEST	BATHY 2010	84,9%	SBP EFICIENTE	SELECCIONADO
4	3	INNOMAR	SES 2000 STANDARD	82,1%	SBP EFICIENTE	ALTERNATIVO
5	4	INNOMAR	SES 2000 STANDARD PLUS	80,2%	SBP EFICIENTE	SELECCIONADO
6	7	SYQWEST	STRATABOX	77,3%	SBP EFICIENTE	ALTERNATIVO
7	10	FALMOUTH SC.	HMS-622 CHIRPceiver	75,9%	SBP EFICIENTE	ALTERNATIVO
8	2	INNOMAR	SES 2000 LIGHT	75,1%	SBP EFICIENTE	ALTERNATIVO
9	1	INNOMAR	SES 2000 COMPACT	74,2%	SBP BUENO	ALTERNATIVO
10	8	SYQWEST	STRATABOX 3510	73,7%	SBP BUENO	ALTERNATIVO
11	15	IXBLUE	ECHOES 1000	68,2%	SBP BUENO	ALTERNATIVO
12	16	KNUDSEN	PINGER SBP	67,7%	SBP BUENO	ALTERNATIVO
13	12	EDGE-TECH	SB-2165	66,4%	SBP BUENO	ALTERNATIVO
14	13	EDGE-TECH	SB-0512i	66,4%	SBP BUENO	ALTERNATIVO
15	11	EDGE-TECH	SB-424	66,4%	SBP BUENO	ALTERNATIVO
16	14	TELEDYNE G.	GAVIA AUV	59,7%	SBP BUENO	ALTERNATIVO

A partir de la tabla anterior, se vio la utilidad de construir un gráfico de barras para la variable % de Funcionalidad, con el fin de poder discriminar más objetivamente los SBP que serían finalmente seleccionados:



**Figura 32.** Gráfico de barras del % de Funcionalidad de los diferentes modelos del Ranking Final, donde las barras están ordenadas de mayor a menor % de Funcionalidad. La elipse negra representa la tendencia de los modelos seleccionados y la elipse naranja muestra el quiebre de la tendencia natural, por tanto pasan a denominarse modelos alternativos.

Fueron seleccionados un total de tres modelos en base a la Figura 32, la cual muestra que existe un quiebre de tendencia natural especificado en la elipse negra. Lo cual demuestra que los primeros tres modelos tienen poca diferencia entre sus valores de porcentajes de funcionalidad (menor a 2 unidades porcentuales), mientras que entre el tercer y cuarto modelo y así sucesivamente hay más de 2 unidades porcentuales.

Lo mencionado anteriormente marca la diferencia y es independiente de la descripción de cada modelo, ya que varios de ellos fueron considerados Sobresalientes y el grupo restante Buenos.

En base a lo anterior los tres primeros lugares del Ranking Final pertenecen a la categoría Seleccionados y desde el cuarto lugar del Ranking en adelante se han denominado modelos Alternativos.

Los tres modelos seleccionados son los siguientes:

En primer lugar se encuentran igualados los modelos **SES 2000 ROV** y **SES 2000 Médium** de Innomar con un 85,8% de Funcionalidad, cada uno, respectivamente. Le sigue, en tercer lugar, el modelo **Bathy 2010** de la firma Syqwest con un 84,9%.

Además, de la Tabla 36 se pueden extraer las siguientes conclusiones preliminares:

- En cuanto a la evaluación de los resultados obtenidos por cada firma, la empresa Innomar resultó mejor evaluada que el resto, por el hecho de tener 5 de sus 6 modelos analizados dentro de los primeros 10 lugares del ranking, teniendo 2 de los 3 modelos seleccionados (SES 2000 ROV y SES 2000 MEDIUM PLUS), dentro de su dominio. La empresa obtuvo los lugares: 1º, 2º, 4º, 5º, 8º y 9º.
- Otra de las empresas destacadas fue Syqwest Inc., ya que 2 de sus 3 modelos también están ubicados en los primeros 10 lugares del ranking. Destacan los modelos BATHY 2010 en el tercer lugar, el Stratabox en el sexto lugar, por último, Stratabox 3510 en el décimo lugar.
- EdgeTech, por su parte, tiene inserto sus 3 modelos fuera de los 10 primeros lugares.

- Por último, la firma que aparece también con uno de sus modelos ubicados dentro de los primeros 10 lugares del ranking es Falmouth Scientific con su modelo HMS-622 CHIRPceiver, en el 7° lugar.
- El resto de las empresas (Knudsen, iXBlue y Teledyne Gavia), se ubican entre las posiciones 11° y 16° del ranking final.

## **6. ANALISIS Y CONSIDERACIONES FINALES**

Este capítulo está centrado en analizar los resultados obtenidos en el Capítulo 5, utilizando para ello: una tabla comparativa, los porcentajes de funcionalidad y el ranking final.

Particularmente, se pretende interrelacionar los criterios de selección con conceptos oceanográficos, objetivos de futuras investigaciones y posibilidades de adquisición del SBP por parte de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso o cualquiera empresa, institución o cliente relacionado de una u otra manera con este tipo de estudios geofísicos.

A través de los resultados obtenidos y de las consideraciones finales, se generó una discusión, consistente con lo planteado por la comunidad científica en general, aprobando o desaprobandando su opinión, dependiendo del criterio analizado.

Para intentar llevar el análisis a casos, que fuesen lo más reales posibles dentro de una futura investigación, se plantearon 3 posibles escenarios, donde se recomendó un perfilador, independientemente de su lugar en el ranking para cada una de dichas aplicaciones.

Al finalizar este capítulo se logró determinar las principales conclusiones que serán descritas específicamente en el Capítulo 7 y éstas están referidas principalmente a cumplir con los objetivos de este trabajo.

### **6.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DESCRITA**

En base a la información descrita y de la cual se pudo tener acceso por parte de cada firma, que posteriormente se agrupó en los resultados de la tabla comparativa del Capítulo 5, se generó este análisis, el cual intenta ser lo más objetivo posible y pretende interrelacionar todos los conceptos en base a la experiencia oceanográfica en el tema planteado.

### 6.1.1 Criterios Primarios

En primer lugar, se debe destacar el(los) modelo(s) que mejor cumplen cada uno de los criterios primarios, secundarios y terciarios planteados en la tabla comparativa, como también distinguir los que se desarrollan con menor eficiencia en cada uno de los parámetros.

Este criterio primario obtuvo una ponderación o peso específico de un 70% sumando los cuatro criterios presentados en la metodología (sección 4.1.1), debido a la importancia que estos tienen dentro del trabajo de titulación, ya que la obtención de buenos datos en el subfondo marino, depende directamente de ellos y por ende se consideró que son los criterios más importantes.

Referente a lo anterior, se analizó en primera instancia los criterios primarios. En términos del criterio A “**Tipo de uso para el objetivo planteado**”, este se agrupó en 2 evaluaciones:

- máxima penetración alcanzable en el subfondo marino y
- máxima resolución alcanzable en el subfondo marino (equivalente a mínimo espaciamiento entre reflectores).

En lo referente a la **penetración**, cómo primer parámetro importante de comparación, se destacó el “modelo 9 - BATHY 2010 de la firma Syqwest”, debido a que posee la mayor penetración en el subfondo marino con 300m, dentro de sus especificaciones técnicas. El resto de los modelos se ubica en el rango de penetración de los 20 a los 200m, correspondiendo el valor más bajo al modelo 14 - Gavia AUV de Teledyne Gavia (20m).

En base al promedio obtenido para evaluar en una línea base este concepto, el cual arrojó un valor de 85,3m, sólo seis modelos superaron este valor medio, lo que representa un 37,5% de perfiladores que poseen una buena penetración.

En términos de **resolución alcanzable** se destacó el modelo 11 - SB-424 de EdgeTech, el cual obtuvo la menor resolución (4cm); y el mejor valor recayó en cinco de los seis modelos SES 2000 de Innomar y el modelo 10 HMS-622 CHIRPceiver de la firma Falmouth Scientific, con 5cm de resolución máxima.

El valor promedio del parámetro de mínima resolución fue de 7,10cm. Bajo este valor se ubicó la mitad de los perfiladores (8), representando el 50% de perfiladores con buena resolución.

Entonces, en la posterior evaluación realizada, se consideró con nota mayor, en escala de 1 a 4. Todos aquel(los) modelo(s) que conjugara(n) una buena penetración máxima y resolución mínima; estando, por cierto, el parámetro penetración sobre el promedio y el parámetro resolución bajo la media. En ese aspecto, ningún modelo (0,0%) obtuvo la nota mayor 4. La gran mayoría, en total 12 obtuvieron nota 3 (75,0%), tres obtuvieron nota 2 (18,75%) y uno nota 1 (6,25%).

La interpretación que se obtuvo de los resultados anteriores, es que la mayoría de los perfiladores de subfondo estudiados sirven específicamente para uno de los dos parámetros, resolución o penetración, siendo un porcentaje de 75% que conjuga relativamente bien ambas especificaciones dentro del mismo modelo. Entonces, al momento de adquirir un SBP se deben tener bien claros los objetivos del estudio, ya sea en términos de resolución y penetración deseables para escoger un modelo que rinda en base a esos alcances.

El criterio B, que hace referencia al “rango de profundidad de agua y a la zona geográfica”, se subdividió en dos partes en el análisis. Por un lado, los perfiladores de subfondo que alcanzan una mayor profundidad de agua y pueden trabajar en las cuatro zonas del océano descritas (muy somera, somera, profunda y muy profunda), son los modelos 7 Stratabox y el 9 Bathy 2010, ambos de la firma Syqwest, los cuales alcanzan un valor máximo de 11.000m.

Por su parte, los modelos que alcanzan una menor profundidad en el océano son los tres modelos de la firma EdgeTech (modelos 11, 12 y 13), con una máxima profundidad de agua de 300m.

Con respecto a la zona geográfica, donde estos modelos puedan operar, en base a las 3 áreas geográficas que se establecieron (zona costera, lagos-ríos-estuarios y canales australes), sólo cuatro modelos (25%) pueden operar en las tres zonas. Estos son los modelos 3, 5, 9 y 14 (SES 2000 Standard, SES 2000 Medium, Bathy 2010 y GAVIA AUV).

Entonces, en la evaluación generada para este criterio B, se dio la mayor puntuación al(a) modelo(s) que abarcaran las cuatro zonas de profundidad del océano, junto con cubrir la totalidad de las zonas geográficas mencionadas anteriormente.

En ese ámbito, al tener tantas combinaciones posibles de resultados, se estableció una escala especial de 1 a 7, en el cual sólo el modelo 9 Bathy 2010 de Syqwest obtuvo la mayor puntuación con nota 7 (6,25%), seguido de tres modelos con nota 6 (18,75%), dos modelos con nota 5 (12,5%), seis modelos con nota 4 (37,5%) y, por último, cuatro modelos con nota 3 (25%).

Lo que se puede desprender de este análisis es que la mayoría de los perfiladores se ubican en la franja de nota 3, o sea, sólo pueden trabajar en zonas costeras, ríos-lagos y estuarios, a profundidades de agua menores de 500m. Sólo un modelo se destaca en base a su versatilidad, obteniendo la mejor puntuación. Pero quizás no sea tan bueno para aplicaciones específicas a pocos metros de profundidad. Eso va depender exclusivamente de los objetivos particulares del estudio, al igual que con el criterio A.

En cuanto al criterio C, que hace referencia al tipo de montaje del SBP en la embarcación, se consideraron seis tipos de posibles montajes diferentes en una misma embarcación (montado junto a la quilla del casco, montado lateralmente, remolcado en superficie, remolcado como pez o towfish y montado en un ROV o AUV).

En base a lo mismo, el modelo 9 Bathy 2010 resultó ser más versátil (5/6 posibles montajes), con una puntuación 3 (6,25%) en una escala de notas de 1 a 4. Después es seguido por el perfilador 5 con cuatro posibles montajes; y a continuación, por los modelos 7, 8, 14 y 16, con tres montajes posibles. A todos ellos se le asignó la nota 2 (31,25%). Y los diez perfiladores restantes obtuvieron nota 1, debido a su poca versatilidad en términos de montaje a una embarcación menor.

### **6.1.2 Criterios Secundarios**

En base a los criterios secundarios, se analizaron cuatro parámetros importantes, la mayoría de los cuales marcan la diferencia, principalmente en la obtención de buenos resultados para cumplir los objetivos de un estudio, especialmente en el ítem del procesamiento de los datos.

Los criterios secundarios, sumando sus 4 componentes, arrojaron una ponderación o peso específico de un 20%, debido a que tienen una importancia relativa, pero no determinante en términos de la obtención de buenos resultados y cumplimientos de objetivos dentro de una investigación, utilizando perfiladores de subfondo.

El primero de ellos es el criterio E “Software propio o externo”, del cual depende todo el procesamiento de datos y el adquirirlo por parte de la misma firma, abarata costos. Sin embargo, en la práctica, paradójicamente podría darse perfectamente el caso contrario, donde un software externo sea mucho mejor que el propio. Esta última situación, de hecho, suele ocurrir con los ecosondas multihaces, por ejemplo.

Bajo este criterio, 10 modelos (62,5%) contienen softwares de procesamiento propios, entre los que se destacan los modelos de Innomar, con el software SESWIN, los dos modelos Stratabox de Syqwest, con el software Stratabox PC Software, el SeeByte AutoTrack, del modelo de Teledyne Gavia, y, por último, el software DELPH del modelo de iXBlue. Los 6 modelos se pueden acoplar a un software externo, principalmente en las investigaciones que se revisaron, trabajaron con el software de procesamiento SonarWiz5, del fabricante Chesapeake Technology y el “SurveyEnigneSeismic+” de Coda Octopus, debido a su experiencia en el campo de la geofísica, buenos resultados y el conocimiento que se tiene sobre él en el tiempo, esto es independiente del Software de adquisición en donde en todos los casos se presentó.

El segundo criterio secundario, F, que hace mucha conexión con el anterior, es “Compatibilidad con otro software”. En este ámbito hay una igualdad en los resultados, siendo 50% compatibles y el otro 50% no. Los 8 modelos compatibles y, que a la vez los hace ser más versátiles en términos de necesidades o gustos específicos por un software en particular, son los modelos: 3, 4, 5, 6, 9, 10, 15 y 16.

El tercer criterio hace relación con la “Garantía y Soporte técnico” que puedan ofrecer las firmas de cada SBP. En caso de mantenciones del equipo, apoyo con algún técnico especialista en una de las funciones del equipo u otra necesidad específica que se requiera del mismo, es vital tener esta garantía y soporte, cómo apoyo en el post-procesamiento de los datos. A su vez, es un indicador de recomendación para otros investigadores o clientes. Por lo mismo, la empresa gana en todos los sentidos, a la hora de ofrecer dicho servicio. En este contexto, todos los modelos cuentan con garantía y soporte técnico.

El último criterio secundario analizado es la inclusión o no del “Sensor de movimiento inercial IMU”, el cual puede localizar la proveniencia de los ecos y se puede predecir con qué dirección se emitirán los pulsos, de tal manera de reorientarlos, para que se emitan lo más próximos a la vertical posible. Esto genera una ventaja a la hora de obtener una buena calidad de datos del subfondo marino. En esta materia sólo 7 perfiladores (43,75%) incluyen sensor de movimiento en sus especificaciones técnicas. Estos son los modelos: 4, 5, 6, 8, 10, 14 y 15.

### **6.1.3 Criterios Terciarios**

Los criterios terciarios, tal como dice su nombre, tienen una ponderación más baja, debido a que no son parámetros que marcan tanto la diferencia en una investigación, como lo son los primarios y los secundarios, pero -eso sí- son un complemento ideal que ayuda a dirimir las características específicas de cada modelo al momento de adquirirlos. Sumando todos los parámetros incluidos dentro de los criterios terciarios, estos suman una ponderación o peso específico de un 10%.

En base a lo anterior, uno de los parámetros más importantes a considerar es la frecuencia a utilizar, ya que va directamente relacionada con la penetración y resolución a obtener en el estudio, debido a la relación básica que existe, en donde, habiendo una mayor frecuencia de la señal, existirá una mayor resolución y una más baja penetración. Por el contrario, si la frecuencia de la señal es baja, se obtendrá una mayor penetración y una resolución menor.

En este análisis de los modelos de SBP se trabajó con la frecuencia promedio debido a que trabajar con rangos hace muy difícil la comparación entre modelos. En base a este punto la frecuencia **promedio**, en general, para todos los modelos analizados dio 10kHz, en donde la mayoría (15 perfiladores) trabajan sobre este valor promedio. Sólo 1 de ellos (modelo SES 2000 ROV de Innomar) trabaja con frecuencias más bajas, menores a 10kHz. Entonces, este modelo es recomendable en caso de una aplicación específica en zonas costeras, en donde se necesite una mayor penetración (alcanza hasta los 150m) y una baja resolución (ver tabla comparativa, Capítulo 5).

Cabe destacar que el parámetro frecuencia no se ubicó dentro de los criterios primarios, debido a que si bien escoger un buen rango de frecuencias ayuda a mejorar la penetración o resolución a conseguir, es solo un parámetro complementario y muchas veces los resultados de una investigación dependen de otros factores como el nivel de fuente primario, ancho del haz, etc.

En los parámetros de alto, ancho y largo del transductor se obtuvieron diversos resultados, dando un promedio de 0,31m, 0,44m y 0,58m, respectivamente; destacando 13 modelos, que están bajo estos valores medios.

Lo anterior quiere decir que son muy indicados para cualquier tipo de embarcación y podrían estar presentes en botes o lanchas con 18 m de eslora como tope máximo.

Otro punto importante de comparación son los parámetros de los pesos máximos en aire y agua que pueden tener los equipos. De todos los modelos analizados en base a la misma cantidad de modelos que presentaron información respectiva, el promedio dio 45,55kg en agua y de 71,72kg en aire. Bajo este contexto 10 modelos (63,5%) están bajo la media en ambos pesos.

En cuanto al criterio W, que es referente al tipo y material de embarcación, aquí el análisis fue más simplificado, ya que la mayoría de los modelos pueden trabajar ya sea en lancha, bote Zodiac, bote pesquero, catamarán u otros, sólo habiendo cinco modelos que no cumplen la condición de usarse en todos los tipos de embarcaciones menores descritas anteriormente (modelos 7, 8, 14,15 y 16) representando un 31,25% del total. Por su parte, en términos de material de embarcación el 100% de los perfiladores cumple la condición de trabajar ya sea en embarcaciones hechas de madera, fibras de vidrio, PVC, etc. En base a este punto los restantes once modelos son recomendables para trabajar en cualquier tipo de embarcación menor.

En lo que respecta al acoplamiento que pueden tener los modelos con otro equipamiento geofísico, llámese sonar de barrido lateral, ecosonda Multihaz u otro, los modelos otorgaron resultados sorprendidos, ya que solo dos modelos se pueden complementar con los equipos geofísicos mencionados anteriormente- Estos son los modelos 4 y 5 de Innomar. En cuanto al resto, algunos solamente se acoplan al sonar de barrido lateral.

En relación al formato de los datos digitales a utilizar, la mayoría de los modelos coincidió con los formatos SEG-Y y XTF cómo los más utilizados y está relacionado a la compatibilidad o no con los softwares externos.

En cuanto al tipo y tamaño de cable a utilizar, que es un factor determinante en caso de los remolques de superficie, ya que, al no tener un largo adecuado, queda demasiado tirante el transductor, lo que hace que el ruido de la hélice de una lancha por ejemplo afecte en los datos obtenidos, ya que saldrían identificados como señal de ruido. En base a lo mismo, los tipos de cable más usados son el eléctrico simple y el reforzado con kevlar, y con un promedio de largo de cable entre los 16 modelos de 17,58m.

Los promedios de los parámetros técnicos de ancho del haz, velocidad de repetición de pulso, cantidad de transductores a utilizar, peso del transductor y potencia de salida máxima, arrojaron los siguientes valores:  $3,7^{\circ}, 28,37 \text{disparos} \cdot \text{s}^{-1}$ , 2 transductores en cantidad máxima, 36,92kg y 16,3kW, respectivamente.

En términos de posibles tipos de sedimentos estudiar, ocho modelos pueden trabajar en arcilla, cinco en grava, tres en limo y tres en arenas calcáreas. Esto representa una diversidad en términos de aplicaciones concretas en zonas costeras, lagos o canales. Los modelos que abarcan más tipos de fondo disponibles, son el 1 y el 2 de Innomar, debido a que pueden trabajar fácilmente en arenas, gravas y limo, principalmente en zonas costeras, como se explicó anteriormente, con una penetración máxima de 40m y una resolución máxima de 5cm.

Otros parámetros técnicos importantes, cómo el nivel de sonido de la fuente y la fuente de alimentación, arroja los siguientes valores promedio: 235dBy 200VAC, respectivamente. Cabe destacar que la información que se obtuvo en estos parámetros no fue completa y sólo se obtuvieron datos para siete perfiladores en el primer parámetro (nivel de fuente), de diez modelos para el segundo solamente (tasa de disparos) y para el tercero (fuente de alimentación) fue completo, por tanto, no fue 100% representativa.

En base a la diferencia entre perfiladores de tipo Chirp y los tradicionales, es que los primeros, al usar frecuencia modulada y compresores de pulso, logran una mejor ganancia en la razón señal-ruido, lo que a su vez genera una penetración más grande en el sedimento del subfondo marino. Todo esto al evitar la pérdida por absorción en sedimentos blandos tratada en el Capítulo 1. Por último, otra diferencia importante es que, al trabajar con cuatro transductores cerámicos, mediante modulación de onda, se genera una mayor resolución en el subfondo marino, dependiendo del tipo de fondo. Conforme a lo anterior nueve modelos (56,25%) son de tipo Chirp y otros siete (43,75%) son tradicionales o Pinger.

En términos de tipo de transductores, trece perfiladores (81,25%) usan el tipo de transductor electromagnético, dos de ellos (12,5%) el transductor de cono simple y un transductor (6,25%) de tipo Tonpiliz.

Las notas que se otorgaron dentro de los criterios terciarios, correspondió a un 5% en caso que tuviese la mayor cantidad de datos presentes en sus especificaciones técnicas y otro 5% de acuerdo al comentario de la comunidad científica en general, de acuerdo a publicaciones y foros con una caracterización dada (bueno/regular/malo). Esto se discute con mayor detalle en la sección 6.3 de este capítulo.

## 6.2. ANÁLISIS DE LOS MODELOS SELECCIONADOS

En este apartado se analizan y comparan los tres modelos seleccionados en el Capítulo 5, según los resultados obtenidos en el ranking final.

Analizando los tres modelos seleccionados, se obtuvieron las siguientes afirmaciones:

Los modelos SES 2000 ROV y SES 2000 MEDIUM empataron en el primer lugar con 85,8% de porcentaje de funcionalidad y solo estuvieron separados por unas décimas de porcentajes al modelo Bathy 2010 ubicado en el tercer lugar (84,9%). Las principales ventajas y desventajas de estos modelos, se presentan a continuación:

- **Modelo SES 2000 ROV de Innomar (85,8 %):** Este modelo logró la puntuación máxima en el ranking final, teniendo ventajas similares en cuanto a máxima penetración y mínima resolución, tipos y material de embarcación, criterios terciarios en su totalidad y una caracterización de SBP Bueno de la comunidad científica en general. La diferencia la marca que éste tiene a su favor el parámetro de software propio al poseer el software de procesamiento SESWIN, como ventaja también tiene, que trabaja hasta los 7.000m de profundidad.

- **Modelo 5 SES 2000 Médium de Innomar (85,8%):** Este modelo obtuvo el mismo puntaje que el anterior y se ubicó en el segundo lugar del ranking. Sus principales ventajas son que opera en todas las áreas geográficas propuestas, se acopla a todos los tipos y materiales de embarcación, cumple con los cuatro criterios secundarios, todos los terciarios, tiene una descripción de perfilador de subfondo Bueno por parte de la comunidad científica y una resolución máxima de 5cm. Las desventajas que posee son: una baja penetración con respecto a la media, con un máximo de 70m. Por otro lado, solo opera hasta los 2.000m de profundidad. Por ende, no abarca los cuatro rangos de la columna de agua.
- **Modelo 9 BATHY 2010 de Syqwest (85,0%):** Este equipo logró tal ponderación debido a que obtuvo excelentes puntuaciones en parámetros tan importantes como máxima penetración, máxima resolución, rango de profundidad de agua y áreas geográficas, tipo y material de embarcación, compatibilidad con otro software, garantía y soporte técnico, criterios técnicos terciarios en su totalidad y una caracterización de SBP Bueno de la comunidad científica en general. Sus principales desventajas, es que no puede acoplarse al sistema AUV. Por eso no recibió la puntuación máxima en el criterio C tipo de montaje. También, otro punto en contra es que no posee sensor de movimiento inercial IMU.

### **6.3. ANÁLISIS DE COMENTARIOS DE LA COMUNIDAD CIENTÍFICA**

La comunidad científica, en base al uso que se les ha dado a estos modelos de SBP en todas las publicaciones revisadas y también en los foros geofísicos vertidos en internet, dan como veredicto que sólo seis perfiladores son descritos como buenos (37,50%), ocho son regulares (50,00%) y dos malos (12,5%) (Fórum Detectation, 2016).

De los seis perfiladores buenos, cuatro son justamente los modelos seleccionados, descritos en la sección anterior y los otros modelos son el HMS-622 CHIRPceiver de la firma Falmouth Scientific (6° lugar del ranking) y el modelo ECHOES 1000 de la firma iXBlue (13° lugar del ranking). Por ende, hay una cierta concordancia con el análisis expuesto en este trabajo de titulación. Principalmente, todo esto está dado porque sus especificaciones técnicas cumplieron las expectativas de sus estudios. Al momento de utilizar dichos modelos en terreno se obtuvieron buenos resultados, cumpliendo los objetivos del mismo (Estudios 10, 18,20 y 23 del Capítulo 3) y también en los foros todos son detallados como perfiladores eficientes.

De los siete perfiladores en la categoría regulares, cuatro de ellos se encontraron en publicaciones científicas en la web analizada en el Capítulo 3 (Estudios 14, 19, 25 y 27). Aparte, dentro de los foros técnicos, algunos científicos estaban conformes con los resultados; pero otros, no tanto, debido a que no se obtuvieron la penetración o resolución que ellos pretendían encontrar, debido a que la frecuencia utilizada no fue la adecuada o también a que el ancho de banda no abarcaba sus intereses particulares, etc.

De los cuatro modelos descritos como malos según la comunidad científica, ninguno apareció en alguna publicación y en los foros aparecían descritos como deficientes en la adquisición de datos y cumplimiento de objetivos. Aquí hay una falta de concordancia con los resultados obtenidos en este trabajo de titulación, debido a que los modelos 1 y 16 (SES 2000 Compact de Innomar y PINGER-SBP de Knudsen), ocupan el 9° y el 14° lugar del ranking con un porcentaje del 70,55% y 66,70% respectivamente, superando plenamente la barrera del 50%, categorizándose como perfiladores intermedios o buenos. Por tanto, son recomendables de manera alternativa para cualquier tipo de estudio específico que se requiera; por ejemplo, para estudios de consolidación de materiales, para estimación de costos de dragado o monitoreo ambiental y estudios ecológicos; en donde, tal vez, se necesite una penetración y resolución con rangos no muy exigentes.

Según el presente estudio, al no haber perfiladores con evaluación Regular o Deficiente, quiere decir que la totalidad de los modelos analizados son recomendables en términos de eficacia para una investigación, independiente del objetivo particular a efectuarse en el subfondo marino.

#### **6.4. ANÁLISIS DE POSIBLES ESCENARIOS DE APLICACIONES DIRECTAS USANDO SBP**

Según la revisión efectuada en base a datos referentes a lagos-estuarios y canales australes chilenos, entre los que se destacan Canal Moraleda, estrecho de Magallanes, lagos Llanquihue, Calafquén, Riñihue y O'Higgins; arrojó un valor promedio de profundidad en canales australes de 416m y una profundidad estándar en lagos de aproximadamente 80m (Lago Ranco). (DGA, 2014). Este valor será representativo en el posterior análisis de escenarios.

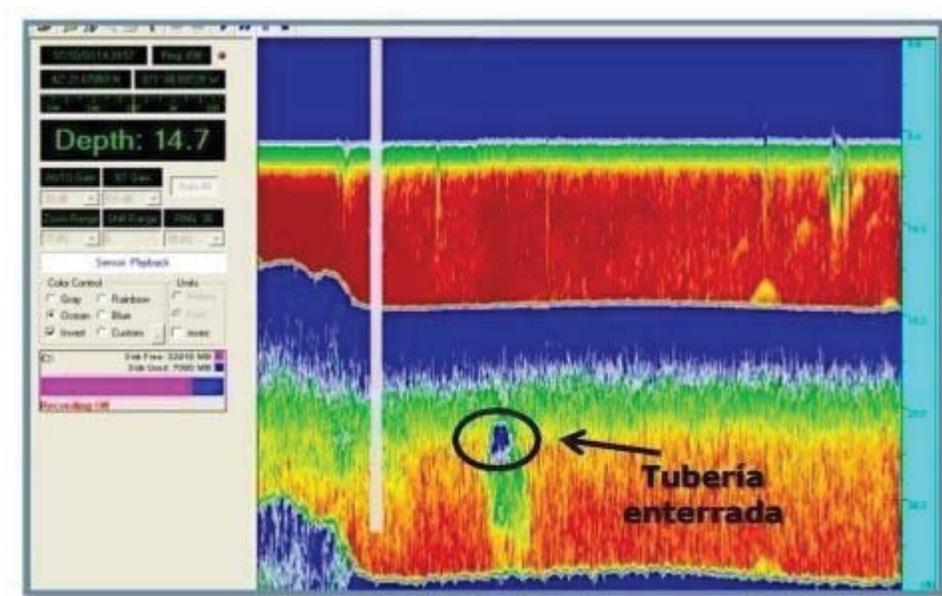
En el caso de la revisión de ríos chilenos, principalmente se centraban sus datos en longitud en km, debido a que comienzan en las altas montañas y finalizan sus recorridos en la desembocadura, junto al mar. Por ende, su profundidad es muy variable. Pero se obtuvo información de un río en especial, llamado Imperial, el cual tiene un promedio de profundidad de 2,5m. Por tanto este valor será referencial para el posterior análisis de escenarios.(Rivera *et al.*, 2004).

De un punto de vista oceanográfico, con el fin de interrelacionar todos los conceptos tratados anteriormente, pero en casos reales, se establecieron tres posibles escenarios de estudios típicos que se hacen normalmente, ya sea en zonas costeras, lagos y canales australes, con embarcaciones menores, profundidades bajas e intermedias y condiciones ambientales favorables. Esto quiere decir: días sin lluvia, altura de olas bajas, sin tormenta u otra adversidad que afecte los propósitos de esta simulación. En definitiva, se trata de hacer un análisis lo más real posible, en base a la información que se tiene documentada. Por tanto, según lo revisado en párrafos anteriores, en cuanto a ríos, lagos y canales, se estimaron escenarios por debajo del valor medio de profundidad encontrado para cada caso.

Una vez presentados los tres escenarios, se realizó una recomendación de un modelo específico para cada caso, sin tener en cuenta la posición que obtuvo en el ranking final y su *status* o descripción impuesta por el trabajo de titulación ni por la comunidad científica en general.

Los tres escenarios se describen a continuación:

- **Escenario 1:** Estudio de exploraciones geotécnicas con la determinación del espesor de paquetes sedimentarios no consolidados y delineación del techo del basamento (bedrock) en un río (Imperial).
- **Escenario 2:** Estudio de detección de tuberías enterradas en un lago (Ranco)
- **Escenario 3:** Estudio de dragado en una zona costera (puerto Valparaíso).



**Figura 33.** Detección de una tubería enterrada en sedimento no consolidado, mediante el SBP Stratabox 3510, con el arreglo de 4 transductores (3,5kHz) (Bentos, 2015).

**Escenario 1:** Estudio de exploraciones geotécnicas con la determinación del espesor de paquetes sedimentarios no consolidados y delineación del techo del basamento (bedrock) en un río (Imperial)

Características exigibles:

- Buena penetración (<50m).
- Resolución media (7,1cm app).
- Profundidad de agua aprox 2,5m.
- Tipo de montaje: lateral a la embarcación.
- Embarcación tipo bote pesquero.
- Equipo puede tener software propio o externo.
- No incluye sensor de movimiento.
- Frecuencia de 10kHz.
- Tipo de fondo: limo y arena
- Formato digital SEG-Y, XTF o ASCII.

Recomendación:

El modelo recomendado es el **Bathy 2010** de la firma Syqwest, ya que cumple con todos los requisitos asignados en la planificación de la Investigación de un río. Este modelo ocupa el 2º lugar del ranking efectuado y se caracteriza por su versatilidad en funciones. Por ende, es un equipamiento confiable, ya que obtiene excelentes resultados en la profundidad solicitada y con los rangos de frecuencia, resolución y penetración máxima que se le exige.

**Escenario 2:** Estudio de detección de depósitos de tuberías enterradas en un lago (Ranco).

Características exigibles:

- Penetración media (<30m app).
- Resolución alta (>7,1cm).
- Profundidad de agua <80mm.
- Zona de lago.
- Tipo de montaje: montada al casco de la embarcación.
- Embarcación tipo lancha o catamarán.
- Equipo puede tener software propio o externo.
- Debe incluir sensor de movimiento para un mejor posicionamiento.
- Frecuencia alta mayor a >10kHz.
- Complementario a un sonar de barrido lateral.
- Tipo de fondo: arena y limo.
- Formato digital SEG-Y, XTF o ASCII.

Recomendación:

El modelo recomendado es el **Stratabox 3510** de la firma Syqwest, ya que cumple con todos los requisitos asignados en la planificación de investigación a un lago. Este modelo ocupa el 7° lugar del ranking efectuado y se caracteriza por su buena adaptabilidad a estudios específicos, especialmente tipos de fondo marino de arena y limo. Por ende, es un equipamiento confiable, ya que obtiene excelentes resultados en la profundidad solicitada y con los rangos de frecuencia, resolución y penetración máxima que se le exige.

### **Escenario 3:** Estudio de dragado cercano a una zona costera (puerto Valparaíso)

#### Características exigibles:

- Penetración baja de agua(<10m app).
- Resolución alta (>7,1cm).
- Profundidad máxima de agua<5m.
- Zona costera.
- Tipo de montaje: remolcado en superficie o montado en el casco.
- Embarcación tipo lancha.
- Equipo puede tener software propio o externo.
- Debe incluir sensor de movimiento para un mejor posicionamiento.
- Frecuencia de 15kHz.
- Debe ser independiente.
- Tipo de fondo: arcilla y arena.
- Formato digital SEG-Y, XTF o ASCII.

#### Recomendación:

El modelo recomendado es el **Gavia AUV** de la firma Teledyne Gavia, ya que cumple con todos los requisitos asignados en la planificación de la Investigación en este puerto Chileno. Este modelo ocupa el 16° lugar del ranking efectuado y se caracteriza por su buena adaptabilidad a estudios específicos de puerto, especialmente tipos de fondo marino de arena y arcilla, por ende es un equipamiento confiable, ya que obtiene excelentes resultados en la profundidad solicitada y con los rangos de frecuencia, resolución y penetración máxima que se le exige.

## **6.5. CONSIDERACIONES FINALES**

En este trabajo de titulación, se han encontrado diversos requerimientos dentro de las cuales se pretendió abordar en primera instancia el origen de ellas y sus posibles soluciones y en la segunda subsección algunas recomendaciones para poder mejorar aún más la investigación que se ha efectuado en este trabajo. Todo lo anterior según la documentación revisada, con el único objeto de lograr mejores resultados, en términos de calidad de datos adquiridos en futuras investigaciones con SBP.

### **6.5.1 Descripción de los Requerimientos**

En este sentido, se han encontrado barreras de diverso orden, ya sean barreras técnicas, barreras ambientales y barreras de información- comerciales.

#### **a) Requerimientos técnicos**

Los principales requerimientos técnicos, siempre van a estar dados por el lugar donde se realice la investigación. Por ejemplo, cómo se vio en el Capítulo 1 de este trabajo de titulación, existen diversas atenuaciones que es preciso tenerlas en cuenta, llámese: atenuación geométrica, por absorción, reverberación y efecto de burbujas de aire. Todas ellas deben ser consideradas debidamente y utilizar bien parámetros como la frecuencia, directividad, ancho de banda, nivel primario de fuente, tasa de disparos, velocidad de repetición de pulsos, etc. de la manera más adecuada y en los tiempos necesarios para intentar disminuir lo más posible estos efectos en el eco enviado, para poder recibir la señal lo más limpia posible, disminuyendo al máximo la generación de ruido innecesario, para así poder generar una buena obtención de datos del subfondo marino.

Para las embarcaciones pequeñas se hace imposible utilizar equipos muy voluminosos. Por tanto, el número de frecuencias a utilizar juega un papel fundamental, para obtener excelentes resultados en lugares donde la topografía sea diversa en tipo de fondo, estructuras y el objetivo así lo requiera. Por tanto, perfiladores con frecuencias simultáneas corren con mucha ventaja en este tipo de estudios, ya sea geomorfológicos o de identificación de capas de sedimento.

#### **b) Requerimientos Ambientales**

Siempre es bueno tener en cuenta las condiciones climáticas en las cuales se desarrollará el estudio. Por tanto condiciones de viento y oleaje favorables, ayuda notablemente a obtener excelentes resultados de adquisición de datos. Claramente todo el análisis efectuado en este trabajo de titulación, está hecho en condiciones ideales, en el cual todas estas condicionantes sin lugar a dudas en caso de no tenerlas presentes, afectarían el porcentaje de funcionalidad de cada modelo y por tanto los objetivos del estudio en sí mismo.

Otro punto a tener en cuenta es el tipo de fondo a penetrar, ya que las propiedades de dicho material, tales como el sedimento, densidad, composición y contenido de agua y gas, hacen que exista una buena o mala transmisión de la señal acústica hacia el perfilador.

Por su parte la tecnología Chirp, como se ha revisado, tiene muchas ventajas operativas y técnicas por sobre las señales convencionales.

Pero también tiene complicaciones y depende mucho del tipo de fondo a penetrar, ya que los que operan con un solo transductor, poseen una gama de frecuencias limitadas. Por tanto, es difícil penetrar en todos los tipos de fondo.

### **c) Requerimientos de información – comerciales**

En términos simples, no poseer una información detallada al momento de adquirir un equipamiento tan importante como un perfilador de subfondo marino, atenta completamente en el análisis de comparación que a éste se le puede dar. Este fue el caso de esta investigación, la cual contó con solo el 90% de la información necesaria para generar la tabla comparativa (datos marcados como x en la tabla comparativa del capítulo 5 corresponden al 10% restante). Este número podría haber sido aún menor en caso que no se hubiese intercedido por ellos a través de correos electrónicos con las firmas pertinentes.

Por tanto, tomar en cuenta el detalle técnico brindado por las especificaciones técnicas de cada firma en internet y poder reflejarlo y compararlo con la experiencia de otros investigadores en folletos técnicos, publicaciones, presentaciones o foros geofísicos, se hace muy necesario para poder adquirir el SBP idóneo para los fines de la investigación que se pretenda realizar.

### **6.5.2. Recomendaciones**

Para intentar tener un registro de comparación más completo al que se ha efectuado en este trabajo de titulación, que se basa principalmente en embarcaciones pequeñas y todos aquellos perfiladores que estas naves menores puedan operar, se recomienda integrar todos los perfiladores existentes en el mercado internacional y que fueron descartados en esta oportunidad, los cuales sirvan para operar en embarcaciones mayores de investigación científica (por ejemplo; en el caso chileno el buque de investigación Cabo de Hornos) y, por otro lado, todos los tipos de perfiladores que usan otras fuentes, como boomers, sparkers, etc. Todo lo anterior haría posible tener un análisis más macro y completo en cuanto a condiciones técnicas para la calidad de trabajos multidisciplinarios que hoy en día el mercado internacional, en términos investigativos y comerciales, lo está requiriendo.

Por último, una vez teniendo este informe comparativo más macro, se recomienda hacer un análisis costo-beneficio en términos financieros, ya que el indicador “Costo” fue totalmente descartado en este trabajo, debido a que desenfocaba los objetivos técnicos del mismo.

Este posible trabajo financiero complementaría totalmente los informes técnicos, debido a que se tendría un análisis económico con indicadores comerciales, como por ejemplo el “valor actual neto” (VAN) y la “tasa interna de retorno”(TIR), que harían que existiera un detalle, que logre explicar si es que la adquisición del SBP es rentable o no, así detallando su depreciación en el tiempo, mantenimiento y características comerciales que afectan y hacen que el rendimiento de este equipo sea bueno o no en el tiempo. Claramente el indicador costo, alteraría el orden del ranking final y pudiesen ser otros modelos los que ocupen los primeros lugares, al ser más rentable su adquisición y posterior uso.

## 7. CONCLUSIONES

Según el análisis efectuado a través de la metodología aplicada, a través del ranking final, se seleccionaron tres modelos de un total de dieciséis en evaluación para los futuros requerimientos de la ECM- PUCV. De mayor a menor estos son:

- 1<sup>er</sup> lugar: SES 2000 ROV (85,8% funcionalidad);
- 2<sup>do</sup> lugar: SES 2000 Médium (85,8% funcionalidad) y
- 3<sup>er</sup> lugar: BATHY 2010 (84,9% funcionalidad).

Al momento de efectuar una adquisición de un sub-bottom profiler siempre se debe tener en cuenta el objetivo o propósito de la investigación a efectuar. Desde este punto de vista, se recomiendan tres perfiladores, para diferentes escenarios aplicados en zonas geográficas chilenas:

- estudio de caracterización en un río: Bathy 2010;
- estudio de detección de tubería enterrada en un lago: Stratabox 3510 y
- estudio de dragado en una zona de puerto: Gavia AUV.

Independiente del lugar otorgado en el ranking, cada perfilador analizado sirve para una determinada aplicación específica de un lugar. Siempre se debe tener en cuenta parámetros relevantes como: penetración máxima, resolución máxima, frecuencia a utilizar, tipo de fondo, área geográfica, requisitos ambientales, requisitos técnicos, softwares propios o externos y el proceso post-venta de garantía y soporte técnico para asesoría o mantenimientos.

En resumen, para el complemento de este trabajo de titulación en futuras investigaciones, se recomienda realizar un estudio de análisis comparativo que adicione todos los SBP disponibles en el mercado, de cualquier tamaño y que trabajen en aguas oceánicas. Además, se sugiere realizar un estudio económico, que analice el costo-beneficio de adquirir un perfilador de subfondo y que analice la rentabilidad real al largo plazo de la adquisición de este equipamiento geofísico.

## REFERENCIAS

- Ainslie, M. 2010. Principles of Sonar Performance Modeling. Springer Praxis Books, Berlin, 707 pp.
- Amundaray Instrumentos Geotécnicos. 2015. Sísmica Marina. [<http://www.aig-instrumentos.com/servicios/96001/ssmica-marina/>]. Revisado: 21/04/2015.
- Aparicio, J., E. García, A. Jiménez, F. Álvarez & J. Ureña. 2011. Modelos de propagación de señales acústicas en Entornos Subacuáticos. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, España. 26 pp.
- Applied Acoustics. 2015. Sub Bottom Profiling. [[www.appliedacoustics.com](http://www.appliedacoustics.com)]. Revisado: 18/08/2015.
- Alaamer, H. A. 2010. Characteristics of sub-bottom profile acquired in Shatt Al-Arab River, Basrah-Iraq. [<http://biopublisher.ca/html-1712-32-ijms>]. Revisado: 10/12/2015.
- Araya, G. 2012. ¿Qué es el arqueo de una nave? Revista de Marina, 3: 266-269. [<http://revistamarina.cl/revistas/2012/3/araya.pdf>]. Revisado: 12/12/2015.
- Atlas Elektronik. 2015. OwnProducts. [[www.atlas-elektronik.com](http://www.atlas-elektronik.com)]. Revisado: 03/08/2015.
- Ayala, F., L. Casero, J. Celma, A. García, M. Romana & D. Simic. 1985. Métodos de reconocimiento del subsuelo marino. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 27-40.
- Ayres, A. 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografiana exploração mineral submarina. Sao Paulo, Rev. Bras. Geof., 18 (3): 183-222.

Azimut Marine, 2015. Transductores [<http://www.azimutmarine.es/nautica/transductores-tipos-utilidad>]. Revisado: 02/12/2015.

Barroso, E. 2010. Evaluación de metodologías para la exploración geofísica de hidratos de gas submarinos. Trabajo de Titulación para optar al título de Oceanógrafo, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 419 pp.

Baeten, N., J.S. Laberg, M. Forwick, T.Q. Vorren, M. Vannest, C. Forsberg, T. Kvalstad & M. Ivanov. 2013. Morphology and origin of smaller-scale mass movements on the continental slope off northern Norway. *Geomorphology*, 187: 122- 134.

Beck, C., B. Mercier de Lepinay, J.L. Shneider, M. Cremer, N. Cagatay, E. Wendenbaum, S. Boutareud, G. Menot, S. Schmidt, O. Weber, K. Eris, R. Armijo, B. Meyer, N. Pondard, M. Gutsher, J.L. Turon, L. Laberyc, E. Cortijo, Y. Gallet, H. Bouquerel, N. Gorur, A. Gervais, M. H. Castera, L. Londeix, A. De Resseguier & A. Jaouen. 2007. Late Quaternary co-seismic sedimentation in the Sea of Marmara's deep basins. *Sedimentary Geology*, 199: 65-89.

Bentos. 2015. Bentos Geophysical Equipment. [<http://www.bentos.cl/geofisica.php>]. Revisado: 13/01/2015.

Boyer, T.P., J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman, H. E. Garcia, A. Grodsky, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T.D. O'Brien, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I. V. Smolyar & M. M. Zweng. 2013. World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72, S. Levitus, Ed., A. Mishonov, Technical Ed.; Silver Spring, MD, 209 pp.

Chen, C.-T. & F. J. Millero. 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 62(5): 1129-1135.

Chen, S.C., S. Hsu, C. Hui Tsai, C.-Y. Ku, Y.-C. Yeh & Y. Wang. 2010. Gas seepage, pockmarks and mud volcanoes in the near shore of SW Taiwan. *Mar. Geophys. Res.*, 31:133–147.

Cifuentes, J. L., P. Torres-García & M. Frías. 2015. El océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: oceanografía física, matemáticas e ingeniería. Capítulo V. [[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec\\_8.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec_8.html)]. Revisado: 8/5/2015.

Da Silva, A., P. S. Menandro, K. do Nascimento, V. Quaresma & A. C. Bastos. 2014. Interpretation of sedimentary processes using Echo-Character Distribution: Case study of Piraquê-Açu and Piraquê-Mirim estuarine system, Aracruz-ES (Brazil). *Revista Brasileira de Geofísica*, 32(2): 301-309.

Del Grosso, V. A. 1974. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *J. Acoust. Soc. Am.*, 56(4): 1084-1091.

De Santis, V. & M. Caldara. 2014. Evolution of an incised valley system in the southern Adriatic Sea (Apulian margin): an onshore–offshore correlation. *Geological Journal*, 51(2):263-284.

Dewangan, P., G. Sriram, T. Ramprasad, M. V. Ramana & P. Jaiswal. 2011. Fault system and thermal regime in the vicinity of site NGHP-01-10, KrishnaeGodavari basin, Bay of Bengal, *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1899- 1914.

Dirección General de Aguas. 2004. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Bueno. CADE-IDEPE Consultores Ingeniería, Santiago, 147 pp.

DIRECTEMAR-Armada de Chile. 2014. Análisis Estadístico de Emergencias Marítimas. Edición 2014.[<http://web.directemar.cl/estadisticas/siniestros/2014/2014.htm>]. Revisado: 11/11/2015.

Dove, D., L. Polyak & B. Coaldey. 2014. Widespread, multi-source glacial erosion on the Chukchi margin, Arctic Ocean, *Quaternary Science Research*, 92: 112- 122.

Dowdeswell, J., K. Hogan, C. Cofaigh, E.M. Fugelli, J. Evans & R.Noormets. 2008. A major trough-mouth fan on the continental margin of the Bellingshausen Sea, West Antarctica: The Belgica Fan. *Marine Geology*, 92: 292- 309.

EdgeTech. 2015. Products Sub Bottom Profiling. [[www.edgetech.com](http://www.edgetech.com)]. Revisado: 14/09/2015.

ESTEIO.2015. Servicios ofrecidos SBP. [[www.esteio.com.br](http://www.esteio.com.br)]. Revisado: 14/02/2015.

Evans, J., J. Dowdeswell, C. Cofaigh, T. Bingham & J. Andersson. 2006. Extent and dynamics of the West Antarctic Ice Sheet on the outercontinental shelf of Pine Island Bay during the last glaciations. *Marine Geology*, 230: 53-72.

Evans, J., C. Cofaigh, J. Dowdeswell & P. Wadhams. 2009. Marine geophysical evidence for former expansion and flow of the Greenland Ice Sheet across the north-east Greenland continental shelf. *Journal of Quaternary Science*, 24: 273-293.

Falmouth Scientific. 2015. Systems Sub Bottom. [[www.falmouth.com](http://www.falmouth.com)]. Revisado: 17/07/2015.

Fanetti, D., F. Anselmeti, E. Chapron, M. Sturm & L. Vezzoli. 2008. Megaturbidite deposits in the Holocene basin fill of Lake Como (Southern Alps, Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259:323- 340.

Ferland, M., P. Del Giorgio, C. Teodoru & Y. Prairie. 2012. Long-term C accumulation and total C stocks in boreal lakes in northern Québec. *Global Biogeochemical Cycles*, 26: 1-10.

Francois, R. E. & G. R. Garrison. 1982a. Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72: 896-907.

Detection Geophysics Forum. 2013. Sub bottom profiler. [<http://forum.detection.com/viewtopic.php?t=212>]. Revisado: 11/11/2015.

Francois, R. E. & G. R. Garrison. 1982b. Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72: 1876-1890.

Frontier Geosciences, 2015. Overwater Acoustic Sub Bottom Profiling. [[www.frontiergeo.com](http://www.frontiergeo.com)]. Revisado: 11/11/2015.

Gales, J., P.T. Leat, R.D. Larter, G. Kuhn, C.-D. Hillenbrand, A.G. C. Graham, N.C. Mitchell, A.J. Tate, G.B. Buys & W. Jokat. 2014. Large-scale submarine landslides, channel and gully systems on the southern Weddell Sea margin, Antarctica. *Marine Geology*, 348: 73-87.

General Acoustics. 2015. Productsindex SBP. [[www.generalacoustics.com](http://www.generalacoustics.com)]. Revisado: 14/09/2015.

General Acoustics. 2015. SUBPRO 1210 - Sub-Bottom Profiler. [[http://track.websiteceo.com/r/185108/www.generalacoustics.com/downloads/SUBPRO\\_1210\\_small.pdf](http://track.websiteceo.com/r/185108/www.generalacoustics.com/downloads/SUBPRO_1210_small.pdf)]. Revisado: 26/02/2016.

IOC, SCOR & IAPSO. 2010. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp.

Hao, Y., K. McInstoh & M. Magnani. 2015. Long-lived deformation in the southern Mississippi Embayment revealed by high-resolution seismic reflection and sub-bottom profiler data, *Tectonics*, DOI:10.1002/2014TC003750.

Hayashi, E., H. Kimura, C. Tam, J. Ferguson, J. Laframboise, G. Miller, C. Kaminski & A. Johnson. 2013. Customizing an autonomous underwater vehicle and developing a launch and recovery system. *Marine Geology*, 92: 25-37.

Heron, C. S. L. 2003. Shippagan Bay Survey 2003: 3.5kHz Subbottom Profiles. [[http://www.omg.unb.ca/Projects/Shippagan/Shippagan\\_Subbottom\\_Profile\\_Index.html](http://www.omg.unb.ca/Projects/Shippagan/Shippagan_Subbottom_Profile_Index.html)]. Revisado: 26/02/2016.

Historia y Arqueología Marina. 2010. [<http://historiayarqueologiamaritima.es/articulo/el-perfilador-de-fondo-maritimo>]. Revisado: 15/08/2014.

Hsu, S., S. Y. Wang, Y. C. Liao, T. Yang, S. J., Ji. Y. Lin & S. C. Chen. 2013. Tide-modulated gas emissions and tremors off SW Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters*, 369–370: 98–107.

Hydro International. 2006. Sub-bottom profiling equipment. *Hydro International*, 10 (3): 26-33.

Iacono, C., E. Gracia, C. Ranero, M. Emelianov, V. Huvenne, R. Bartolome, G. Booth-Rea & J. Predes. 2014. The West Melilla cold water coral mounds, Eastern Alboran Sea: Morphological characterization and environmental context. *Deep- Sea Research II*, 99: 316-326.

IHO. 2013. Determinación de la Profundidad. [[http://www.iho.int/iho\\_pubs/CB/C-13/spanish/C-13\\_Capitulo\\_3.pdf](http://www.iho.int/iho_pubs/CB/C-13/spanish/C-13_Capitulo_3.pdf)]. Revisado: 20/08/2015.

INNOMAR. 2006. Operating SES-2000 Sub-bottom Profilers on Small Boats. [<http://geodat.com.my/pdf/SES2000-smal-boats.pdf>]. Revisado: 15/12/2015.

InnomarTechnologie GmbH. 2009. Parametric Technology for High Resolution Sub Bottom Profiling, Offshore Technology International, pp. 83-84.

Innomar Technologie GmbH. 2015. SES 2000 Compact Sub Bottom Profiler. [<http://www.innomar.com/ses2000compact.php>]. Revisado: 14/02/2015.

iXBlue. 2015. Sub bottom profilers and very low frequency transducers. [[www.ixblue.com](http://www.ixblue.com)]. Revisado: 26/08/2015.

Jakobsson, M., J. Gardner, P. Vogt, L. Mayer, A. Armstrong, J. Backman, R. Brennan, B. Calder, J. Hall, B. Kraft. 2005. Multibeam Borderland, Arctic Ocean bathymetric and sediment profiler evidence for ice grounding on the Chukchi. *Quaternary Research*, 63: 150-160.

Jiménez, P. 2011. "OPTIMIZACIÓN EN LA SECUENCIA DE PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS MARINOS". INFORME DE SUFICIENCIA LICENCIATURA EN INGENIERIA FISICA. Universidad de Lima, Peru., 55 pp.

Klages, J.P., G. Kuhn, C.-D. Hillenbrand, A.G.C. Graham, J.A. Smith, R.D. Larter, K. Gohl. 2013. First geomorphological record and glacial history of an inter-ice stream ridge on the West Antarctic continental shelf. *Quaternary Science Reviews*, 61: 47- 61.

Knudsen Engineering. 2015. Sub Bottom Profiler. [[www.knudsenengineering.com](http://www.knudsenengineering.com)]. Revisado: 01/09/2015.

Kongsberg Maritime. 2015. Sub Bottom Profilers. [<http://www.km.kongsberg.com/>]. Revisado: 21/04/2015.

Larter, R., A.G. Graham, C.-D. Hillenbrand, J.A. Smith & J. Gales. 2012. Late Quaternary grounded ice extent in the Filchner Trough, Weddell Sea, Antarctica: new marine geophysical evidence. *Quaternary Science Reviews*, 53: 111-122.

Liu, B.R., H. B. Song & Y.X. Guan. 2015. Characteristics and formation mechanism of cold seeps system in the northeastern continental slope of South China Sea from sub-bottom Profiler data. *Chinese Journal of Geophysics*, 58: 1-10.

LoIacono, C., E. Gràcia, C.R. Ranero, M.Emelianov, V. Huvenne, R. Bartolomé, G. Booth-Rea, J. Prades. 2014. The West Melilla cold water coral mounds, Eastern Alboran Sea: Morphological characterization and environmental context. *Deep-Sea Research II*, 99: 316–326.

Lurton.2010. An introduction to underwater acoustics. Principles and applications. Second edition. Springer, New York. 680 pp.

Madricardo, F., S. Buogo, P. Calicchia, G. B. Cannelli, S. Donnic & A. Lezziero. 2006. Acoustical prospecting in extremely shallow water in the Venice lagoon: first results and comparisons. En: S. M. Jesus, S. M. & O. C. Rodríguez (eds.). *Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics*, 8th ECUA. Carvoeiro, Portugal, 12-15 June, 2006. 6pp.

Marinebio.2015. The deep sea. [<http://marinebio.org/oceans/deep/>]. Revisado: 01-02-2016.

Martínez, S., E. Gracia, R. Bartolome & V. Sallares. 2013. Active deformation in old oceanic lithosphere and significance for earthquake hazard: Seismic imaging of the Coral Patch Ridge area and neighboring abyssal plains (SW Iberian Margin), *Geochemistry-Geophysics-Geosystems-G<sup>3</sup>*, 14: 7-14.

Marsset, T., B. Marsset, S. Ker, Y. Thomas & Y. Le Gall. 2010. High and very high resolution deep-towed seismic system: Performance and examples from deep water Geohazard studies. *Deep- Sea Research*, 57: 628-637.

Mazieres, A., H. Gillet, D. Idier, T. Mulder, T. Gartan, C. Mallet, V. Marieu & V. Hanquiez. 2015. Dynamics of inner-shelf, multi-scale bedforms off the south Aquitaine coast over three decades (Southeast Bay of Biscay, France). *Continental Shelf Research*, 92: 23- 36.

Mattei, G & F. Giordano. 2015. Integrated geophysical research of Bourbonic shipwrecks sunk in the Gulf of Naples in 1799. *Journal of Archaeological Science, Reports*, 1: 64–72.

Medwin, H. & C. Clay. 1998. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, 739 pp.

Meridata. 2015. SBP. [[www.meridata.fi](http://www.meridata.fi)]. Revisado: 29/07/2015.

Millero, F., C. Chen-Tung, A. Bradshaw & K. Schleicher. 1980. A new high pressure equation of state for seawater. *Deep Sea Research*, 27 (3): 255-264.

Neto, A. 2001. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografiana exploração mineral submarina. *Brazilian Journal of Geophysics*, 18(3), 4-16.

Noormets, R., J. Dowdeswell, R.D. Larter, C. Cofaigh & J. Evans. 2009. Morphology of the upper continental slope in the Bellingshausen and Amundsen Seas – Implications for sedimentary processes at the shelf edge of West Antarctica. *Marine Geology*, 258: 100-114.

Ocean Engineering. 2015. Stratum exploration. [www.ocean-eng.com]. Revisado: 01/09/2015.

Ramana, M.V., T. Ramprasad, A. Paropkari, D.V. Barole, B. Ramalingwesgara Rao, S.M. Karisiddaiah, M. Desa, M. Kocherla, H.M. Joao, L. Lokahbarati, M. Gonsalves, J.N. Pattan, N.H. Khadge, J.N. Pattan, N.H. Khadge, C. Prakash, Babu, A.V. Sathe, P. Kumar & A.-K. Sethi. 2009. Multidisciplinary investigations exploring indicators of gas hydrate occurrence in the Krishna–Godavari Basin offshore, east coast of India. *Geol.Mar*, 29: 25-38.

Rivera, N., F. Encina, A. Muñoz-Pedrerros & P. Mejias. 2004. La Calidad de las Aguas en los Ríos Cautín e Imperial, IX Región-Chile. *Water Quality in the Cautín and Imperial Rivers, IX Region-Chile. Información Tecnológica*, 15: 89-101.

Rodrigo, C. 2013. Métodos de muestreo e investigación en geología marina. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Chile. 6 pp.

Saint-Ange, F., P. Kuus, S. Blasco, D.J.W. Piper, J. Hughes Clarke, K. MacKillop. 2014. Multiple failure styles related to shallow gas and fluid venting, upper slope Canadian Beaufort Sea, Northern Canada. *Marine Geology*, 355: 136–149

Schrottke, K., M. Becker, A. Bartholomä, B.W. Flemming & D. Hebbeln. 2006. Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler. *Geo-Mar Lett*, 26: 185–198.

Skyring Marine. 2014. Geofísica Marina. [http://www.skyringmarine.cl/index\_archivos/page0004.htm]. Revisado: 25/08/2014.

Summerhayes, C.& S. Thorpe. 1996. Oceanography. An illustrated guide. Wiley, New York, 352 pp.

Syqwest Inc, 2015. Sub bottom profiling. [[www.syqwest.com](http://www.syqwest.com)]. Revisado el 3 de Agosto 2015.

Teledyne Gavia. 2015. Products Payloads Options Sub Bottom Profiling Module.[<http://teledynegavia.com>]. Revisado: 10/06/2015.

Telford, W., L. Geldart&R.Sheriff.1990.Applied Geophysics.Second Edition. Cambridge University Press, 770 pp.

TEOS-10 Manual. 2015. Calculation and use of the thermodynamic properties of seawater. UNESCO, pp. 4-20.

Theuillon, G., S. Stephan & A. Pacault. 2008. High-Resolution geoacoustic characterization of the seafloor using a subbottom profiler in the Gulf of Lion.IEEE Journal of Oceanic Engineering, 33(3): 240-254.

Thorp, W. H. 1967. Analytic description of the low frequency attenuation coefficient. Journal of the Acoustical Society of America, 42: 270

Tritech. 2015.Products of Parametric Sub Bottom Profiling seaking SBP.[[www.tritech.co.uk](http://www.tritech.co.uk)]. Revisado: 10/05/2015.

Westerwelt, P. J. 1963. Parametric acoustic array.J. Acoust. Soc. Am., 35(4): 535-537.

Williamson & Associates. 2016.Subbottom Profiling.[<http://www.wassoc.com/geophysical-services/data-display/subbottom-profiling>]. Revisado: 26/02/2016.

Wunderlich, J.& S.Müller. 2003. High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics. [[http://www.gserentals.co.uk/gse/pdf/2003\\_oceansystems.pdf](http://www.gserentals.co.uk/gse/pdf/2003_oceansystems.pdf)]. Revisado: 10/12/2015.

Wunderlich, J., S. Müller, S. Erdmann, P. Hümbes, T. Buch & R. Endler. 2005. High-resolution acoustical site exploration in very shallow water – a case study. Proceedings of EAGE Near Surface 2005 — Palermo, Italy, 5 - 8 September 2005.

## ANEXOS



