

**CLASIFICACIÓN DE LOS FONDOS DEL GOLFO DE URABÁ
EMPLEANDO MÉTODOS ACÚSTICOS**

JUAN FELIPE PASCHKE CASTAÑO

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FÍSICA
MEDELLÍN**

2010

**CLASIFICACIÓN DE LOS FONDOS DEL GOLFO DE URABÁ
EMPLEANDO MÉTODOS ACÚSTICOS**

JUAN FELIPE PASCHKE CASTAÑO

Tesis de grado para optar al Título de Ingeniero Físico

Asesor

JESUS ALBERTO PÉREZ

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FÍSICA

MEDELLÍN

2010

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, Noviembre del 2010

*A mis Padres German y Beatriz
y a mi
novia Mayra Alejandra*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme estar acá culminando una de las etapas más importantes de mi vida, a mis padres German y Beatriz junto con mis tres hermanas Silvia, Nadia y Estefania por recibir tanto amor y apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi carrera.

Agradezco inmensamente al director del área ciencias del mar de la Universidad EAFIT Iván Darío Correa por permitirme entrar y participar del proyecto del Golfo de Urabá ya que sin el apoyo de esta gran persona sería imposible realizar la tesis de grado. Dentro del área de las ciencias del mar doy mil gracias a mi asesor Jesús Alberto Pérez “Chucho” por dejarme entrar al mundo de la investigación marina y por enseñarme tantas cosas de sus experiencias dejadas en el campo de la prospección geofísica. Así mismo doy las gracias a mi compañera Johanna Prussmann por su apoyo en el punto de vista geológico para realizar satisfactoriamente ésta tesis de grado. Y a los demás miembros del área de ciencias del mar les agradezco por colaborarme en aportar sus conocimientos y experiencias que ayudaron a un buen desarrollo del proyecto.

A mi compañero de trabajo e Ingeniero Matemático Oscar Londoño “el ojon”, por colaborarme en el área de las redes neuronales y en el análisis estadístico con el fin de obtener un buen sistema de clasificación.

Agradezco a Milton Marín, del Laboratorio de Hidráulica EAFIT por su colaboración en el mantenimiento de los equipos y la instalación de éstos en el laboratorio.

Agradezco al personal del servicio Celsius de la biblioteca Luis Echavarría Villegas de la Universidad EAFIT por ayudarme a gestionar la descarga de los artículos necesarios de geofísica marina para llevar a cabo un buen proyecto de investigación.

Doy gracias a la profesora Isabel Restrepo por enseñarme en las primeras etapas de mi tesis a entender y a interpretar la ecosonda en el ámbito geológico y geofísico.

A mi novia Mayra Alejandra por su apoyo incondicional en el transcurso de la última etapa de mi tesis y además por todo el amor que me brindó como también por compartir sus sueños conmigo. Espero estar contigo por el resto de mi vida. Te amo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	17
1 INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES	19
1.1 Introducción.	19
1.2 Objetivos	20
1.3 Localización del área de estudio.	20
1.4 Aspectos históricos (antecedentes).	22
1.5 Aspectos físicos y de manejo de detectores acústicos de la profundidad.	27
1.5.1 Principios de sensores acústicos.....	28
1.5.1.1 Las ondas acústicas marinas y características físicas.....	28
1.5.1.1.1 Campo acústico	29
1.5.1.1.2 Ecuación del sonar	30
1.5.1.1.3 Temperatura	32
1.5.1.1.4 Salinidad.....	33
1.5.1.1.5 Presión.....	33
1.5.1.1.6 Densidad.....	34
1.5.1.2 Propagación del sonido en el agua de mar	34
1.5.1.2.1 Atenuación	34
1.5.1.2.2 Refracción y Reflexión	35
1.5.1.3 Parámetros acústicos	37
1.5.1.3.1 Frecuencia	37
1.5.1.3.2 Ancho de banda.....	37
1.5.1.3.3 Longitud de pulso.....	39
1.5.2 Transductores	39
1.5.2.1 Clasificaciones en relación con la operación	40
1.5.2.1.1 Magnetostrictivo	40
1.5.2.1.2 Piezoeléctrico	41
1.5.2.1.3 Electrostrictivo	41
1.5.2.2 Ancho del haz.....	41
1.5.2.3 Clasificaciones en relación con el tipo de haz	43

1.5.2.3.1 Haz único	43
1.5.2.3.2 Multihaz	44
1.5.2.4 Clasificación según su instalación	45
1.5.2.4.1 Fijo en la quilla.....	45
1.5.2.4.2 Remolcado.....	45
1.5.2.4.3 Portátil.....	45
1.5.2.5 Cobertura.....	46
1.5.3 Sistemas acústicos.....	46
1.5.3.1 Ecosondas de haz único	47
1.5.3.1.1 Principios de operación.....	47
1.5.3.1.2 Instalación y Calibración.....	51
1.6 Para qué y cómo emplear una ecosonda para clasificar lechos marinos.....	53
1.6.1 Redes neuronales.....	59
1.7 ¿Qué se emplea actualmente para clasificar fondos marinos?	60
2 MARCO TEÓRICO.....	62
2.1 Dimensión fractal.....	62
2.2 Momento espectral.....	64
2.3 Momento estadístico en el dominio del tiempo.....	65
3 METODOLOGÍA.....	67
3.1 Trabajo de laboratorio.....	69
3.2 Trabajo de campo.....	71
3.3 Ecosonda.....	73
3.3.1 Software	74
3.3.1.1 Procesamiento y filtrado de los ecogramas.....	75
3.3.1.2 Modelo Físico	79
3.3.1.2.1 La primera intensidad del eco (backscattered) en series de tiempo .	81
3.3.1.2.2 La segunda intensidad del eco (I_{bs2}).....	86
3.3.1.2.3 Definición de las integrales E_1 y E_2	90
3.3.2 Hardware.....	92
3.3.2.1 Señal de voltaje	94

3.4 Sistema de clasificación de lechos marinos.	95
3.4.1 Método estadístico.	95
3.4.2 Red neuronal (LVQ2)	98
3.4.2.1 Arquitectura	99
3.4.2.2 Algoritmo de entrenamiento	100
3.4.2.3 Variantes de LVQ	101
3.5 Reporte final.....	102
4 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	103
4.1 Análisis y resultados del Hardware.....	103
4.1.1 La grava.....	104
4.1.1.1 Los Pebbles	104
4.1.1.2 Los Cobbles.....	105
4.1.2 El concreto	106
4.1.3 La platina de acero	106
4.1.4 Parámetros de control del Software	107
4.1.5 Amplitud de voltaje del primer y segundo eco para las gravas, concreto y platina de acero	108
4.1.6 Análisis de la señal del primer eco (rugosidad)	112
4.1.7 Análisis de la señal del segundo eco (dureza).....	118
4.2 Análisis y resultados del Software	126
4.2.1 Análisis del resultado de la gráfica de rugosidad versus dureza de los sedimentos del golfo de Urabá.....	127
4.2.2 Análisis del resultado de los datos mapeados en el golfo	128
4.2.3 Análisis de los resultados del eco-strength versus presión, intensidad, coeficiente de reflexión, profundidad y tiempo.....	131
4.2.3.1 Eco-strength vs profundidad	131
4.2.3.2 Eco-Strength vs Tiempo.....	133
4.2.3.3 Presión vs Eco-Strength	134
4.2.3.4 Intensidad vs Eco-Strength	134
4.2.3.5 Coeficiente de Reflexión vs Eco-Strength.....	135
4.2.4 Análisis y resultados del Laboratorio.....	136

Conclusiones	138
Recomendaciones.....	142
Trabajos futuros	144
Bibliografía	145

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los diferentes tamaños de grano de sedimento con la escala logarítmica expresado como valor phi. Heald (2000).....	83
Tabla 2. Resultados del eco strength del primer eco para los cuatros materiales examinados en el laboratorio	139
Tabla 3. Resultados del eco strength del segundo eco para los cuatros materiales examinados en el laboratorio	140
Tabla 4. Valores de las variables geofísicas y además de E_1 y E_2 para el limo	164
Tabla 5. Valores de las variables geofísicas y además de E_1 y E_2 para las arenas gruesas y fondos rocosos.....	165
Tabla 6. Valores de las variables geofísicas y además de E_1 y E_2 para los lodos y arenas finas	166

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Golfo de Urabá (Thomas et. al, 2007).....	21
Figura 2. Coeficiente de absorción. OHI (2005).....	35
Figura 3. Principio de la refracción. Antoine (2005).....	36
Figura 4. Ancho de banda del transductor. Antoine (2005).....	38
Figura 5. Resolución como una función de la longitud del pulso. OHI (2005).....	39
Figura 6. Ancho del haz definido por el ángulo a un nivel de -3 dB. Antoine (2005)..	42
Figura 7. Ilustración de la medición de la profundidad usando un haz único angosto y uno ancho. Antoine (2005).....	44
Figura 8. Cobertura del haz simple. Antoine (2005).....	46
Figura 9. Escalas de grabación. Antoine (2005).....	49
Figura 10. Ilustración de la barra de chequeo. (OHI, 2005).....	52
Figura 11. Parámetros de entrada en el momento de procesar una información batimétrica con el propósito de emplearla para clasificar lechos marinos.....	56
Figura 12. Código ASCII mediante el cual el usuario analiza su procesamiento batimétrico. Software Post-Survey.....	57
Figura 13. Ecograma de alta frecuencia con sus respectivos puntos seleccionados. Software Post-Survey.....	58
Figura 14. Según RoxAnn se puede clasificar el lecho marino siempre y cuando se conozcan las características de la magnitud de E_1 y E_2 . Software Post-Survey.....	58
Figura 15. Modelo de una red neuronal. Martín y Sanz (2001).....	60
Figura 16. Ilustración de una etapa de la dimensión de la caja calculada para una gráfica de una variable de la función en un plano. En este caso el número de cajas para $\Delta s = 0.1$ fue calculado y $N(\Delta s) = 54$. Tegowski y Lubniewski (2000).....	64
Figura 17. Tanque donde se sumergió el transductor de 200 y 28 kHz.....	70
Figura 18. Ecograma que muestra ecos falsos y profundidad real del tanque a altas frecuencias.....	70
Figura 19. Materiales utilizados en los ensayos de laboratorio teniendo en cuenta el área de cobertura del haz acústico.....	71
Figura 20. Lancha en la que se instaló la ecosonda y el GPS.....	71
Figura 21. Partes de una lancha oceanográfica. OHI (2005).....	72

Figura 22. Transductor sumergido a una determinada profundidad del casco de la lancha para evitar falsos ecos y mala señal.	72
Figura 23. Ilustración de la ecosonda 320 B/P de KNUDSEN con su respectivo portátil.	74
Figura 24. Ecograma de alta frecuencia con su respectivo perfil batimétrico del fondo y la simulación de los registros de cada eco mostrando la variación de la profundidad y eco strength	75
Figura 25. Ecograma mostrando las regiones donde se tuvo ruido y una buena resolución del perfil.....	76
Figura 26. Ecograma mostrando los puntos de mayor interés para determinar la clase de sedimento	77
Figura 27. Formato en código ASCII donde se muestran varios parámetros que se analizaron en la batimetría.	78
Figura 28. Formato .KEA donde muestra las variables más importantes de la batimetría con los respectivos datos.....	78
Figura 29. E_1 indica rugosidad, E_2 relativo a la dureza (impedancia acústica). Schlagintweit (1993).....	79
Figura 30. Representación real del primer eco y segundo eco para discriminar el lecho marino. Software Post-Survey.	79
Figura 31. Geometría para el primer eco. Θ_0 : ángulo de incidencia de la fuente; θ_1 : ángulo medio que permite calcular un diferencial para toda el área de cobertura (Heald y Pace, 1996).....	80
Figura 32. Trayectoria de la señal acústica para mostrar una segunda radiación sobre el fondo marino (línea sólida) y la trayectoria de la señal cuando retorna al receptor (línea punteada). Heald (2001).....	87
Figura 33. Geometría que explica la trayectoria para encontrar el segundo eco (dureza) mostrando que la posición efectiva de la fuente está situada a una distancia que es el triple de la profundidad del agua con respecto al receptor. Heald (2001); Pace y Heald (1996).	88
Figura 34. Ecosonda KNUDSEN 320 B/P con su respectivo hardware que permite hacer levantamiento batimétrico.....	92

Figura 35. Transductor de dos canales con frecuencias de 28 y 200 kHz. Manual de KNUDSEN (2009).....	93
Figura 36. Ecosonda digital, diagrama de bloques donde muestra las etapas del funcionamiento del equipo. Antoine (2005)	93
Figura 37. Osciloscopio digital para analizar la amplitud del voltaje dado por diferentes tipos de materiales evaluados en el laboratorio.....	94
Figura 38. Red neuronal LVQ. Sivanandam (2006).	99
Figura 39. Tamaño de grano del pebble (guijarro con 31 mm de diámetro)	104
Figura 40. Tamaño de grano del cobble (guijarro de 100 mm de diámetro)	105
Figura 41. Platina de acero oxidable	106
Figura 42. Señal de pico del voltaje del primer y segundo eco en el osciloscopio, señal cuantificada del primer y segundo eco en el software Eco-Control del pebble, cobble, concreto y platina de acero.....	111
Figura 43. Variación de la señal (%) registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero.	113
Figura 44. Variación de la Ganancia del pulso acústico registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero.....	115
Figura 45. Variación del Eco-Sternngth registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero.	117
Figura 46. Variación de la señal (%) registrada en el software versus el voltaje (V) de la amplitud del pico del segundo eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero.....	119
Figura 47. Variación de la Ganancia del pulso acústico registrado en el software vs el voltaje de pico del segundo eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero.....	122
Figura 48. Variación del Eco-Sternngth registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero	125

Figura 49. Caracterización de los cinco grupos de sedimentos encontrados por el método de red neuronal Learning Vector Quantization (LVQ2), E_1 vs E_2 , donde E_1 es rugosidad y E_2 dureza. En esta figura se puede identificar la rugosidad y la dureza gracias a la onda acústica ultrasónica que se reflejó y de acuerdo con la señal de voltaje registrada en la ecosonda se pudo calcular sus características físicas. Los rectángulos son los definidos por el sistema RoxAnn (OHI, 2005).....	128
Figura 50. Tipos de fondo del Golfo de Urabá (líneas batimétricas).....	129
Figura 51. Tipos de fondos del Golfo de Urabá (aplicando método de interpolación). 130	
Figura 52. Clasificación del fondo marino del Golfo de Urabá mediante la variación de la profundidad (m) vs eco strength (dB)	132
Figura 53. Clasificación del fondo marino del Golfo de Urabá mediante la variación del tiempo (s) vs eco strength (dB)	133
Figura 54. Análisis de la variación de la presión acústica reflectora versus el eco strength (dB)	134
Figura 55. Análisis de la variación de la intensidad acústica reflectora versus el eco strength (dB)	135
Figura 56. Análisis de la variación del coeficiente de reflexión acústica versus el eco strength (dB)	135
Figura 57. Gráfica de E_1 vs E_2 obtenidos para diferentes materiales en el laboratorio... ..	137
Figura 58. Primer perfil batimétrico trabajado a una frecuencia de 200 kHz.....	150
Figura 59. Primer perfil del subsuelo marino trabajado a una frecuencia de 12 kHz... 150	
Figura 60. Segundo perfil batimétrico trabajado a una frecuencia de 200 kHz.....	151
Figura 61. Segundo perfil del subsuelo marino trabajado a una frecuencia de 12 kHz 152	
Figura 62. Tercer perfil batimétrico trabajado a una frecuencia de 200 kHz	152
Figura 63. Tercer perfil del subsuelo marino trabajado a una frecuencia de 12 kHz ..153	
Figura 64. Localización geográfica de los dos registros de cobertura sedimentaria de limos sacados de la tabla 12 a escala 1:50000 (foto sacada de Google Earth)	167
Figura 65. Localización geográfica de los dos registros de cobertura sedimentaria de arena gruesa y fondo rocoso sacados de la tabla 13 a escala 1:1000 (foto tomada de Google Earth).....	167

Figura 66. Localización geográfica de los dos registros de cobertura sedimentaria de arena fina y lodo sacados de la tabla 14 a escala 1:10000 (foto tomada de Google Earth)
..... 168

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.....	149
ECOGRAMAS DE 12 Y DE 200 kHz DEL GOLFO DE URABÁ.....	149
ANEXO B.....	154
B.1 SEGUNDA INTENSIDAD DEL ECO.....	154
B.2 INTEGRAR I_{BS2} PARA OBTENER E_2	155
ANEXO C.....	163
BASE DE DATOS DE LAS VARIABLES GEOFÍSICAS.....	163

RESUMEN

La clasificación de fondos es un método geofísico que permite discriminar los tipos de lechos (sedimentarios o rocosos) de los fondos de cuerpos de agua con base en información obtenida con un emisor-receptor de ondas mecánicas (ecosonda). A partir de las características físicas (Frecuencia de emisión, Longitud del pulso, Ganancia, Potencia de emisión) y del tiempo entre emisión-recepción de pulsos individuales, las ecosondas permiten calcular, entre otros parámetros, las profundidades de los fondos y el Eco-Strenght, intensidad de los ecos reflejados. Los valores de este último parámetro son función de la naturaleza física de los fondos, particularmente de sus rugosidades y durezas. En este trabajo se ilustra un sistema de clasificación de fondos realizado con base en la información de 105 perfiles batimétricos del Golfo de Urabá, obtenidos con una ecosonda Knudsen 320 B/P emitiendo a una frecuencia de 200 kHz. A partir de sus valores E_1 y E_2 (Rugosidad del fondo vs. Dureza del fondo, respectivamente) se diferenciaron en los fondos del Golfo los siguientes cinco tipos de lechos marinos, denominados según la nomenclatura del sistema de clasificación RoxAnn: 1) fondos con cobertura sedimentaria de lodos; 2) fondos con cobertura sedimentaria de limos; 3) fondos con cobertura sedimentaria de arenas finas; 4) fondos con cobertura sedimentaria de arenas gruesas y, 5) fondos rocosos y/o con cobertura sedimentaria de gravas.

Para determinar en el laboratorio si la ecosonda discrimina la naturaleza de los materiales del fondo en función de los índices de dureza y rugosidad, se experimentó con cuatro tipos de materiales, correspondientes a dos tipos de gravas, concreto y platina de acero al carbono. Los resultados muestran que los materiales menos rugosos y duros (como las gravas) inducen mayor dispersión de las ondas acústicas ultrasónicas.

Palabras claves: Golfo de Urabá, Ecosonda, Frecuencias de señales acústicas, Rugosidad, Dureza, Red neuronal, Eco-Strength, Ganancia, Voltaje, Intensidad acústica.

1 INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

La clasificación de lechos marinos es un método geofísico que se ocupa de identificar los tipos de sedimentos que cubren los fondos de los cuerpos de agua, incluyendo océanos, lagos, ríos y represas, entre otros. Uno de los métodos utiliza una ecosonda que emite ondas mecánicas que se reflejan en los fondos y trae información sobre la profundidad de la columna de agua y el Echo-Strength, parámetro que mide la energía reflejada. Las ecosondas pueden transmitir en frecuencias diferentes, entre ellas las de 200 kHz (altas frecuencias) y 12 kHz (bajas frecuencias), ésta última con información sobre las características del subfondo.

Este trabajo ilustra un sistema de clasificación de lechos marinos basado en el análisis e interpretación de 105 perfiles batimétricos del Golfo de Urabá, obtenidos con una ecosonda Knudsen 320 B/P emitiendo a una frecuencia de 200 y de 12 kHz. Los perfiles fueron adquiridos digitalmente durante el año 2009, en tres salidas de campo del proyecto: “Erosión costera en el Golfo de Urabá”, realizadas la primera, entre finales de agosto y principios de septiembre, la segunda entre el 17 y 20 de septiembre y la tercera entre el 8 y el 11 de noviembre. El proyecto fue cofinanciado por COLCIENCIAS y las Universidades EAFIT, de Antioquia y Nacional, y contó con el apoyo de la Armada nacional en la Base naval de Turbo-Antioquia.

Para el análisis de la información batimétrica se emplearon herramientas computacionales como los “software” Eco-control, Post Survey, Excel, MATLAB y ARCGIS y se utilizaron, para la georeferenciación de la información, el sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS con tecnología Star Fire) y el software HYPACK, Con estos equipos se asignaron las coordenadas geodésicas (Latitud y Longitud) de los datos adquiridos por la Ecosonda 320 B/P.

Es importante resaltar que el proyecto en referencia adquirió aproximadamente 1000 km. de información batimétrica.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Clasificar la cobertura sedimentaria (o rocosa) de los fondos del Golfo de Urabá, empleando métodos acústicos

Objetivos específicos

- Validar un modelo físico con el fin de clasificar, en función de los parámetros relativos a la rugosidad y a la dureza, los tipos de sedimentos superficiales de los fondos del Golfo de Urabá.
- Clasificar los datos, empleando el método de red neuronal y análisis estadístico.
- Determinar, en condiciones de laboratorio, las respuestas de tres materiales diferentes: gravas, platina de acero, concreto.

1.3 Localización del área de estudio

El Golfo de Urabá se localiza en el extremo noroccidental del país y constituye el punto de unión entre Centro y Sudamérica (figura 1). Se extiende desde la punta Arenas del Norte, en la costa oriental, hasta el cabo Tiburón, en la occidental. Con una longitud total de 70 km, su mayor anchura (39 km) la presenta entre las puntas Triganá y Urabá, y la menor (9 km) entre las puntas Las Vacas y La Boca Urabá.

Esta ubicada entre las longitudes $77^{\circ} 07' 09.72''$ O y $76^{\circ} 49' 47.01''$ O y las latitudes $8^{\circ} 43' 04.46''$ N y $7^{\circ} 54' 52.80''$ N. Dentro de esta zona, se encuentran los perfiles batimétricos capturados por el sistema: Ecosonda, GPS, HYPACK.

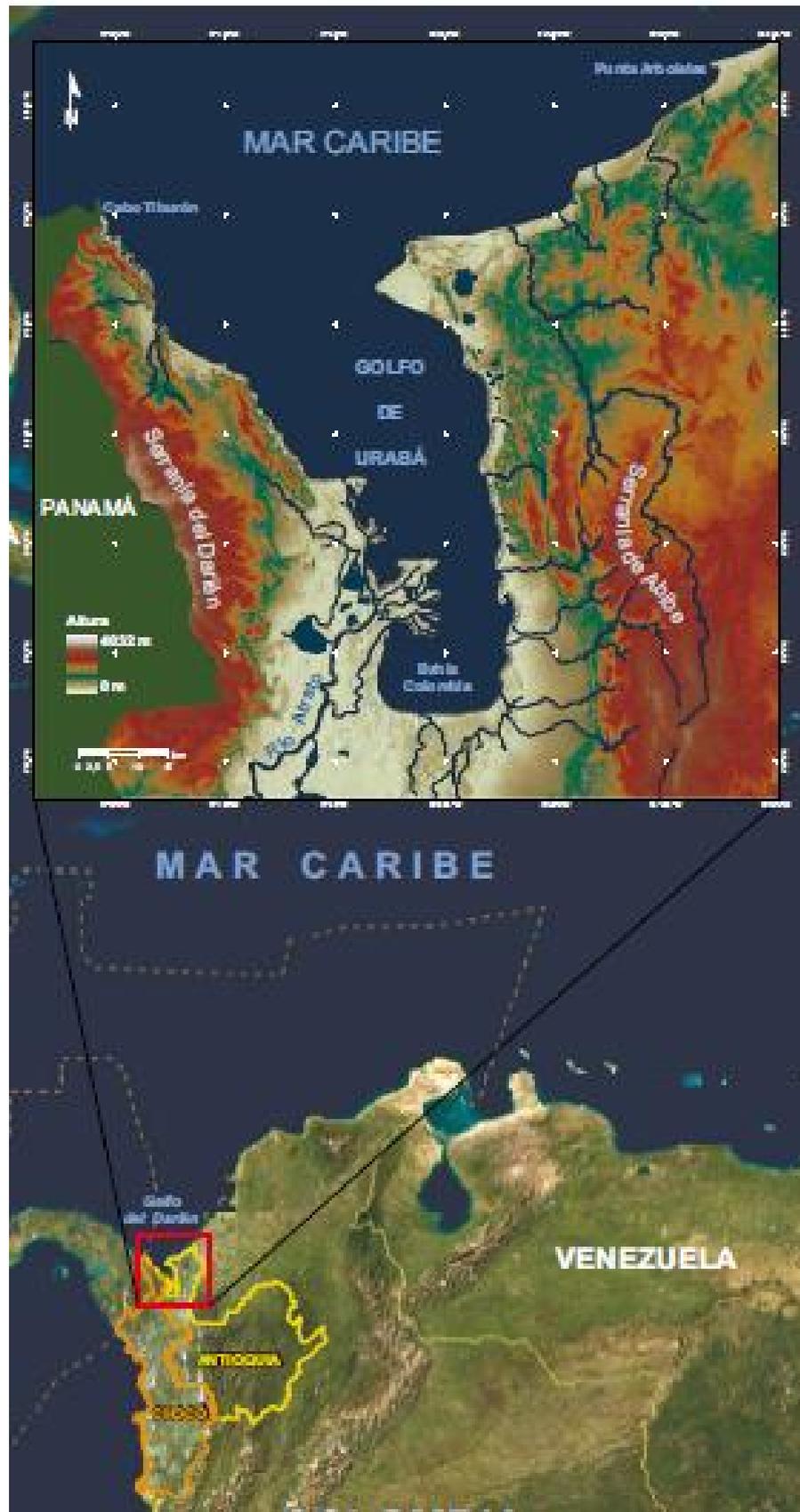


Figura 1. Mapa del Golfo de Urabá (Thomas et. al, 2007).

1.4 Aspectos históricos (antecedentes)

La Geofísica y la Geología marina son ciencias que estudian la evolución de las cuencas oceánicas. Para este tipo de estudios es importante conocer los fondos marinos, lo cual requiere del diseño de metodologías y equipos muy especializados, incluyendo los de muestreo de los sedimentos del fondo marino. (Cifuentes et. al, 1997; Erickson, 1992).

En relación con la clasificación y exploración de los fondos y subfondos marinos es interesante tener en cuenta los siguientes antecedentes:

- Las primeras muestras del fondo marino fueron recolectadas alrededor de 2000 años A.C por los bateleros o remeros egipcios del delta del Nilo. Estos primeros investigadores exploraban las orillas de la costa sondeando con varas largas que recogían lodo en su punta, primeras muestras de los sedimentos del mar.
- La investigación marina sistemática se inició alrededor del siglo XIV, y usó intensivamente las sondas de mano, instrumento tradicional de medición de profundidades. Estas sondas consistían simplemente en largas cuerdas de cáñamo y un lastre, generalmente piedras o plomo.
- Posteriormente se construyó un tipo de sonda llamada *Escandallo*, cuyo peso muerto tenía una cavidad recubierta de grasa con el fin de adherir el lodo de los fondos. Este método fue usado durante varios siglos y permitió reconocer los fondos marinos, base para la elaboración de las primeras cartas marinas (alrededor de 1850) con información sobre los diversos materiales del fondo, incluyendo arenas finas, conchas, limos, cascajos, entre otros.
- Alrededor de 1860, sólo se conocían bien las zonas costeras de bajas profundidades y la inquietud por conocer las zonas más profundas de los océanos era un asunto considerado prioritario.

- Con el paso de los años, los geólogos y geofísicos marinos de diversas Universidades de Estados Unidos y de Europa utilizaron métodos indirectos para obtener información de las grandes profundidades que se manifiestan debido a las elevadas presiones que allí se presentan. A 5000 m de profundidad existe una presión de 500 kilogramos por centímetro cuadrado; presión prohibitiva, que sólo algunos submarinos especiales pueden soportar. En consecuencia, la mayoría de los estudios se realizan, en la actualidad, desde barcos oceanográficos con características especiales para situarse en alta mar; una muestra geológica de la que no se sepa exactamente donde se tomó no sirve.
- La tecnología de los dispositivos permitió estudiar los avances del conocimiento de los fondos marinos, sobresaliendo así de las profundidades oceánicas. De este modo, se comenzó la construcción de los dispositivos denominados sondas o nucleadores, con los que se fortalecieron estos estudios. Se comenta que la primera sonda se construyó y se diseñó en 1870 por un oceanógrafo Americano llamado Brooke.
- Más tarde, en la expedición del Challenger (1872-1873) se empleó un tubo-botella que consistía de una especie de sacabocados, el cual recogía, además de la muestra del lecho marino, la del agua que lo recubría; cuando el fondo estaba compuesto de lodo el resultado era satisfactorio, pero cuando contenía arena, se salía por falta de la cohesión necesaria, por lo que tuvo que diseñarse un mecanismo de cierre.
- Con la asesoría del teniente de navío Matthew Fontaine Maury (considerado como el padre de la oceanografía moderna, quien había propuesto realizar el estudio sistemático de los océanos) se conoció más aún la configuración del fondo del mar.
- Con base en el proyecto de Maury, la armada de los Estados Unidos decidió equipar algunos de sus barcos para la Investigación oceanográfica. Se emplearon una serie de equipos entre los que se encontraba la sonda de mano, con la que se empezó a medir las profundidades, que eran prácticamente desconocidas.

- Con los datos que se obtuvieron, se trazaron cartas de navegación más completas señalando las diferentes profundidades, así como el lugar donde se encontraban, lo cual verificó que el fondo oceánico contenía planicies, enormes salientes y profundas depresiones.
- La sonda de Brooke fue sustituida por la sonda mecánica, que tenía un cable de acero enrollado en una especie de grúa movido por un motor de vapor; este cable llevaba en el extremo un peso, el cual al tocar el fondo se soltaba disminuyendo la tensión del cable, lo que hacía que la grúa dejara de accionar y la cantidad de cable desenrollado indicaba la profundidad que tenía la zona. La incorporación del motor facilitó la maniobra para lanzar cables de mayor dimensión y llegar a zonas más profundas, aumentando el número de mediciones en menor tiempo.
- Con los datos que se obtuvieron con este tipo de muestreo se pudieron hacer cartas más exactas y el Instituto de Oceanografía de Berlín publicó, en 1912, el primer mapa alemán sobre profundidades, el que se basaba en 6000 mediciones, que para esa época eran muchas, pero en la actualidad resultan escasas, debido a que los cartógrafos necesitan, de 15000 a 20000 sondeos para levantar el perfil del fondo oceánico de un área comprendida entre un grado de latitud.
- Alrededor del año 1919 apareció un nuevo método de sondeo (el primer ecosonda práctico) creado por el físico alemán Alexander Behm, lo cual consiste de un instrumento que puede medir continuamente el fondo del mar con ondas sonoras, éstas son reflejadas y registradas en dicho instrumento; el tiempo que tarda la señal en regresar al barco multiplicado por la velocidad de propagación del sonido, dividido entre 2, es la distancia que hay del barco al fondo del océano; asimismo, es posible registrar su perfil en un ecógrafo, aparato que reproduce las líneas del fondo sobre un papel formando una gráfica o ecograma.
- La tecnología de las ecosondas en los últimos años, ha estado en continuo mejoramiento en cuanto a sondeos infrasónicos, es decir, en las bajas frecuencias. Con este tipo de frecuencias con longitudes de onda largas, se han podido estudiar

las máximas profundidades del mar y así mismo determinar las propiedades del fondo con la máxima precisión posible.

- De esta manera, las sondas o nucleadores se fueron perfeccionando, pudiéndose obtener muestras a mayor profundidad y de mayor longitud. En la expedición holandesa del barco Willebrod Snellius que se realizó en los años de 1929-1930, se colectaron muestras de dos metros de longitud, facilitándose el estudio de la estratificación de los sedimentos. A medida que pasaban los años, en esa época se pudo construir y diseñar nucleadores que tuvieran la capacidad de recoger hasta 15 m o más de columna de sedimentos marinos en los diferentes océanos y mares del planeta, teniendo en cuenta que en el océano Atlántico cada mil años aumenta 8 mm la sedimentación, queriendo decir que una muestra recogida de 15 m de espesor representa una acumulación de sedimentos aproximadamente de 2 millones de años atrás.
- Otra manera de estudiar los núcleos del fondo del mar, ha sido también el uso de dragas; éstas permiten obtener grandes cantidades de sedimento, como conchas, gravas, y otros fragmentos de fondo duro, así como rocas, que no cabrían en el tubo de las sondas.
- Cuando se utilizaba únicamente la ecosonda de altas frecuencias, las ondas reflejadas solo registraban la información sobre los sedimentos superficiales y no los datos de las capas profundas. Por esa razón, el doctor Maurice Ewing, oceanógrafo estadounidense, desarrolló una técnica combinando la ecosonda con explosiones sísmicas provocadas, al arrojar al agua desde un buque, cargas de dinamita y TNT, que explotaban a escasa profundidad a intervalos determinados de tiempo.
- Estas explosiones producían ondas sonoras que chocaban con la superficie de la capa del sedimento que generaban un primer eco y después se transmitían hasta el fondo rocoso golpeando en él y produciendo un segundo eco. Ambos ecos eran recogidos por el registrador de la ecosonda produciéndose el ecograma

correspondiente. En la actualidad la dinamita ha sido sustituida por aire comprimido y descargas eléctricas.

- Los distintos tiempos de recepción de las diferentes ondas reflejadas proporcionan una idea más exacta sobre la disposición y el espesor de la capa de sedimentos, que en el Atlántico alcanza unos 650 m y cerca de 300 m en el Pacífico.
- Se sabe que el planeta es dinámico, continuamente ocurren cambios. Uno de los conceptos más importantes del pensamiento geológico moderno compartido por todos los que estudian la historia de la Tierra, es que el fondo del océano se está expandiendo lentamente y en ocasiones sufre transformaciones por reajustes o hundimientos de la corteza terrestre.
- El campo de estudio de las profundidades oceánicas, a través de la oceanografía geológica está cambiando constantemente. Esta información es importante para la comprensión de la evolución y formación del planeta, a fin de entender el origen de los océanos, y pronosticar y evaluar los recursos minerales potenciales de los mares del mundo.
- De la explicación anterior, todavía no se terminan de explorar, clasificar y de conocer las profundidades de cualquier sector del mar que rodea a los continentes, por eso se puede decir que el sistema de clasificación de lechos marinos será un sistema de constante mejoras para todo un estudio oceanográfico y por siempre será un campo de estudio en la geofísica marina y así mismo un campo de investigación para las instituciones que estén interesadas en conocer a fondo las aguas que lo rodean.

1.5 Aspectos físicos y de manejo de detectores acústicos de la profundidad

Siguiendo el desarrollo tecnológico que se ha dado en las últimas décadas con los métodos de la exploración marina (ver sección 1.4), puede decirse que las ecosondas son un sistema acústico inventado a principios del siglo XX, impulsado en buena parte por las aplicaciones militares. Desde entonces se han construido y perfeccionado numerosos tipos de ecosondas que permiten estudiar los fondos marinos con diferentes niveles de detalle (OHI, 2005):

- La primera es el haz simple, el cual han alcanzado precisiones mayores a los 10 cm en aguas poco profundas. y además ofrecen en el mercado oceanográfico una variedad de equipos con diferentes frecuencias, ritmos de pulsos, entre otros. Satisfaciendo así a diferentes usuarios que estén interesados en investigar las características de cualquier tipo de lecho marino o de cualquier ambiente marino.
- La segunda son las ecosondas multihaz, que ofrecen un gran potencial para la investigación precisa y total del fondo del mar, es decir, su cobertura es mucho más amplia con respecto a las ecosondas de haz simple, contando con que la resolución del sistema es la adecuada para la apropiada detección de peligros a la navegación.

Con base al desarrollo de los sistemas acústicos, se han venido haciendo constantes mejoras en cuanto a su fácil manejo, en otras palabras, las primeras ecosondas eran dispositivos analógicos donde se requería mayor complejidad en cuanto al manejo de variables como la temperatura y el tipo de papel a utilizar para dar información acerca del perfil batimétrico, entre otros. Luego se construyeron las ecosondas digitales donde su diferencia con respecto a la anterior consiste en sus elementos electrónicos, por ejemplo: un microprocesador, TVG (Time Variable Gain), detector de envolvente, entre otros. Estos componentes electrónicos digitales dan un mayor grado de información con respecto al tipo de fondo en el lugar donde se esté estudiando. El uso de las

ecosondas digitales junto con sensores de movimiento, sistemas de posicionamiento satelital (como los DGPS O GPS) y software para la adquisición de los datos, ha sido combinados para optimizar la productividad con las reducciones correspondientes en el personal para operaciones de levantamiento.

Como el interés es la ecosonda de haz simple digital, se enfocará en la característica de su principio acústico, la propagación de la onda acústica y los parámetros acústicos. Posteriormente, se explicará acerca de los transductores, sus características, su clasificación con respecto al patrón del haz, los principios de operación y su instalación en el buque oceanográfico. Por último se describirán los sistemas acústicos de ecosondas de haz simple.

1.5.1 Principios de sensores acústicos

Las propiedades físicas y la propagación de las ondas acústicas en las aguas del mar, lagos, ríos, represas (o de cualquier medio que presente un líquido newtoniano), es la mejor manera para llevar a cabo mediciones oceanográficas e hidrográficas. Por eso será necesario familiarizarse con algunos de los conceptos más importantes en el campo de la geofísica marina, sin estos conceptos es imposible entender a fondo la determinación de la profundidad y las características del lecho marino llevado a cabo por una ecosonda (OHI, 2005).

1.5.1.1 Las ondas acústicas marinas y características físicas

Una propiedad muy importante en las ondas electromagnéticas es su propagación en el vacío y en el aire, no obstante, éstas con dificultad penetran o se propagan en medios líquidos. Por otro lado, las ondas acústicas ya bien sean infrasónicas¹, sónicas² o ultrasónicas³, logran una buena penetración y propagación en todos los medios elásticos una vez que éstos se pueden hacer vibrar cuando se someten a variaciones de presión.

¹ El sonido infrasónico es el sonido que está por debajo de la capacidad auditiva del hombre, técnicamente a una frecuencia de 20Hz.

² Este tipo de sonido está dentro de la capacidad auditiva del hombre, técnicamente de 20 a 20,000Hz.

³ El ultrasonido es el sonido que ocurre por encima de la capacidad auditiva del hombre, o por encima de 20,000Hz.

La mayoría de los sensores empleados para la determinación de la profundidad y la caracterización del lecho marino emplean ondas acústicas (OHI, 2005).

1.5.1.1.1 Campo acústico

Las ondas acústicas consisten en leves variaciones del campo de presión en el agua. Las partículas de agua se mueven longitudinalmente, de un lado a otro, en la dirección de propagación de la onda, produciendo fenómenos de compresión y expansión, similares a aquellos producidos por las ondas longitudinales en una barra (OHI, 2005).

La intensidad de la onda acústica, I_r , es la cantidad de energía por segundo que cruza por unidad de área, está a su vez se encuentra a una distancia r del transmisor, lo cual está dada por (OHI, 2005):

$$I_r = \frac{P_r^2}{\rho c} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.1)$$

Donde P_r es la presión efectiva a la distancia r desde la fuente, ρ es la densidad del agua de mar que equivale a 1026 kg/m^3 , c es la velocidad del sonido en el agua (1500 m/s), el producto entre la densidad y la velocidad (ρc) en un medio elástico se denomina impedancia acústica⁴, equivalente a $1,54 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (OHI, 2005).

Una característica de la intensidad de la onda acústica al ser calculada, es la utilización de los valores promedios de la presión acústica en lugar de los valores instantáneos. La presión y la intensidad acústica, debido a su rango de amplitud, normalmente son expresadas en escalas logarítmicas referidas a niveles de presión y de intensidad, siendo la escala de decibeles la escala logarítmica más común. En consecuencia, se puede expresar el nivel de la intensidad acústica (dB), llamado también Echo-Strength, como (OHI, 2005):

⁴ La impedancia acústica corresponde a la resistencia del medio a la propagación de la onda a través de él. O sea un factor proporcional entre la velocidad y la presión acústica.

$$dB = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} \quad (1.2)$$

Donde I_{Ref} es la intensidad de referencia.

Así mismo, se puede expresar alternativamente el nivel de la intensidad acústica o el Echo-Strength, por (OHI, 2005):

$$dB = 20 \log_{10} \frac{P_e}{P_{ref}} \quad (1.3)$$

Donde P_{ref} es la presión de referencia⁵.

1.5.1.1.2 Ecuación del sonar

La ecuación del sonar se utiliza para analizar y expresar la capacidad de detección y el desempeño de las ecosondas como una función de las condiciones de operación (OHI, 2005).

La ecuación del sonar para las ecosondas define la señal o detección del eco como el Exceso del Eco (EE) (OHI, 2005):

$$EE = SL - 2TL - (NL - DI) + BS - DT \quad (1.4)$$

En la ecuación (1.4), cada término se presenta y se estudia para entender los procesos involucrados en la propagación de señales acústicas y la detección del eco.

SL: Es el nivel de ruido localizado a 1 metro de distancia de la fuente (transmisor), expresado como (OHI, 2005):

$$SL = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_{Ref}} \quad (1.5)$$

⁵ En la referencia submarina la presión es normalmente adoptada como 1 μ Pa

TL: La pérdida de transmisión toma en cuenta las pérdidas de intensidad acústicas debido a la geometría, es decir, las pérdidas por dispersión, proporcionales a r^2 y las pérdidas por la absorción, proporcionales al coeficiente de absorción, dependiendo de las propiedades físicas y químicas del agua de mar y de la frecuencia acústica. De esta manera, la pérdida por transmisión está dada de la siguiente manera (OHI, 2005):

$$TL = 20 \log_{10} r + a r \quad (1.6)$$

Donde r es la distancia al transductor y a es el coeficiente de absorción.

NL: El nivel de ruido depende del nivel de ruido del espectro ambiental ($N0$) y del ancho de banda del transductor durante la recepción (w):

$$NL = N0 + 10 \log_{10} w \quad (1.7)$$

El ruido del océano es generado a través de varias fuentes, tales como: las olas, la lluvia, la actividad sísmica, el ruido térmico, los organismos vivientes y por la actividad humana. Además de este ruido, se encuentra involucrado otro factor que afecta el desempeño de la ecosonda en el momento de hacer la batimetría, por ejemplo: el nivel de Reverberación (**RL**), el cual es causado por la energía acústica de dispersión de retorno creada por diferentes cuerpos marinos; estos incluyen las olas superficiales, las burbujas de aire, la vida marina, materiales en suspensión, entre otros (OHI, 2005).

DI: Los transductores se caracterizan por tener la capacidad de concentrar la energía dentro de una forma cónica. Esta propiedad puede ser cuantificada, por la ecuación del sonar, como la razón de la intensidad dentro del haz y la intensidad de un punto de la fuente omnidireccional con la misma energía. De esta descripción, el índice de Directividad (DI) puede ser expresado de la forma (OHI, 2005):

$$DI = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{Ref}} = 10 \log_{10} \frac{4\pi R^2}{S} \quad (1.8)$$

De otra manera, el índice de Directividad se puede expresar para un arreglo con dimensión L y una longitud λ , con $L \gg \lambda$ de la siguiente forma:

$$DI = 10 \log_{10} \frac{2L}{\lambda} \quad (1.9)$$

BS: La fuerza dispersa de retorno del fondo (también llamado Backscattering) consiste en que cada partícula en una columna de agua puede asemejarse a un reflector y el fondo del mar devuelve la suma de las contribuciones de energía de la interfase agua-fondo y del volumen de sedimentos, debido a cierta penetración de energía en los sedimentos. Sin embargo, la contribución del volumen de sedimentos es menos significativa cuando se utilizan frecuencias altas. Esta variable (BS) es normalmente descrita como la suma logarítmica de la fuerza de dispersión de retorno intrínseca por unidad de área o índice de dispersión de retorno (SB), que depende de las propiedades reflectivas del fondo marino y del área de dispersión efectiva instantánea A , el área del fondo marino que contribuye a la señal de dispersión de retorno (OHI, 2005):

$$BS = SB + 10 \log_{10} A \text{ dB} \quad (1.10)$$

DT: El umbral de detección es un sistema de parámetros dependientes que establecen el nivel más bajo sobre el cual la ecosonda puede detectar los ecos que retornan (OHI, 2005).

1.5.1.1.3 Temperatura

La temperatura en la superficie del mar varía con la posición geográfica en la Tierra, con las estaciones del año y la hora del día. La distribución de la temperatura es compleja y no puede predecirse con una buena certeza para hacer un buen levantamiento hidrográfico; debido a que la temperatura en la columna de agua es también una variable muy compleja. Por tal razón se exige hacer una amplia distribución de lanzamientos de perfiles de velocidad de sonido, temporal y espacialmente, para mantener una corriente representativa de los perfiles de velocidad del sonido para el área del levantamiento batimétrico (OHI, 2005).

La medición de la profundidad es bastante sensible a las variaciones del perfil de la velocidad del sonido; una variación de un grado centígrado en la temperatura se traduce aproximadamente en una variación de 4.5 m/s en la velocidad del sonido (OHI, 2005).

La variación de temperatura es el factor dominante para la variación de la velocidad del sonido entre la superficie y el límite más bajo de la termoclina⁶, desde allí la presión se convierte en la principal influencia (OHI, 2005).

1.5.1.1.4 Salinidad

La salinidad es la medición de la cantidad de sales disueltas y otros minerales en el agua del mar. Normalmente se define como la cantidad total de sólidos disueltos en el agua de mar en partes por mil (ppt o ‰) por peso (OHI, 2005).

La salinidad no se determina directamente pero es calculada desde la clorinidad, la conductividad eléctrica, el índice reflexivo o cualquiera otra propiedad cuya relación con la salinidad esté bien establecida (OHI, 2005).

El promedio de salinidad del agua de mar es de alrededor del 35‰. La tasa de variación de la velocidad del sonido es de aproximadamente 1.3 m/s por 1‰ de alteración de la salinidad (OHI, 2005).

1.5.1.1.5 Presión

La presión es un factor que involucra cambios en la variación de la velocidad del sonido. La presión es función de la profundidad y la tasa de cambio de la velocidad del sonido es de aproximadamente 1.6 m/s para cada alteración de 10 atmósferas, es decir, aproximadamente 100 m de profundidad⁷ (OHI, 2005).

⁶ La termoclina es una capa dentro de un cuerpo de agua o aire donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad o altura.

⁷ Esto se deriva del principio hidrostático, $p(z) = p_0 + \rho g z$.

1.5.1.1.6 Densidad

La densidad también es función de la temperatura, salinidad y presión.

El 50% de las aguas de los océanos tienen una densidad entre 1027,7 y 1027,9 kg/m³. La más grande influencia en la densidad es la compresibilidad con la profundidad. El agua con una densidad de 1028 kg/m³ en la superficie tendría una densidad de 1051 kg/m³ en una profundidad de 5000 m (OHI, 2005).

1.5.1.2 Propagación del sonido en el agua de mar

Las propiedades más importantes en la propagación del sonido en el agua de mar, son: atenuación, reflexión y refracción.

1.5.1.2.1 Atenuación

La atenuación es la pérdida en la energía de una onda que se propaga debido a la absorción, el despliegue esférico y la dispersión por las partículas en la columna de agua. Explicando cada una de ellas, se puede decir lo siguiente (OHI, 2005):

La absorción es el resultado de las moléculas en asociarse y en disociarse en una columna de agua; moléculas como el sulfato de Magnesio (MgSO₄) constituyen la mayor fuente de absorción en el agua salada. La tasa de absorción es dependiente de las propiedades físicas y químicas del agua marina y de la frecuencia acústica que se transmite.

En la figura 2 se puede apreciar que, por encima de 100 kHz, el coeficiente de absorción aumenta con el aumento de la temperatura; por lo tanto, se puede esperar que el alcance del sonar variará con la temperatura del agua (OHI, 2005).

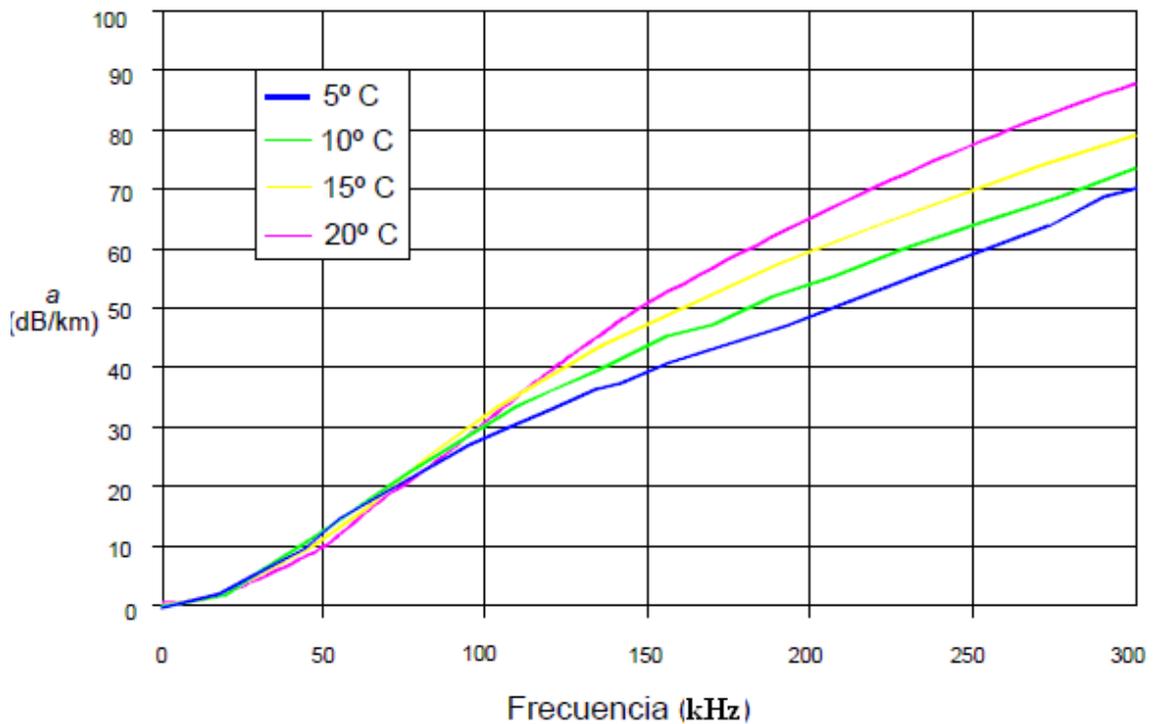


Figura 2. Coeficiente de absorción. OHI (2005).

El despliegue esférico depende de la geometría; para un ángulo sólido la energía acústica se propaga en un área más grande a medida que la distancia desde la fuente aumenta (OHI, 2005).

Ambas pérdidas por la absorción y la propagación esférica son tomadas en cuenta en la ecuación del sonar (ver 1.5.1.1.2). Sin embargo, las pérdidas por la dispersión dependen de las partículas o cuerpos presentes en la columna de agua; causada por los organismos marinos, siendo una fuente importante que consiste en una capa de plancton cuya profundidad varía a través del día (OHI, 2005).

1.5.1.2.2 Refracción y Reflexión

La refracción es el proceso en el cual la dirección de propagación de la onda acústica es alterada debido a un cambio en la velocidad del sonido dentro del medio de propagación o a medida que la energía pasa a través de una interfase, representando una discontinuidad de velocidad del sonido entre dos medios (OHI, 2005).

Al Referirse a la figura 3, se puede ver que se encuentran dos medios diferentes C_1 y C_2 , de acuerdo con las leyes de Snell, en el caso que la velocidad en C_1 sea mayor que la velocidad de la onda en 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. Por otro lado, si el índice de refracción de C_1 es menor que el de C_2 , la dirección de propagación de la onda acústica cambia y el ángulo de transmisión será mayor que el ángulo de incidencia. Para la incidencia normal no se presenta refracción (OHI, 2005).

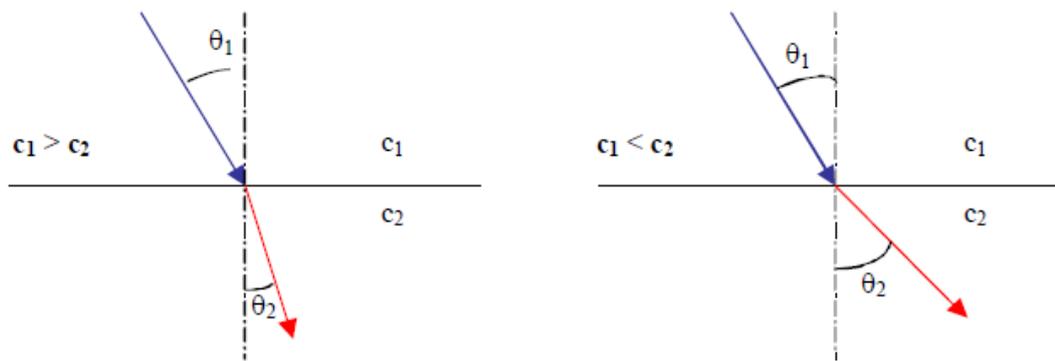


Figura 3. Principio de la refracción. Antoine (2005)

Considerando que la onda incida normalmente a la superficie y el fondo sea suficientemente liso, el coeficiente de reflexión para la presión \mathfrak{R} , se obtiene mediante el coeficiente de la presión de amplitud de la onda reflejada y la presión de amplitud de la presión de la onda incidente (OHI, 2005; Geyer, 1983 ; Bezdek, 1973):

$$\mathfrak{R} = \frac{P_R}{P_I} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c} \quad (1.11)$$

Para las condiciones generales, la proporción de la intensidad acústica reflejada y transmitida depende principalmente de los siguientes factores (OHI, 2005):

Contraste entre las impedancias acústicas de los medios.

Asperezas del fondo marino.

Frecuencia acústica.

1.5.1.3 Parámetros acústicos

El desempeño de una ecosonda está en los transductores, sin ellos sería imposible pronosticar la profundidad y las características del suelo marino, por esta razón es necesario analizar los parámetros más importantes que constan de: la frecuencia, el ancho de banda y la longitud del pulso (OHI, 2005).

1.5.1.3.1 Frecuencia

La frecuencia acústica es el parámetro más importante en las ecosondas debido al rango de funcionamiento en el que pueden trabajar. Cuando son bajas frecuencias el alcance y la penetración del sonido en los sedimentos será mucho mayor con respecto a las altas frecuencias que sufren mayor atenuación, razón por la cual el alcance y la penetración del sonido en el fondo marino será mucho menor (OHI, 2005).

El ancho del haz es función de la longitud de la onda acústica y del tamaño del transductor. De este modo, al utilizar frecuencias bajas se hace uso de un haz amplio (cobertura mayor a 12°) y en consecuencia requerirá de un transductor de un tamaño más grande comparado con aquellos transductores que hacen uso de un ancho de haz pequeño (menor que 8°) con el fin de dar información únicamente de la batimetría (OHI, 2005).

Las frecuencias de las ecosondas batimétricos son típicamente:

Aguas con profundidades menores a 100 m: Frecuencias mayores que 200 kHz;

Aguas con profundidades menores a 1500 m: Frecuencias de 50 a 200 kHz;

Aguas con profundidades mayores a 1500 m: Frecuencias de 12 a 50 kHz.

Las frecuencias de las ecosondas para detectar sedimentos están por debajo de los 8 kHz (OHI, 2005).

1.5.1.3.2 Ancho de banda

Al considerar a f_r como la frecuencia de resonancia en la cual la ecosonda es capaz de emitir la máxima potencia de transmisión, teniendo en cuenta que f_1 y f_2 son las

frecuencias que están a un medio de la frecuencia de resonancia o en el punto máximo de la curva (ver figura 4), se puede definir el ancho de banda como la diferencia entre f_1 y f_2 , es decir: $W = f_2 - f_1$. Además, el factor de calidad Q está dado por (OHI, 2005):

$$Q = \frac{F_0}{W} \quad (1.12)$$

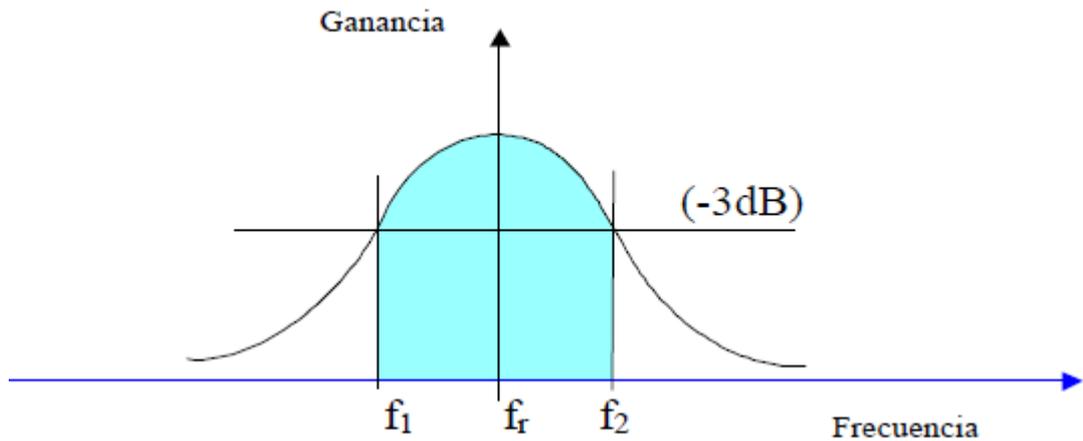


Figura 4. Ancho de banda del transductor. Antoine (2005)

Se puede notar que el factor Q y W varían recíprocamente. Por lo tanto, para optimizar el poder de transmisión, el transductor debe de transmitir cerca de la frecuencia de resonancia con el fin que el ancho de banda sea pequeño, en otras palabras, resultando un factor de calidad alto (OHI, 2005).

Para obtener un buen perfil batimétrico, tanto para altas frecuencias como para bajas, es necesario discriminar los ecos de cualquier otra señal durante la recepción. Por tal motivo, el ancho de banda debe cumplir que $W \geq \frac{1}{\tau}$, donde τ es la duración del pulso (OHI, 2005).

La solución consiste en un transductor de transmisión que tenga un Q alto y un transductor de recepción que opere a la misma frecuencia de resonancia, pero con un Q bajo (OHI, 2005).

1.5.1.3.3 Longitud de pulso

La longitud del pulso es una propiedad muy importante en el campo de la geoacústica debido a que su magnitud, si es larga o corta, es la que determina la energía transmitida al agua y de esta manera se puede verificar el alcance de la ecosonda a la hora de realizar el perfil batimétrico (OHI, 2005).

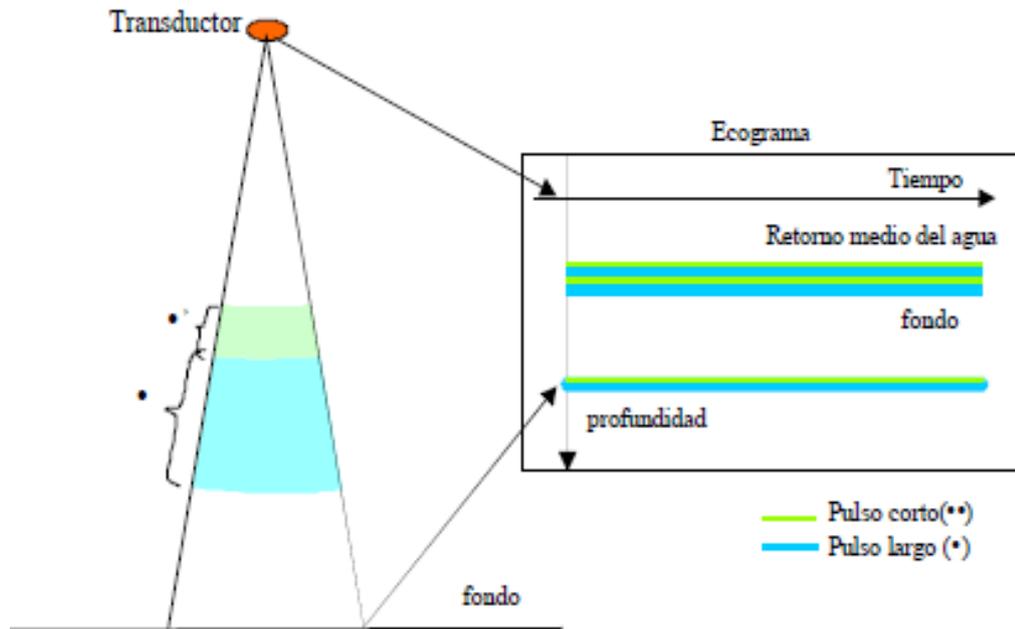


Figura 5. Resolución como una función de la longitud del pulso. OHI (2005)

Una ventaja de aprovechar la frecuencia resonante del transductor, es lograr que la duración del pulso este por lo menos en la mitad de su periodo natural. El verdadero problema de los pulsos largos es la disminución de la resolución vertical de dos rasgos adyacentes (figura 5) (BHI, 2005).

1.5.2 Transductores

Los transductores son los componentes más importantes de las ecosondas porque son los que permiten dar información acerca del fondo y del subsuelo del lecho marino partiendo del hecho de convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa cuando el pulso retorna del fondo del agua. Sin ellos sería imposible que los métodos acústicos tuvieran éxito en las mediciones oceanográficas e hidrográficas y son la base para que las ecosondas tengan un valor de importancia en la caracterización de profundidades y

sedimentos en un área particular. Por esta razón, es importante estudiar los principios operativos en las que se destacan: el ancho del haz, la directividad, la dirección del haz, la instalación y la cobertura (OHI, 2005).

El funcionamiento de los transductores⁸ consiste en transmitir y recibir los pulsos acústicos, esto se logra al convertir los pulsos eléctricos de un generador de señal a vibraciones longitudinales que se propagan en la columna de agua como una onda de presión. Durante la recepción, recíprocamente, las ondas de presión son convertidas en señales eléctricas (OHI, 2005).

1.5.2.1 Clasificaciones en relación con la operación

Los transductores se clasifican de acuerdo con su principio operativo, en otras palabras, magnetostrictivo, piezoeléctrico y electrostrictivo (OHI, 2005).

1.5.2.1.1 Magnetostrictivo

Estos transductores tienen un eje de hierro con un solenoide de níquel. La corriente 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 que circula por el eje se para, el espiral regresa a su tamaño original (OHI, 2005).

La aplicación de una señal de corriente alterna produce contracciones y expansiones de acuerdo con las propiedades de la señal aplicada. Esta señal alterna resulta en vibraciones de diferentes amplitudes, lo que se ve reflejado su inducción, cuando ésta es máxima la frecuencia es igual a la frecuencia natural del transductor o la frecuencia de la resonancia⁹ (OHI, 2005).

⁸ El transductor es un equipo, con una antena submarina, usado para transmitir pulsos acústicos y para recibirlos de regreso. 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.

⁹ Este fenómeno corresponde al reforzamiento o prolongación de cualquier onda de movimiento, como las ondas acústicas. La frecuencia de la resonancia es la frecuencia en la que el transductor vibra más prontamente.

Este tipo de transductor es, sin embargo, menos eficiente que los transductores que operan con el efecto piezoeléctrico (OHI, 2005).

1.5.2.1.2 Piezoeléctrico

Estos transductores se constituyen de dos placas con un fondo de cristales de cuarzo en el medio. La aplicación de un potencial eléctrico a través de las placas 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 de potencial entre las caras opuestas del mismo. La amplitud de la vibración será máxima si la frecuencia del potencial eléctrico concuerda con la frecuencia natural de oscilación del cuarzo (OHI, 2005).

1.5.2.1.3 Electrostrictivo

Este tipo de transductor funciona con un principio parecido al transductor piezoeléctrico, la diferencia entre ellos radica en el material que se utiliza, por ejemplo: para el caso electrostrictivo se usan las cerámicas policristalinas o ciertos polímeros sintéticos, mientras los transductores piezoeléctricos son cristales de cuarzo. Con esta diferencia, se puede decir que en los transductores electrostrictivo durante los procesos de fabricación necesitan ser polarizados (OHI, 2005).

El uso de los transductores electrostrictivos ha sido de mayor éxito en estos días. Estos transductores son más livianos, reversibles y pueden ser alineados. Esta alineación se logra con un grupo de pequeños elementos arreglados apropiadamente (OHI, 2005).

1.5.2.2 Ancho del haz

Un transductor genera amplitudes de presión, por lo tanto sus coordenadas preferiblemente se trabajan en polares por lo que su producto resultar ser de la forma:

$$P(r, \theta) = P_{ax}(r) * h(\theta) \quad (1.13)$$

Donde θ es el ángulo referido al eje del haz, línea de máxima amplitud de presión e intensidad, r es la distancia desde un punto en particular del medio al transductor, $P_{ax}(r)$ es la amplitud de presión en el eje del haz acústico y $h(\theta)$ es el factor direccional que corresponde al de la señal. El factor direccional es normalizado por $\theta = 0$, es decir $h(0)=1$, entonces $P(r, \theta) = P_{ax}(r)$ (OHI, 2005).

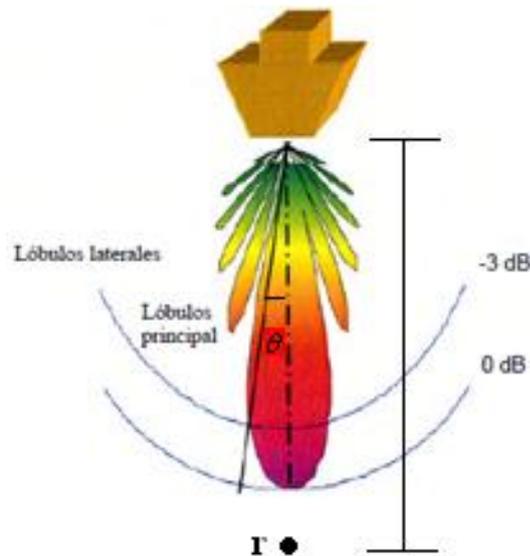


Figura 6. Ancho del haz definido por el ángulo a un nivel de -3 dB. Antoine (2005)

Un transductor cualquiera, debe ser caracterizado de acuerdo con el ancho del haz b_w ; esto es definido por el ángulo en el nivel -3dB, por tanto, la apertura angular corresponde a la mitad del poder referido al eje del haz $b_w = 2 \theta_{-3dB}$, ver figura 6 (OHI, 2005).

La medición de la profundidad se desarrolla en cualquier dirección dentro del cono definido por el ancho del haz (OHI, 2005).

En las dimensiones físicas de un transductor, el ancho del haz juega un papel importante con el tamaño de este, debido a que está vinculado no solo al tamaño sino también a la frecuencia de los pulsos acústicos. Por ejemplo, el ancho del haz en el nivel de -3 dB de un transductor de pistón circular, con un diámetro D , puede ser aproximado por (OHI, 2005):

$$b_w = 60 / D \quad (\text{grados}) \quad (1.14)$$

En el caso de un transductor rectangular, con una longitud L y un ancho W , el haz con un ancho en el nivel -3 dB en las dos longitudes puede ser respectivamente aproximado por: (OHI, 2005). (Ver más información en el manual de hidrografía de Bereau. Pág. 140-146)

$$b_w = \frac{50}{L} \quad \wedge \quad b_w = \frac{50}{W} \quad (\text{grados}) \quad (1.15)$$

1.5.2.3 Clasificaciones en relación con el tipo de haz

Hay dos clases de ecosondas: los de haz simple y multihaz. La diferencia entre ellos está en el número de elementos de los transductores, es decir, en las ecosondas de haz simple trata solamente con una simple pieza de transductor o con una alineación mientras las ecosondas multihaz tienen alineaciones de transductores construidas a partir de algunos elementos. Una ventaja de utilizar el multihaz es formar direcciones múltiples con el propósito de tener una mayor cobertura en el fondo del mar (OHI, 2005)

1.5.2.3.1 Haz único

Al decir que las ecosondas de haz simple tienen un solo transductor, quiere decir que su función consiste en transmitir y recibir el eco a través de un mismo elemento, esto depende del ancho del haz que es una función de las dimensiones del transductor y de la longitud de la onda acústica (ver 1.5.2.2). A medida que la frecuencia es más alta, el transductor es más pequeño, por tanto el haz será más angosto. Entonces para tener un haz angosto en frecuencias bajas, se requiere de un transductor más grande (OHI, 2005). Cuando se requiere un haz angosto en los transductores de haz simple o mono haz, es porque se necesita una alta directividad y por el contrario si se necesita un haz ancho es porque la directividad no es la principal preocupación, sino que la prioridad se centra en la detección de obstrucciones y sondas bajas (OHI, 2005).

Los haces anchos tienen la capacidad de detectar los ecos dentro de un ángulo sólido amplio, el cual resulta importante para la identificación de riesgos para la navegación requiriendo una investigación más avanzada (OHI, 2005).

Por otra parte, los haces angostos, normalmente de 2° a 5° , son importantes para desempeñar una resolución alta en el ecograma en el momento de la batimetría (figura 7) (OHI, 2005).

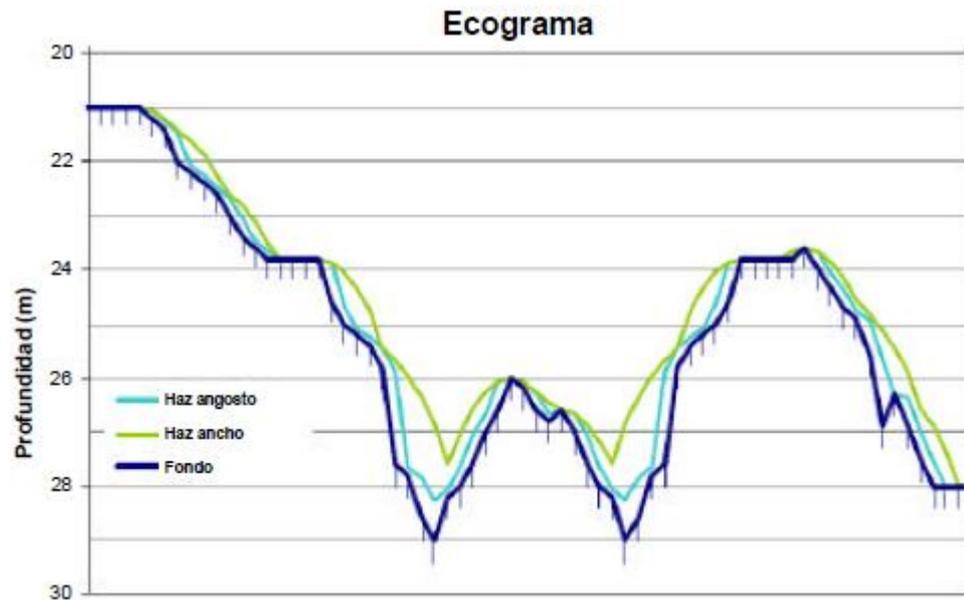


Figura 7. Ilustración de la medición de la profundidad usando un haz único angosto y uno ancho. Antoine (2005)

1.5.2.3.2 Multihaz

Básicamente el multihaz son alineaciones de transductores que se caracterizan por tener hidrófonos y proyectores, es decir, para la transmisión del pulso acústico utilizan proyectores orientados longitudinalmente y para la recepción del pulso o del eco hacen uso de hidrófonos orientados transversalmente a la proa de la nave. Lo más común es tener un solo haz de transmisión con forma de ventilador, angosto a lo largo del recorrido (OHI, 2005).

La reducción de los lóbulos laterales es fundamental para corregir la medición de la profundidad y el posicionamiento del multihaz. En general, se logra que los lóbulos laterales estén por debajo de -20 dB (OHI, 2005).

1.5.2.4 Clasificación según su instalación

La instalación de los transductores en el barco puede llevarse a cabo de diferentes maneras, la decisión depende de lo portátil que sea el sistema, de manera que el ruido sea lo suficientemente mínimo para permitir hacer mediciones de profundidad. Estos ruidos suelen ser: la corriente de agua turbulenta bajo la quilla, el sonido del motor, la rugosidad del mar y sonidos de animales como las ballenas, delfines que emiten sonidos ultrasónicos, causando interferencia con los pulsos acústicos ultrasónicos de los ecosondas. Debido a este ruido, existen tres clases de instalación que permiten tener un calado que aisle en lo posible el ruido. Las tres clases son: fijo en la quilla, remolcado y portátil (OHI, 2005).

1.5.2.4.1 Fijo en la quilla

Esta es la instalación común del haz simple y de los transductores de multihaz en las embarcaciones grandes, particularmente para aquellos designados para levantamientos de aguas profundas (OHI, 2005). (Ver más información en el manual de hidrografía. Pág. 148).

1.5.2.4.2 Remolcado

La instalación del transductor en un remolque de pesca es usada para los sonares de barrido cuando es necesario tener una buena estabilidad del transductor, la reducción del ruido en la nave y la habilidad de bajar el transductor cerca del fondo marino (OHI, 2005).

1.5.2.4.3 Portátil

Este método de instalación se utiliza en los transductores de haz único o de multihaz en pequeñas embarcaciones con el objetivo de realizar la batimetría en aguas poco profundas. Esta instalación puede ser lograda sobre el costado o sobre la proa. Así mismo, la estructura de apoyo para el transductor debe ser rígida y resistente a la torsión (OHI, 2005).

1.5.2.5 Cobertura

La parte más importante de este trabajo está enfocada en los transductores mono haz. El abordaje matemático de los transductores multihaz puede encontrarse en el manual de hidrografía, página 151. La cobertura del fondo marino, es decir el área sondeada por el haz simple, es el área dentro del haz, donde el tamaño de la huella está dado por: (Figura 8) (OHI, 2005).

$$a = 2 (z) \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (1.16)$$

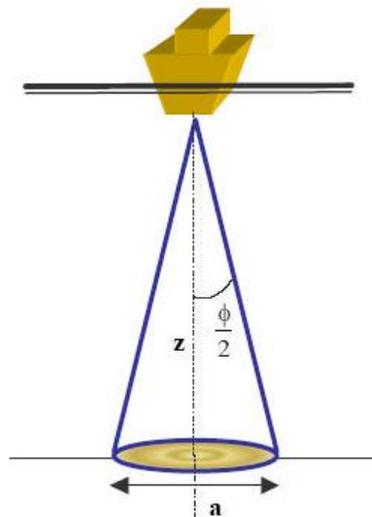


Figura 8. Cobertura del haz simple. Antoine (2005)

1.5.3 Sistemas acústicos

En esta sección se describe un sistema acústico para adquirir datos batimétricos. Este sistema tiene la posibilidad de cubrir el fondo oceánico de una manera eficaz y sencilla, por esta razón es necesario nombrar algunas de sus principales características que lo hacen ser importante en la oceanografía. Este sistema se denomina ecosonda de haz único (OHI, 2005).

1.5.3.1 Ecosondas de haz único

Este tipo de ecosondas permiten determinar 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 (OHI, 2005).

Típicamente, la principal función de la ecosonda es dar información acerca del fondo y el subsuelo marino con una resolución constante y alta, vertical al perfil del fondo en el trazado del eco. El trazado del eco, después de una buena interpretación, es muestreado y digitalizado manualmente para producir los sondeos (OHI, 2005).

Durante los últimos 20 años, la tecnología ha permitido que las ecosondas de haz único estén mejorando progresivamente con los digitadores automáticos y posiciones de anotación en el trazado de eco. Recientemente, las computadoras y los procesadores de señales han permitido que el procesado de las señales de tiempo real sea más sofisticado y la presentación de los datos o la visualización sea en color gráfico, en vez de un grabado en papel (OHI, 2005).

1.5.3.1.1 Principios de operación

Una ecosonda funciona al convertir la energía eléctrica, “del generador del pulso”, en energía acústica (OHI, 2005). Una desventaja en los transductores es que no transmiten la señal en todas las direcciones, por tanto éstos funcionan al proyectar en el agua energía acústica 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 percibida por el transductor. La fuerza del eco (también llamada el echo-strength) disminuye rápidamente con el tiempo, por esta razón el eco es ajustado automáticamente de acuerdo con su nivel de energía usando un Control de Ganancia Automática (AGC) y la Ganancia de Tiempo Variable (TVG) para comenzar el descenso del eco como una función del tiempo. Después de la amplificación la señal eléctrica es transferida a un detector de envolvente, y comparada

para el ajuste del umbral para filtrar el ruido de la señal. La señal de salida es entonces visualizada o grabada (OHI, 2005).

La profundidad se halla de la siguiente manera:

$$z = \frac{1}{2} t c \quad (1.17)$$

Donde t es el tiempo entre la transmisión y la recepción del eco y c es la velocidad del sonido en la columna de agua a razón de 1500 m/s (dependiendo de la densidad, temperatura y presión de la columna de agua por donde se propague puede variar entre 1490 m/s a 1520 m/s) (OHI, 2005).

Los siguientes parámetros de la ecosonda son importantes para dar correctamente una exactitud alta y una grabación clara del fondo marino. Estos son:

- a) **Poder:** El desempeño de la ecosonda depende de la longitud del pulso, la frecuencia y la potencia transmitida. Una de las maneras de optimizar el uso de este dispositivo se basa en mantener los valores más bajos de la potencia con la que se transmite, con el fin de obtener una buena resolución en el ecograma. Sin embargo, si el valor del poder transmitido resulta ser alto produce ecos de alto nivel pero también niveles de reverberación altos, creando una grabación pobre. El poder es limitado por el fenómeno de la cavitación¹⁰ y por el rompimiento de la presión del material de transductor (OHI, 2005).

- b) **Ganancia:** La amplificación de la señal (en el momento que el transductor emite el pulso acústico) está dada por la ganancia, al mismo tiempo este amplifica el ruido, generando una confusión de la grabación de los datos (OHI, 2005). Por esta razón, se recomienda que la ganancia sea ajustada de acuerdo con el tipo de lecho marino y la potencia de transmisión (OHI, 2005).

¹⁰ Esta corresponde a la producción de pequeños vacíos dentro del agua. Este fenómeno se produce cuando la presión acústica excede la presión hidrostática.

c) **Longitud del pulso:** En general, la longitud del pulso es seleccionada automáticamente como una función de rango de operación. La resolución vertical de la ecosonda depende de la longitud del pulso, en tanto que en los pulsos cortos son necesarios para una mejor resolución. En una situación particular, es necesario aumentar la longitud del pulso debido a las áreas de poca reflectividad o con inclinaciones excesivas (OHI, 2005).

En aguas someras, donde juegan un papel importante las altas frecuencias y por tanto la resolución es fundamental, se deben usar pulsos cortos con el propósito de reducir la probabilidad de los ecos falsos debido a la reverberación fuerte (OHI, 2005).

d) **Escala:** Corresponde a la profundidad de la escala de la ventana de grabado de la ecosonda, esto significa que al hacer un perfil batimétrico, la ecosonda automáticamente cambiará la escala de profundidad en el momento en que la batimetría cambie por ejemplo 5 a 15 m de columna de agua en un transecto particular y además el ancho del papel de grabado será fijo (OHI, 2005).

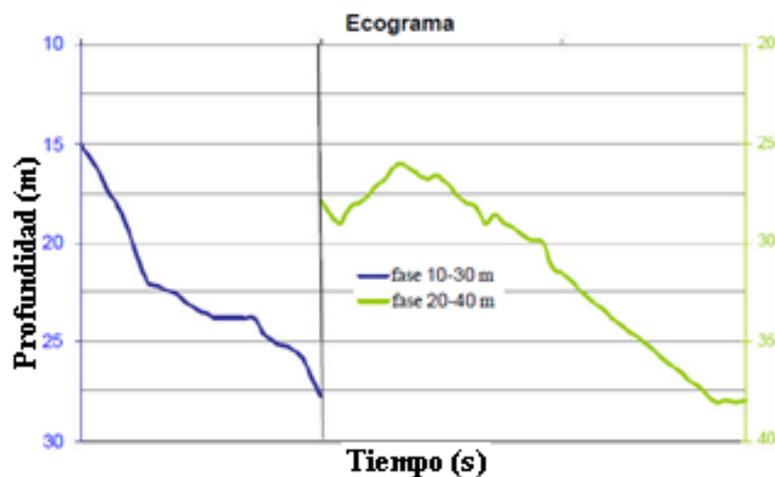


Figura 9. Escalas de grabación. Antoine (2005)

e) **Fase de escala:** La fase de escala es una manera de sobrepasar las limitaciones de la resolución de grabado impuestas por la escala de trazado del eco. La escala

de fase consiste en el grabado de sólo una ventana de profundidad que debe ser cambiada, manual o automáticamente, para mantener el grabado del fondo marino con una resolución vertical satisfactoria sin importar la profundidad del agua (Figura 9) (OHI, 2005).

- f) El calado (draft):** Consiste en la colocación del transductor en el casco del barco con respecto a la superficie del agua con el objetivo de grabar una buena profundidad. Este parámetro resulta importante porque ayuda a aislar en lo posible los ruidos ocasionados por la superficie rugosa del agua y el motor del barco. De este modo, aumenta la resolución del perfil batimétrico y disminuye el problema de los ecos falsos. Por otra parte, a la hora de hacer la adquisición sísmica, se debe corregir la profundidad teniendo en cuenta la altura que hay entre la cara del transductor y la superficie del mar con el fin que la profundidad quede bien registrada en el ecograma (OHI, 2005).
- h) La velocidad del papel:** En la ecosonda sin registro digital, la velocidad es particularmente importante y debe ser seleccionada para asegurar una buena resolución horizontal desde la medición de la profundidad (OHI, 2005).
- i) Velocidad del sonido:** La velocidad del sonido es la velocidad de propagación de las ondas mecánicas longitudinales, producidas por variaciones de presión y de las características del medio en el que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera, no depende del tono (frecuencia) ni de la longitud de onda de la onda sonora, sí es importante su atenuación. Este fenómeno se explica por la ley cuadrática inversa, que consiste en que cada vez que se aumenta al doble la distancia a la fuente sonora (transductor), la intensidad sonora disminuye en una cuarta parte. La velocidad del sonido varía ante los cambios de temperatura del medio. Esto se debe a que un aumento de la temperatura se traduce en un aumento de la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transportan la vibración, este aumento de actividad hace que aumente la velocidad (OHI, 2005).

En los levantamientos con mayor exigencia de exactitud, la velocidad del sonido puede ser fijada a los 1500 m/s y después durante el procesamiento de los datos, la profundidad debe ser corregida aplicando el perfil actual de la velocidad del sonido (OHI, 2005).

1.5.3.1.2 Instalación y Calibración

Existen tres maneras de colocar el transductor en un barco. La primera de ellas es ubicarlo bajo el casco, la segunda es montarlo en un lado, es decir, sobre el estribor y la tercera es colocarla sobre la proa. Cualquiera de estas tres formas es válida para hacer levantamientos batimétricos. El objetivo de colocarla en alguna de esas tres posiciones es aislarlas de las fuentes de ruido de la nave, tan profundo como para evitar el ruido de la superficie y permanecer sumergido hasta en las áreas rugosas (OHI, 2005).

Otro punto importante a tener en cuenta, es que el transductor debe estar asegurado y orientado verticalmente junto con la antena de posicionamiento, de manera que estén localizados ambos en el mismo eje vertical (OHI, 2005).

La calibración de la ecosonda consiste en ajustar el equipo con el propósito de asegurar la medición correcta de las profundidades. La calibración puede llevarse a cabo de dos posibles maneras: la primera con una barra de chequeo y la segunda con un transductor especial, cualquiera de ellas e independiente de cual escoja el usuario resultará satisfactoria para lograr un buen perfil batimétrico (OHI, 2005).

En aguas poco profundas, la calibración de la ecosonda para el promedio de la velocidad del sonido en la columna de agua puede hacerse de las siguientes formas (OHI, 2005):

- La barra de chequeo consiste en bajar una barra o un plato en varias profundidades (por ejemplo, cada dos metros), lográndose obtener una grabación del error de profundidad para aplicarlo luego durante el procesamiento de los datos, esto se consigue mediante el ajuste de los parámetros de la velocidad de sonido (Figura 10). En estos casos el valor adoptado para la

calibración es el valor medio de las observaciones. Este método debe ser usado bajo los 20 ó 30 m (OHI, 2005).

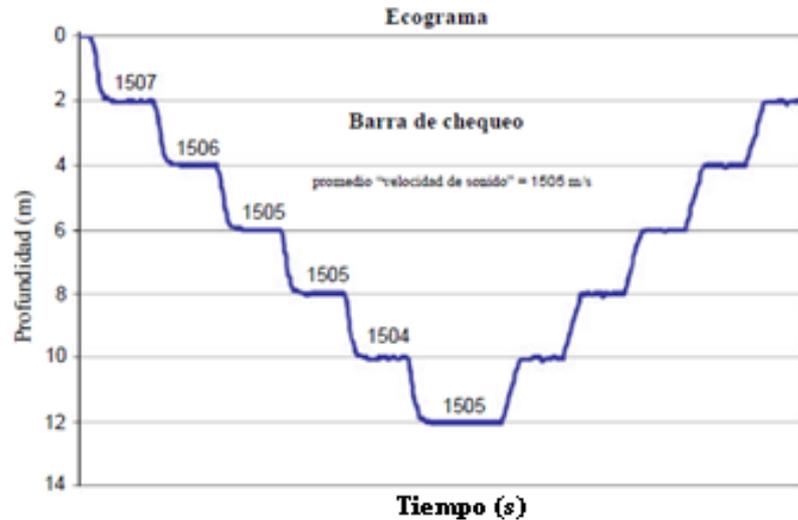


Figura 10. Ilustración de la barra de chequeo. (OHI, 2005)

- El transductor de calibración es un dispositivo diseñado para realizar la calibración conociendo una longitud exacta. El procedimiento de la calibración consiste en lograr que la ecosonda, al ajustar el parámetro de la velocidad del sonido, grabe el correcto camino de dos vías dentro del transductor de calibración. Este método es realizado a varias profundidades, cada ajuste de la ecosonda, luego de haber realizado la medición, es válido únicamente para la correspondiente profundidad. El valor de calibración utilizado debe ser la media aritmética de todas las observaciones. Este método debe ser usado bajo los 20 ó 39 m (OHI, 2005).

La corrección de la profundidad es calculada durante el procesamiento de los datos, asumiendo que los datos fueron recolectados usando la velocidad del sonido verdadera en el calado del transductor. La corrección de la profundidad se basa en la diferencia entre la velocidad del sonido usada durante la recolección de los datos y la media armónica de la velocidad del sonido calculada del perfil de la velocidad del sonido (OHI, 2005).

Para profundidades mayores a 200 m no se necesita corregir las profundidades medidas con base en la velocidad del sonido en el agua. Se utiliza para profundidades mayores, una velocidad de sonido estándar de 1500 m/s (OHI, 2005).

1.6 ¿Para qué y cómo emplear una ecosonda para clasificar lechos marinos?

Un aspecto muy importante en el uso de la energía es el examen de las características de la retro dispersión acústica y de sus relaciones con el tipo y estructura de los fondos marinos (Heald, 2000; Thorne et. al, 1988). Debido a este fenómeno, cuando una onda acústica es emitida por un transductor a través de la columna de agua e incide en el fondo marino, sufre dispersión debido a la rugosidad de los sedimentos. También puede sufrir reflexión especular cuando el sedimento se comporta como un espejo, caso de sedimentos de poca rugosidad y muy lisos (Jackson y Richardson, 2001).

La determinación del tipo de sedimento se ha logrado tradicionalmente por medio del método de la cuchara y del núcleo de muestras de sedimentos. El método de la cuchara recoge muestras donde es importante conocer solamente la superficie del tipo de lecho marino, de este modo no captura información acerca de la estructura del subsuelo del sedimento. El núcleo de sedimentos es logrado usando un cilindro largo (aproximadamente de 20 cm de diámetro) que cae por gravedad desde la superficie del agua hasta tocar fondo, de esta manera debido al potencial gravitacional y la energía cinética que adquiere durante la caída es capaz de retener varias capas del subsuelo logrando establecer una estratigrafía de la zona donde se quiere evaluar. Mientras que estos dos tipos de métodos producen un resultado definitivo y satisfactorio del tipo de sedimento, no proporcionan información sobre el alcance de los sedimentos en el fondo del mar, en otras palabras, se limita a un punto particular del fondo mas no tienen la capacidad de brindar algún registro acerca de un área específica del lecho como si lo pueden hacer los métodos acústicos. Un reporte dado por el geofísico inglés Gary John en el año 2000 en su libro “An analysis of normal incidence acoustic backscatter for seabed discrimination”, muestra que una hilera de núcleos tomados con dos centímetros de separación produce una variación significativa. La otra desventaja de recoger

muestras físicas del fondo marino es que no registra ningún detalle de la gran escala de rugosidad de la superficie (Heald, 2000; Jackson y Richardson, 2001).

Técnicas utilizadas durante los últimos 20 años para clasificar fondos marinos, entre ellas: fotografías marinas, análisis del primer y segundo eco, análisis espectral, entre otros, han sido desarrolladas con el fin de segmentar o fraccionar el tipo de sedimento utilizando recolección de datos que son originados especialmente por sidescan sonar o ecosondas multihaz. Las técnicas aplicadas en estos dos campos han sido a menudo basadas en procesamientos de imágenes de la textura de los datos más que al uso de cualquier base física, como por ejemplo: la rugosidad, el coeficiente de reflexión o parámetros geofísicos. Esto ha generado poco interés acerca de la geometría del sonar y la recopilación de los datos teniendo en cuenta que la sensibilidad dejada en los algoritmos de procesamientos de imágenes produce cambios en estos parámetros. Como los algoritmos de procesamiento de imágenes confían en los datos de entrada, un cambio en la longitud del pulso, en la frecuencia, las características del transductor y la posición del sonar resulta en cambios en la textura de la imagen. Como resultado de esto, el algoritmo fracasaría para identificar la clase de sedimento sin una retroalimentación significativa (Heald, 2000; Medwin y Clay, 1997).

Con respecto a los trabajos que se han hecho de sacar muestras físicas de sedimentos y determinar de forma fraccionada el tipo de sedimento por medio de sidescan sonar o el ecosonda multihaz, se puede decir que la importancia de emplear una ecosonda monohaz para clasificar lechos marinos es muy grande porque comparado con estos métodos de clasificación (sacar muestras físicas, procesamiento de imágenes) brinda menores costos, se procesa la información de manera más rápida y es más didáctico cuando se conoce qué parámetros se deben manejar satisfactoriamente, con el propósito de conocer cómo se retrodispersa la onda en cada clase de sedimento por medio del echo-strength.

Dos áreas deben abordarse en la categoría de clasificación del fondo marino utilizando ecosondas. Estos dispositivos se han utilizado por más de 50 años, donde su principal enfoque ha sido medir la profundidad entre la quilla del barco y el fondo del mar con el

propósito de asegurar un paso seguro a las bajas profundidades del agua. Además se han utilizado para detectar bancos de peces como también para determinar la población de éstos. En consecuencia no había una necesidad real para asegurar que el pico del eco tuviera alguna importancia para estudiar este tipo de investigaciones (Heald, 2000).

Antes de considerar el primer y segundo eco para la clasificación, muchas técnicas utilizaron principalmente el primer eco, pero los resultados no tuvieron mucho éxito (Heald, 2000). Por esta razón sistemas comerciales como RoxAnn en los años 80 mostraron que el análisis de las señales del primer y segundo eco capturadas por el transductor es suficiente para discriminar el tipo de sedimento marino siempre y cuando la onda acústica incida de manera normal a la superficie del fondo.

Para emplear una ecosonda en la clasificación de lechos marinos se empieza por adquirir información batimétrica de una línea hidrográfica a una determinada velocidad a través de una lancha oceanográfica. En esta información batimétrica no solo se obtiene la profundidad sino también se puede saber el valor del eco strength que determina cómo la onda acústica ultrasónica emitida por un transductor es capaz de discretizar el tipo de sedimento que se quiere estudiar. Según Jackson y Richardson en su libro “High frequency seafloor acoustic” dicen: “lo primero que se debe saber del eco strength es la forma como la onda interactúa con el suelo marino de manera que para sedimentos suaves (arcilla, limo, arenas finas) el valor del eco strength es mucho menor, mientras que para una onda que incide sobre una interfaz muy dura como la roca o un basamento el valor del eco strength es muy alto ya que éste depende de la presión longitudinal que ejerza con el medio (agua) y de la forma como se refleja con el tipo de tamaño de grano”.

Es importante saber que la ecosonda KNUDSEN 320 B/P es un dispositivo electrónico digital que arroja valores muy aproximados de la profundidad del agua (mar, río, represa, entre otros) y así mismo de forma indirecta se pueden saber las características del fondo del agua por medio del eco strength, esto se logra por medio de un software y un hardware integrado por una tarjeta de adquisición de datos que procesa toda la información necesaria para mostrar a través de un computador unos ecogramas que

visualizan el perfil batimétrico cuando se trata de altas frecuencias y el subsuelo marino cuando se trabaja a bajas frecuencias (ver sección 1.5.1.3.1). De este modo, para conseguir la información batimétrica el operador debe tener en cuenta cuatro parámetros importantes de entrada que logren satisfacer un buen resultado sobre los perfiles batimétricos sin obtener ruido y falsos ecos. Estos parámetros se basan en la ganancia, periodo del pulso, tx blank y la potencia, los cuales se explican con detalle en 1.5.3.1.1 en “principios de operación”. Como se puede apreciar en la figura 11, los círculos encierran los parámetros más importantes para obtener un buen registro de la profundidad y eco strength en una determinada zona marítima.

Foto tomada del software ecocontrol del ecosonda Knudsen 320 BP

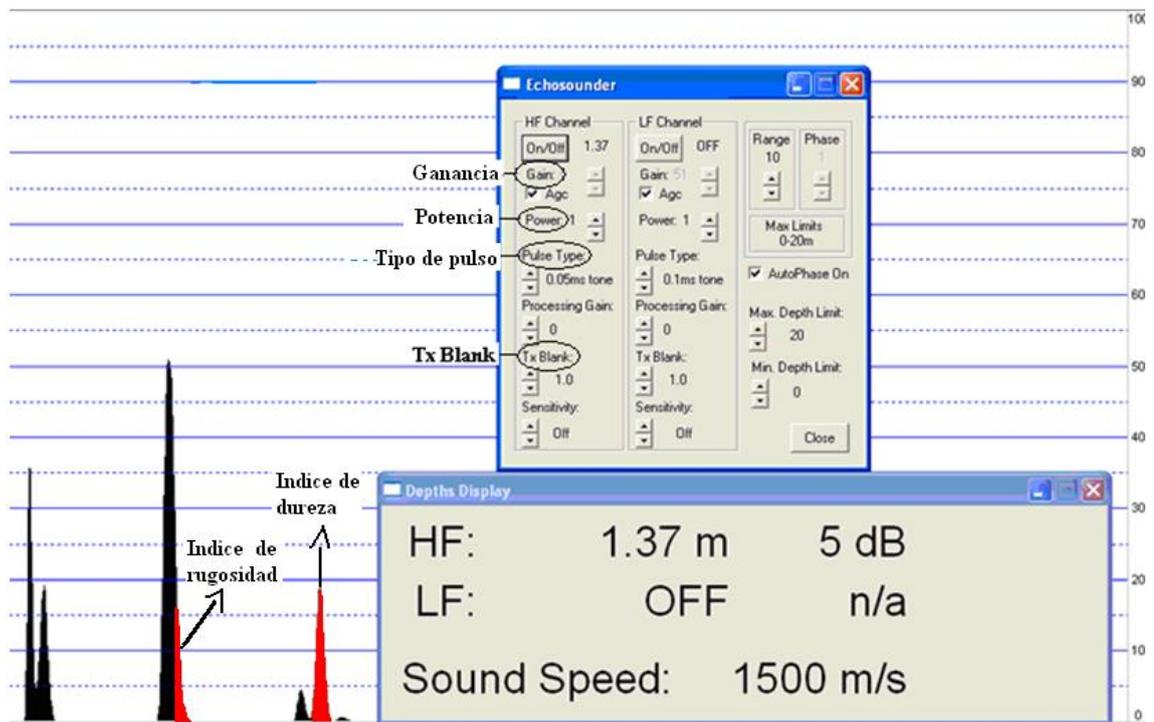


Figura 11. Parámetros de entrada en el momento de procesar una información batimétrica con el propósito de emplearla para clasificar lechos marinos.

Así mismo se aprecia en la figura 11 un letrero que indica la profundidad en metros y el valor de la fuerza del eco que ha dispersado la onda acústica a través de la interfaz agua-sedimento. Además se muestran en tiempo real los picos de la rugosidad y dureza según dicho en RoxAnn (Schlagintweit, 1993).

En el momento preciso de haber culminado la zona de prospección batimétrica y registrado sus líneas hidrográficas por medio de un HYPACK y un DGPS (Sistema de posicionamiento global diferencial) con el fin de tener las posiciones geográficas en dicha zona para localizar los puntos más interesantes, se procede por medio de un código ASCII (figura 12) a seleccionar las variables más importantes, tales como el canal de frecuencia, profundidad, eco strength, número de registro, la posición geográfica y si es necesario la hora de la prospección, entre otros.

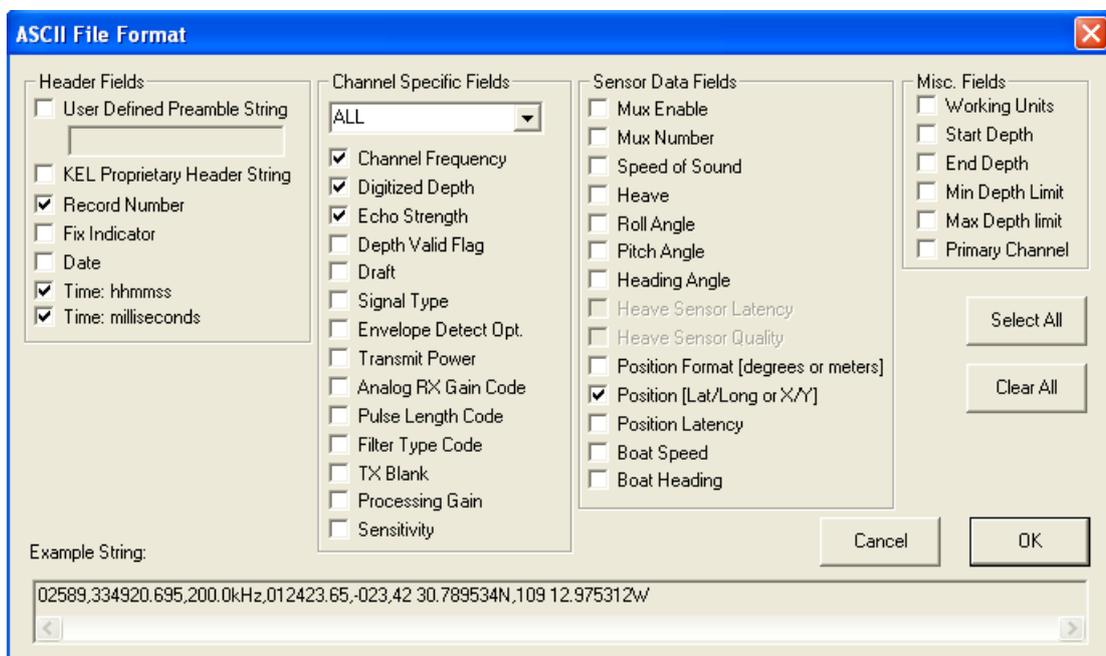


Figura 12. Código ASCII mediante el cual el usuario analiza su procesamiento batimétrico. Software Post-Survey

Es importante resaltar que antes de seleccionar este tipo de variables en el código ASCII, se debió escoger un ecograma (uno del conjunto obtenido en el recorrido batimétrico), con los puntos más interesantes con el propósito de conocer mejor su litología, como se puede observar en la figura 13.

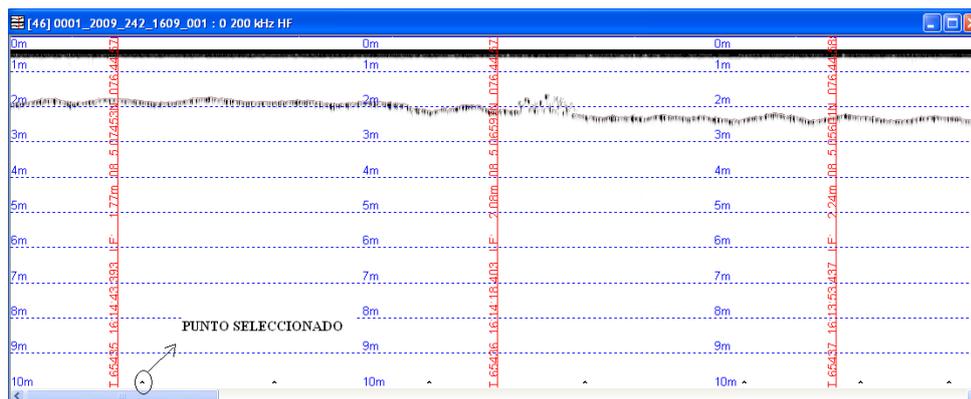


Figura 13. Ecograma de alta frecuencia con sus respectivos puntos seleccionados.
Software Post-Survey

En la presente tesis de grado se seleccionaron los puntos en los ecogramas cada 15 segundos en promedio, en algunos sectores del Golfo de Urabá para conocer las variaciones del tipo de sedimento en la primera capa de la superficie del fondo (esta diferencia se verá más adelante en el análisis de resultados).

En el software Post Survey se visualizan de manera detallada y concisa los ecogramas adquiridos en todo el trayecto batimétrico realizado en el Golfo de Urabá, por esta razón cada eco registrado puede dar información de las características del lecho marino, es decir, qué tan rugoso y qué tan duro resultó el fondo a causa de la onda acústica que se dispersó dependiendo de las características de la capa superficial, como se puede apreciar en la figura 14.

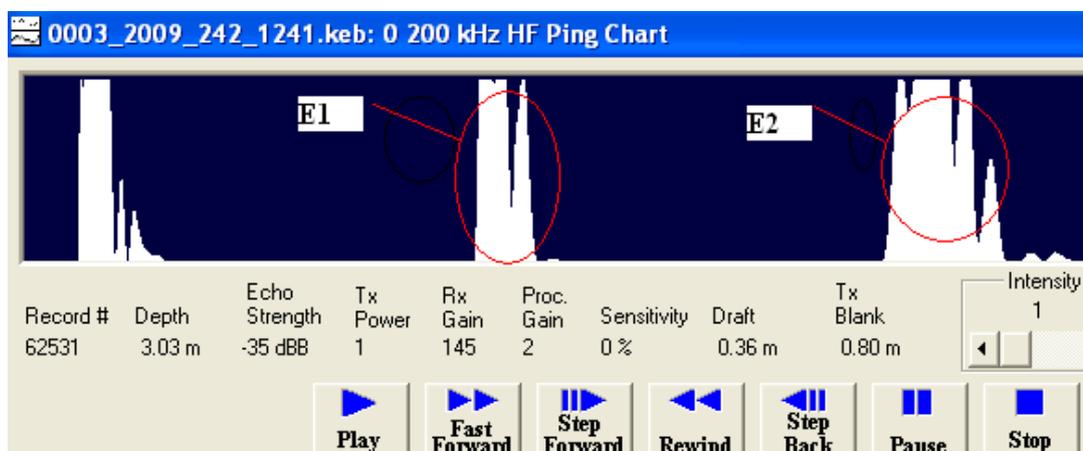


Figura 14. Según RoxAnn se puede clasificar el lecho marino siempre y cuando se conozcan las características de la magnitud de E_1 y E_2 . Software Post-Survey

Por último después de haber terminado con el filtro de los ecogramas (escoger los más relevantes sin que haya ruido y una buena resolución en los perfiles), los puntos de interés y procesado la información más importante para su posterior análisis litológico, se pensó la manera de realizar el sistema de clasificación de lecho marino por una técnica llamada energías del primer eco (E_1) y del segundo eco (E_2) basada en la teoría de RoxAnn (Schlagintweit, 1993), en la cual se dice que el procedimiento para conocer la rugosidad es integrando la intensidad de retro dispersión en función del tiempo bajo la curva de la cola del primer eco y así mismo para conocer la dureza se integra la intensidad de retro dispersión en función del tiempo toda el área bajo la curva del segundo eco. Esta técnica es muy útil debido a las medidas geofísicas que tiene implícitas, y su modelo físico hace que los resultados para discriminar el tipo de sedimento se logre de manera exitosa.

Al obtener una base de datos batimétricos con las respectivas magnitudes de E_1 (rugosidad) y E_2 (dureza), se realiza a través de un programa matemático (como Matlab) un algoritmo que permite la clasificación de los diferentes datos con el fin dar cuenta de cuántos grupos de sedimentos conforman el fondo del mar (el Golfo de Urabá), este algoritmo consta de un análisis estadístico basado en una red neuronal que es uno de los métodos más importantes para realizar clasificaciones marítimas y geofísicas (Satyanarayana y Naithani, 2007 ; Dung y Stepnowski, 2000). De este modo será importante señalar su importancia en el área de las matemáticas y ciencias afines.

1.6.1 Redes neuronales

Son una simulación de las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales, tales como un circuito integrado, un computador o un conjunto de válvulas. El objetivo es conseguir que las máquinas den respuestas similares a las que es capaz de dar el cerebro caracterizado por su generalización y robustez.

Una red neuronal (Figura 15) se compone de unidades llamadas neuronas, cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

1. Una función de propagación (también conocida como función de excitación), que por lo general consiste en la sumatoria de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria; si es negativo, se denomina inhibitoria.
2. Una función de activación, que modifica a la anterior. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.
3. Una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea (para obtener valores en el intervalo $[0,1]$) y la tangente hiperbólica (para obtener valores en el intervalo $[-1,1]$).

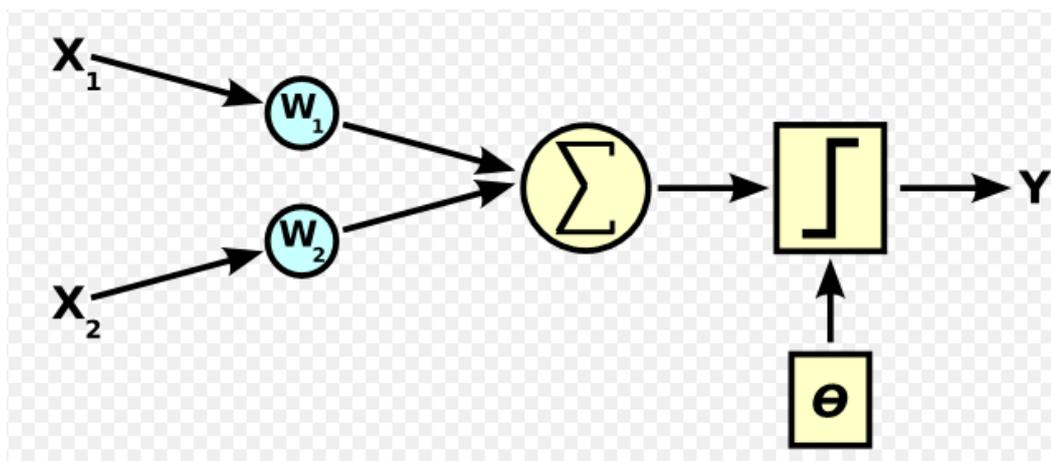


Figura 15. Modelo de una red neuronal. Martín y Sanz (2001)

1.7 ¿Qué se emplea actualmente para clasificar fondos marinos?

Actualmente existen cuatro sistemas comerciales para clasificar fondos marinos, entre ellos están RoxAnn (Schlagintweit, 1993), Quester Tangent QTC (Prager et. al, 2009), BioSonics VBT Seabed Classification Software y ECHOplus seabed discrimination. El más utilizado por los científicos por su versatilidad y la manera de

caracterizar el tipo de sedimento es el RoxAnn debido a que utiliza el primer eco que retorna del fondo para averiguar la rugosidad y el segundo eco no solo encuentra la dureza sino también la impedancia acústica que puede haber entre la interfaz agua-sedimento. Además le permite al operador en tiempo real ver simultáneamente la profundidad y al tener incorporado un amplificador, un receptor paralelo conectado al computador y a la ecosonda ver en pantalla la manera como este dispositivo electrónico va discriminando el fondo marino. La metodología de este sistema hardware es integrar la energía de la cola del primer eco e integrar todo el segundo eco con el fin de discriminar qué tan rugosa y qué tan dura es la superficie del fondo. La desventaja del RoxAnn es que no publica qué tipo de herramienta estadística utiliza para clasificar los datos adquiridos durante la batimetría, lo único que se sabe es la manera en que captura las señales de voltaje del primer y segundo eco para obtener dicha clasificación.

Los demás sistemas como QTC, Biosonics y Echoplus también tienen incorporado un sistema hardware, además aclaran que el tipo de herramienta que utilizan es el PCA (Principal Component Analysis) por el cual es un método estadístico, esta es una técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. El procedimiento que utilizan estos sistemas para caracterizar el tipo de sedimento es reconociendo la forma geométrica de cada pulso de energía de la onda que se refleja y se dispersa para cada clase de sedimento.

Las aplicaciones que tienen en común estos cuatro sistemas clasificadores son:

- Áreas de hábitat someras y profundas.
- Distribuciones de mariscos.
- Sitios de anclaje marinos.
- Residuos de derrame de petróleo.
- Sitios de investigaciones de torres de perforación petrolera.
- Operaciones de dragado.
- Oleoductos y distribuciones de cable.
- Investigaciones científicas.
- Áreas que causen desgaste o daños a la pesca.

2 MARCO TEÓRICO

La geofísica marina ha implementado tres métodos para llevar a cabo la clasificación de fondos marinos por medio de una ecosonda que trabaje a altas frecuencias. Un aspecto importante en cada uno de los tres métodos es que se basan en enfoques distintos para determinar las características del tipo de sedimento, en consecuencia, el primero de ellos es la dimensión fractal a través del cual suponen que la capa de la superficie del lecho tiene estructura fractal (Tegowski y Lubiniewski, 2000), el segundo método consta del momento espectral donde es importante analizar el dominio de la frecuencia de la forma de la señal del eco (Tegowski y Lubiniewski., 2002) y el tercero es el momento estadístico en el dominio del tiempo donde es crucial estudiar la energía de la onda de dispersión en función de la intensidad en series de tiempo.

2.1 Dimensión fractal

Un conjunto fractal está definido como un objeto geométrico de escala invariante (es decir auto similar), esto significa que el objeto puede ser descrito como una unión de copias que se repite en si misma a diferentes escalas. En la naturaleza, las estructuras fractales son encontradas, por ejemplo en las nubes, copos de nieve, hojas y el fondo marino corrugado (rugoso). Sin embargo, las piezas más pequeñas a diferentes escalas de estas estructuras de la naturaleza no son estrictamente idénticas a las piezas más grandes, pero son estadísticamente similares. El análisis fractal sirve para estudiar tal elemento, más aun, quizás que la geometría Euclidiana, el cual es más apropiado para una descripción simple, de figuras regulares. La idea de utilizar la dimensión fractal es con el propósito de caracterizar los ecos originados por los ecosondas que vienen de asumir que el fondo marino corrugado o rugoso deja una huella digital en la señal del eco (Lubiniewski y Stepnowski, 1998). La estructura fractal no solo se encuentra en la superficie del sedimento mediante la auto similitud de ondas de arenas (sand ripples) de diversos tamaños de grano, sino también en la mayor parte como capas de distinta impedancia acústica. Así, la rugosidad de la superficie y el volumen de dispersión podrán llevar a contribuir a la señal del eco a evidenciar la estructura fractal (Walree et. al, 2005).

En el análisis fractal es necesario aplicar un método para medir y comparar las dimensiones de un objeto, por lo que se utiliza la dimensión de Hausdorff, que está definida como el límite (Mandelbrot, 1982; Walree et al., 2005):

$$D_H = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{-\log N(r)}{\log r} \quad (2.1)$$

Donde $N(r)$ denota el número más pequeño de bolas abiertas $B(p, r)$ de posición p y radio r necesario para cubrir por completo el objeto. $B(p, r) = \{x: \text{dist}(x, p) < r\}$, donde $\text{dist}(x, p)$ es la distancia entre el punto x y p . Se verifica fácilmente que las variaciones de la dimensión Hausdorff son una medida de la complejidad de la forma de una figura dada (Walree et al., 2005).

Para mostrar cómo la dimensión de Hausdorff describe algunas propiedades de una figura dada, en la figura 16 se presenta la idea de la dimensión de la caja calculada para una gráfica de una variable, asumiendo que la función fractal está en un plano (Lubniewski y Stepnowski, 1998). Está probado que todas las veces la dimensión de la caja está definida para un conjunto dado de X , por tanto es igual a la dimensión de Hausdorff. La dimensión de la caja es más fácil calcularla que utilizando la dimensión de Hausdorff. La dimensión de la caja está definida para una figura plana como (Walree et al., 2005). :

$$D_{box} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{-\log N(\Delta s)}{\log \Delta s} \quad (2.2)$$

Donde $N(\Delta s)$ denota el número de cajas en una cuadrícula de escala lineal Δs por el cual se conoce el conjunto X . (Walree et al., 2005).

La dimensión de Hausdorff es calculada como una medida de la “rugosidad” del fondo marino de la señal del eco (Walree et al., 2005), por lo que este método solo se interesa por investigar las propiedades del primer retorno de la señal acústica.

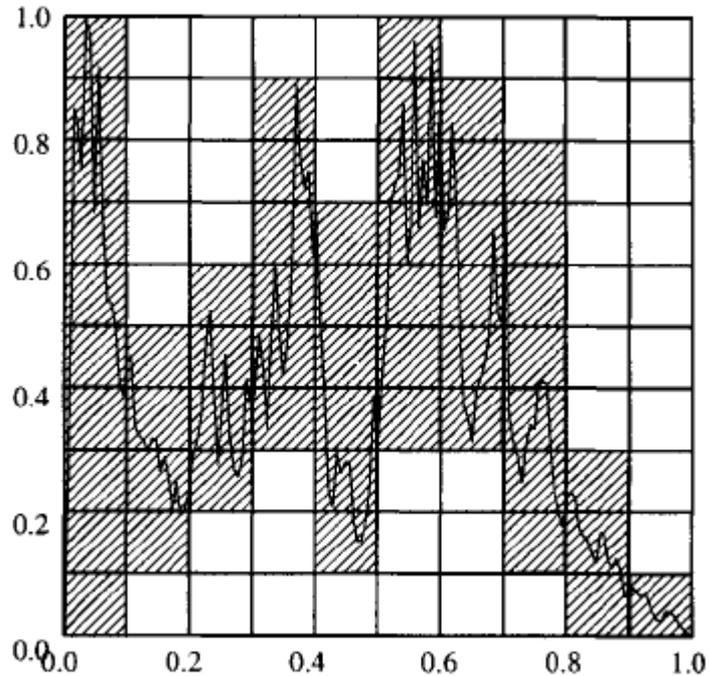


Figura 16. Ilustración de una etapa de la dimensión de la caja calculada para una gráfica de una variable de la función en un plano. En este caso el número de cajas para $\Delta s = 0.1$ fue calculado y $N(\Delta s) = 54$. Tegowski y Lubniewski (2000)

2.2 Momento espectral

Un tercer método para determinar las características del fondo marino por medio de la señal del eco se calcula con el dominio de la frecuencia. El Momento Espectral se suele utilizar para describir la forma del eco del espectro acústico. A medida que el orden N va aumentando, los momentos son cada vez más sensibles a la presencia de los componentes de alta frecuencia. Junto con la asimetría espectral, una medida de ésta proporciona información condensada a la rugosidad del fondo o en las capas sedimentarias. Su definición es análoga a los momentos en el dominio del tiempo (sección 2.3). Sea $S(w)$ la densidad espectral de potencia de la señal del eco $s(t)$. El momento espectral M de orden N es definido como (Tegowski y Lubniewski Z, 2002; Tegowski, 2001; Tegowski et. al, 2003):

$$M_N = \int_0^{\infty} S(w)w^N dw \quad (2.3)$$

Para $N = 0$ se obtiene la diferencia de la señal, por lo cual es igual al eco de la energía de la ecuación (2.5 y 2.6). El momento espectral del segundo orden ($N = 2$) describe la concentración de la potencia espectral alrededor de la frecuencia media del espectro del eco. Notar que la definición de la ecuación (2.3) asume que la máxima energía está en o cerca de la frecuencia cero, que es de hecho un caso particular para la señal del eco. Finalmente, la asimetría espectral γ está definida por (Walree et al., 2005):

$$\gamma = \frac{\tilde{M}_3}{\tilde{M}_2^{3/2}} \quad (2.4)$$

Donde \tilde{M}_i son los momentos centrales de orden i .

2.3 Momento estadístico en el dominio del tiempo

Las energías del eco se derivan de la intensidad $I(t)$ que varía cuadráticamente con el registro del voltaje, el cual es proporcional a la presión del sonido (Walree et al., 2005).

El método se basa por caracterizar al fondo marino por medio de la energía de la cola del primer eco que retorna del fondo marino en función de series de tiempo de la intensidad de retro dispersión, esto indica la rugosidad y la energía del segundo eco que consiste en integrar toda el área bajo la curva de la intensidad de retro dispersión indicando la dureza y una medida indirecta de la impedancia acústica, el mecanismo de hallar la energía del segundo eco se fundamenta en una onda acústica que se refleja en el fondo del mar, luego se refleja en la superficie del mar, posteriormente se dispersa hacia el lecho marino por segunda vez y por último se refleja hacia la posición donde está el transductor, de esta manera el E_1 (rugosidad) y el E_2 (dureza) se expresan de la siguiente manera (Heald, 2000):

$$E_1 = \int_{t_1}^{t_2} I_{bsl}(t) dt \quad (2.5)$$

$$E_2 = \int_0^{t_3} I_{bs2}(t) dt + \int_{t_3}^{t_4} I_{bs2}(t) dt \quad (2.6)$$

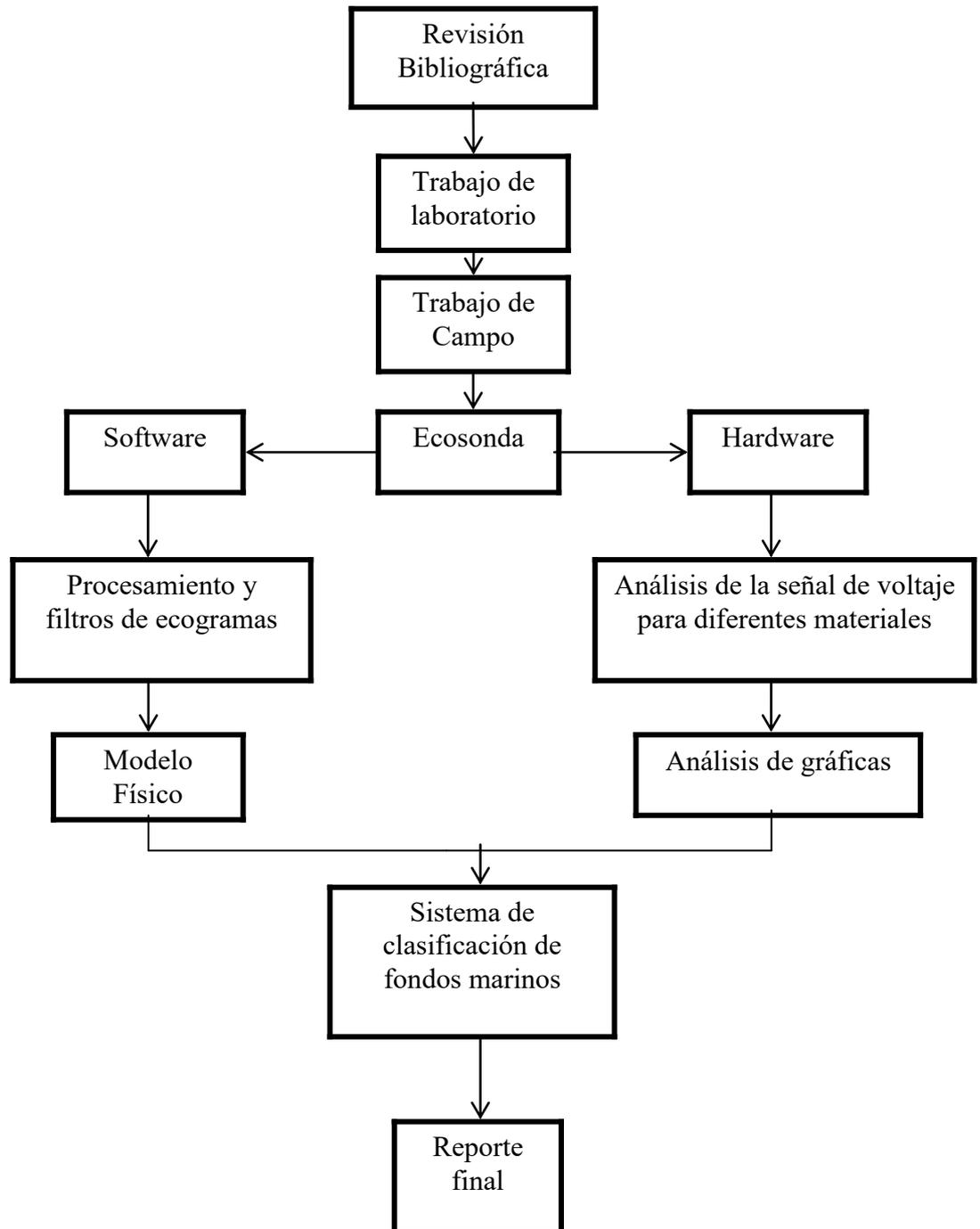
Las ecuaciones 2.5 y 2.6 son suficientes para discriminar el tipo de sedimento desde el más suave y liso hasta el más rugoso y duro (arcilla hasta la roca).

Las variables geofísicas que tienen implícitas las intensidades de primer y segundo eco (también se puede decir backscattering) son: el coeficiente de la reflexión acústica, la presión de la onda acústica, rms de la rugosidad de la superficie, rms de la rugosidad de la correlación de la superficie del fondo, el ángulo de apertura, la intensidad acústica, la fuerza del eco (echo strength), la profundidad, entre otros. Éstos ayudan a determinar de manera aproximada en función del tamaño del grano del sedimento los posibles grupos que se encuentran en una línea hidrográfica dada.

Este método se ampliará con más detalle en la metodología debido a que en el presente trabajo de grado se utilizó este sistema para discriminar los fondos del Golfo de Urabá.

3 METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo de grado se basó en el siguiente esquema.



Para la implementación de un sistema de clasificación de fondos marinos se comenzó por hacer una revisión bibliográfica acerca de las características de manejo de la ecosonda (explicadas en 1.5) tanto del software como del hardware, en consecuencia se tuvieron en cuenta los principios físicos más importantes para que se pudieran llevar a cabo las pruebas preliminares en el laboratorio y posteriormente aplicarlas en la salida de campo del Golfo de Urabá. Luego de analizar los parámetros de entrada del software, las condiciones ambientales de cómo la ecosonda tiene una mayor eficiencia al momento de realizar la batimetría, se procedió a realizar un estudio detallado sobre los diferentes métodos que posiblemente podrían clasificar/discriminar el lecho marino del Golfo.

Con la revisión bibliográfica realizada se aplicaron los conceptos en el laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT con el fin de que el dispositivo funcionara de manera satisfactoria, más tarde estos conocimientos y experiencia adquiridos en el laboratorio se aplicaron en el estudio batimétrico realizado en el Golfo de Urabá durante tres etapas: la primera fue a finales de Agosto y a principios de Septiembre del año 2009, la segunda fue realizada del 17 al 20 de Septiembre y finalmente la tercera etapa se desarrolló del 8 al 11 de Noviembre del mismo año.

Al finalizar la salida de campo, los registros adquiridos por la ecosonda se almacenaron en un archivo llamado .KEA y .KEB que permitió visualizar y simular los ecogramas con sus respectivos ecos y determinar así qué lugar del trayecto hidrográfico tenía ruido y mala adquisición de datos. Así mismo, se hizo un análisis con diferentes materiales en el laboratorio donde se capturó el voltaje que se registraba por medio del transductor, con el propósito de caracterizar la curva de voltaje versus varios parámetros de la ecosonda, entre ellos la ganancia, la amplitud de la señal en porcentaje y el echo-strength, esto con el objetivo de analizar si la variación del voltaje depende o no del echo strength a medida que la amplitud de la onda acústica va decreciendo cuando se propaga en la columna de agua y finalmente incide en el fondo del agua.

El modelo físico se desarrolló y se analizó después de procesar y filtrar los 105 ecogramas que se adquirieron con el software PostSurvey, de modo que las variables

más importantes para implementar en el método del momento estadístico en el dominio del tiempo dado por este software fueron la profundidad y el eco strength. Las demás variables geofísicas como la intensidad acústica, la presión acústica y el coeficiente de reflexión fueron calculadas a través de la profundidad y el eco strength. Estos cálculos geofísicos se hicieron con el software Excel con el fin de configurar una base de 3740 datos de los registros almacenados por la ecosonda durante la batimetría.

Se finalizó todo el análisis y se desarrolló el modelo, por último se implementó el sistema de clasificación del lecho marino aplicando la herramienta Matlab, con el que se programó el método estadístico (Método de clustering de clasificación euclidiano complete) y posteriormente la red neuronal LVQ2. Este sistema de clasificación EXCEL-MATLAB permitió visualizar con el apoyo del método RoxAnn (Schlagintweit, 1993) la distribución espacial de los sedimentos en la superficie del Golfo. Este sistema determinó de manera aproximada qué tan duro y rugoso se conformaba todo el relieve marino del Golfo.

El último paso de la metodología es mostrado empleando el mapa del Golfo, los datos con sus respectivas clases de sedimento y la gráfica de E_1 (rugosidad) vs E_2 (relativo a la dureza) de la zona batimétrica.

3.1 Trabajo de laboratorio

En el trabajo de laboratorio se planteó una metodología para hacer no solo ensayos con la ecosonda sino también fijar al transductor en el medio del tanque (figura 17), de manera que las pruebas experimentales con los diferentes materiales resultara con la mínima reverberación o falsos ecos debido a que la onda acústica se refleja de distintas maneras a causa de la rugosidad y la dureza de los materiales como el concreto, la platina de acero y la grava de dos tamaños de granos diferentes, de forma que en los ecogramas se visualizaran únicamente el fondo del tanque mas no las paredes de este (este problema se puede ver por medio de la escala de la profundidad del ecograma, como se aprecia en la figura 18).



Figura 17. Tanque donde se sumergió el transductor de 200 y 28 kHz, la cuerda que lo sostiene está ubicada en el centro de la tapa para asegurar que el patrón de radiación del transductor no interfiera en las paredes del tanque.

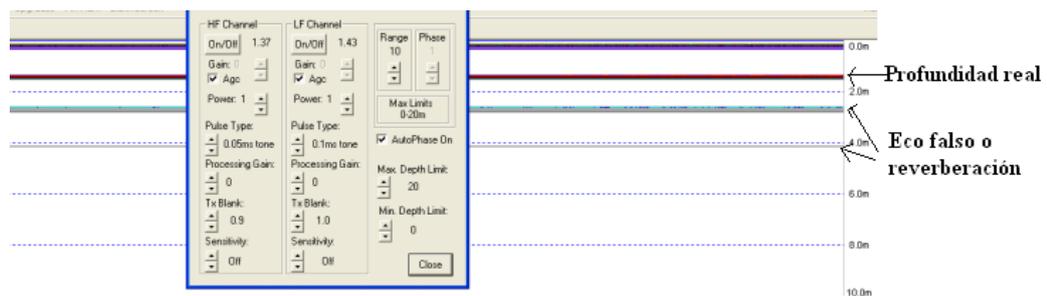


Figura 18. Ecograma que muestra ecos falsos y profundidad real del tanque a altas frecuencias.

Las pruebas experimentales en el laboratorio fueron con el objetivo de analizar la respuesta de la diferencia de potencial del material piezoeléctrico del transductor de 28 y 200 kHz debido a la onda acústica que se reflejaba en cuatro distintos materiales de modo que la energía dispersada de la onda en función del tamaño de grano se relacionaba con la respuesta del voltaje de la ecosonda.

Los materiales empleados fueron la grava, platina de acero y el concreto. En la grava se utilizaron dos tipos de tamaño, la primera de 100 mm de diámetro en promedio denominada cobble y la segunda de 31 mm de diámetro en promedio denominada pebble, se utilizó una platina de acero con un área de 1616.04 cm^2 y por último el

fondo del tanque que se conforma de concreto. En la figura 19 se pueden apreciar las muestras de las diferentes gravas y la platina de acero. El procedimiento para hallar el área exacta de estas muestras en un balde se logró teniendo en cuenta la profundidad entre el transductor y el fondo del tanque, que consistió en medir la cobertura del haz del transductor con el fin de que todo el patrón del haz acústico incidiera sobre dicha muestra (la cobertura se explica en la sección 1.5.2.5).



Figura 19. Materiales utilizados en los ensayos de laboratorio teniendo en cuenta el área de cobertura del haz acústico

3.2 Trabajo de campo

En el trabajo de campo se utilizó una lancha con los equipos oceanográficos, un Sistema de Posicionamiento Global de tecnología STAR FIRE y un sistema HYPACK para localizar la lancha en su respectivo trayecto hidrográfico. En la figura 20 se puede apreciar la lancha donde se tomaron las mediciones batimétricas durante todo el transcurso del proyecto, así mismo se muestran los equipos instalados en sus respectivas posiciones.



Figura 20. Lancha en la que se instaló la ecosonda y el GPS.

En la figura 21 se muestran las partes de una embarcación, de modo que el GPS y el transductor estuvieran colocados a babor. Sin embargo también se pudo haber colocado en la proa o en el estribor (ver sección 1.5.2.4.3) de manera que los instrumentos geofísicos estuvieran alejados del ruido causado por el motor de la lancha y así mismo el transductor se instaló en una posición tal que la superficie del agua (las olas del mar) no interfiriera en las señales acústicas generadas por el transductor de 12/200 kHz, como se puede apreciar en la figura 22.

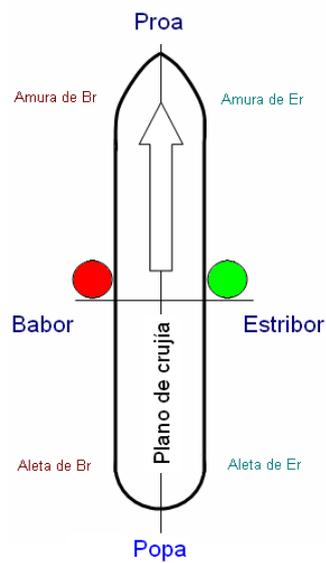


Figura 21. Partes de una lancha oceanográfica. OHI (2005)

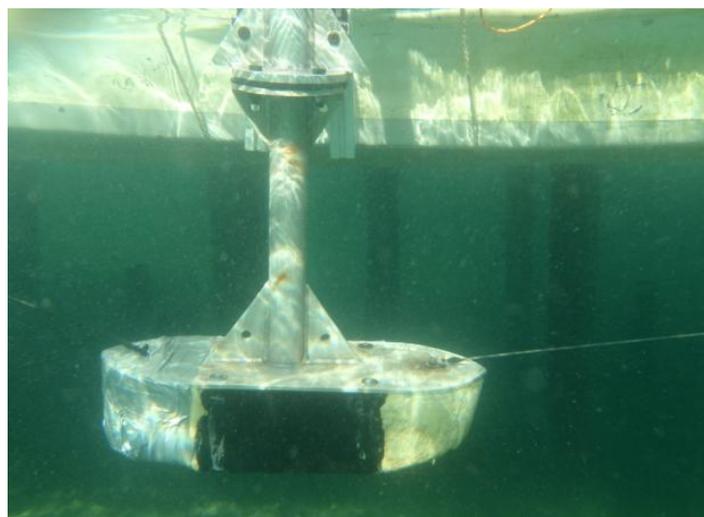
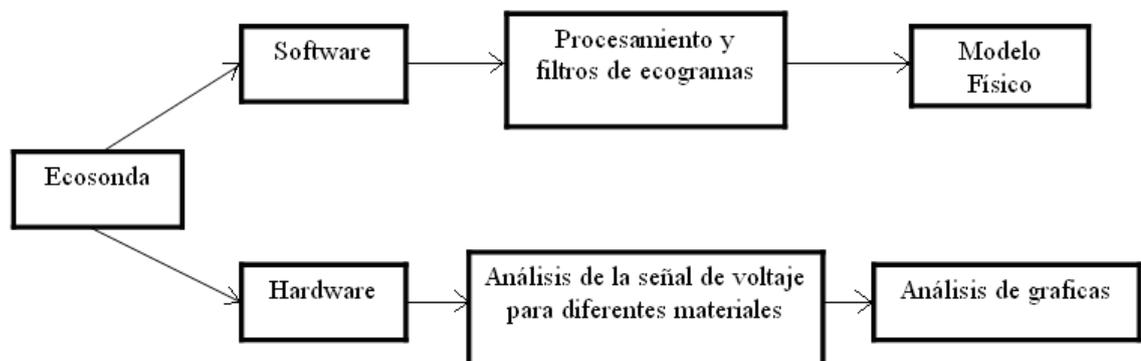


Figura 22. Transductor sumergido a una determinada profundidad del casco de la lancha para evitar falsos ecos y mala señal.

En el trabajo de campo se utilizó un transductor de 12 y 200 kHz (figura 22), mientras que en el trabajo de laboratorio se empleó un transductor de 28 y 200 kHz de la empresa KNUDSEN. La razón de haber trabajado con distintos transductores en el laboratorio y en la salida de campo se debe al hecho que las pruebas experimentales en el laboratorio fueron dedicadas al trabajo con materiales en superficie ya que el fondo del tanque se conforma de concreto, de modo que no era necesario utilizar un transductor de bajas frecuencias, por otro lado en el trayecto batimétrico del Golfo se empleó el transductor de 12 y 200 kHz debido al interés de analizar el subsuelo marino porque el Golfo de Urabá está formado por grandes espesores de sedimentos.

3.3 Ecosonda

En el siguiente diagrama se muestra la manera como se abordó el proyecto con la utilización de la ecosonda, cuyo instrumento se trabajó en dos partes: en el software y en el hardware con el fin de obtener un buen sistema de clasificación.



La Ecosonda empleada fue una KNUDSEN 320 B/P como se muestra en la figura 23, con dos canales uno de alta, otro de baja frecuencia, un portátil incorporado para visualizar los ecogramas y la profundidad en formato digital.



Figura 23. Ilustración de la ecosonda 320 B/P de KNUDSEN con su respectivo portátil.

3.3.1 Software

Se emplearon tres software que fueron fundamentales para identificar las características del lecho marino y posteriormente sirvieron para la implementación de manera indirecta del sistema de clasificación (ver sección 3.4). El primer software que se utilizó fue un programa llamado eco-control, su función principal consistió en brindar información en tiempo real acerca de la batimetría (altas frecuencias, 200 kHz) y el subsuelo marino (bajas frecuencias, 12 kHz) del Golfo de Urabá. El segundo software que se empleó fue el PostSurvey con el objetivo de filtrar, procesar y ver la simulación de los diferentes ecos de todos los registros adquiridos en la batimetría del proyecto. Por último se utilizó Microsoft Excel para construir una base datos de los 105 perfiles batimétricos logrados por la ecosonda, en estos perfiles se seleccionaron los ecos más relevantes, de manera que se pudieran procesar y hacer los respectivos cálculos geofísicos en Excel para finalmente desarrollar el modelo matemático que correspondía al modelo físico en este programa, teniendo en cuenta las variables entregadas por el software PostSurvey y aquellas variables que fueron resueltas.

En las siguientes dos secciones se explicará con mayor detalle el procesamiento y filtros de los registros de diversos ecogramas de altas frecuencias que llevaron a determinar de forma numérica el modelo físico para así tener una matriz de datos de entrada en el sistema de clasificación.

3.3.1.1 Procesamiento y filtrado de los ecogramas

En esta etapa se logró procesar 105 ecogramas de altas frecuencias (200 kHz) que representan únicamente la superficie del fondo del mar. A partir del software eco-control se grabaron todos los registros batimétricos en unos archivos denominados .KEB y .KEA que facilitan al usuario ver todos los perfiles y así mismo visualizar con detalle la simulación de cada eco que se registró en la ecosonda, como se puede ver en la figura 24. La funcionalidad del archivo .KEB es filtrar aquellos registros que no alcanzaron a dar una imagen clara acerca de la batimetría, este filtro se obtiene por medio de un código ASCII que ayuda a seleccionar no solo los principales parámetros empleados en el análisis del tipo de sedimento, también permite antes de ser procesados los registros escoger los ecos más representativos que pueden ser de especial interés para el geofísico o geólogo.

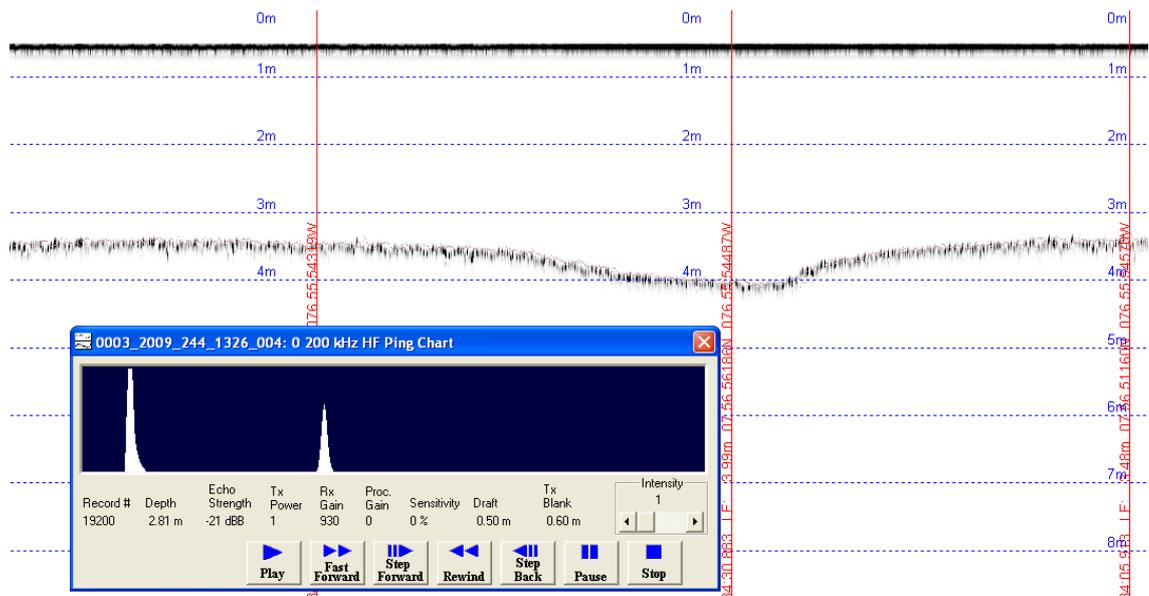


Figura 24. Ecograma de alta frecuencia con su respectivo perfil batimétrico del fondo y la simulación de los registros de cada eco mostrando la variación de la profundidad y eco strength

Durante la adquisición de los datos batimétricos, no todos los ecogramas logrados por la ecosonda 320 B/P tuvieron buenos resultados, debido a que en algunos sectores de la línea del trayecto hidrográfico la densidad, la temperatura o la salinidad de la columna del agua eran muy variados, de esta manera la onda acústica emitida por el transductor a

medida que se propagaba en el agua para dar información acerca de la profundidad y del eco strength resultaría en algunos sectores del recorrido con mayor energía de reflexión como en otros con menor energía, de forma que dependiendo de la magnitud de la intensidad con que se halla reflejado, los resultados finales se verían en los ecogramas, como se puede apreciar en la figura 25, donde se aprecia que en un sector hubo ruido por la falta de potencia y ganancia de la onda originada por el material piezoeléctrico del transductor, como también podrían encontrarse en la columna de agua muchos organismos u objetos que no dejaron visualizar muy bien la batimetría, por otro lado la parte derecha de la figura 25 logró adquirir buena información del fondo marino debido a que hubo menores pérdidas o atenuación de la onda. Los ruidos que aparecen en los ecogramas digitales no se deben tener en cuenta al momento de procesar los datos ya que no son útiles para clasificar el tipo de sedimento.

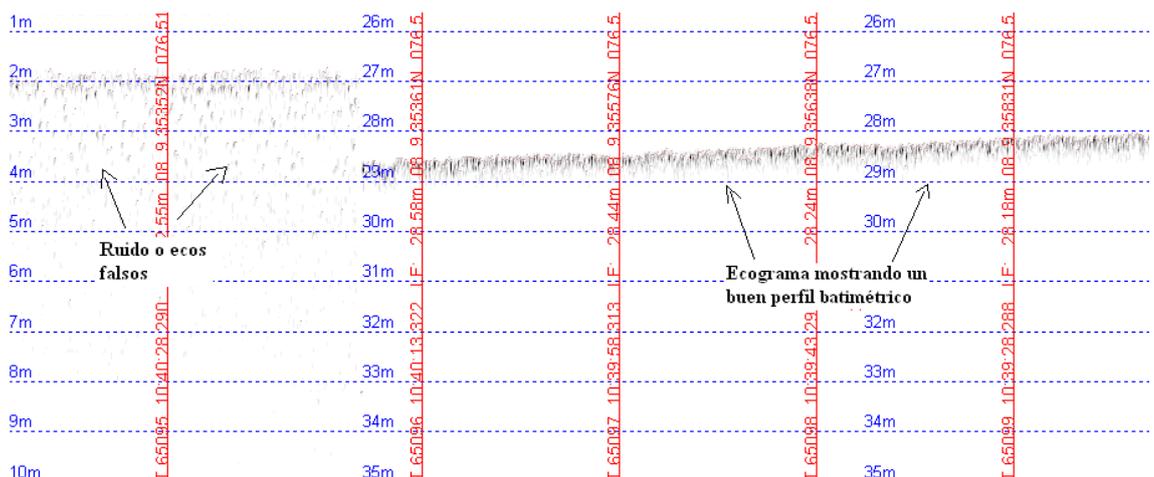


Figura 25. Ecograma mostrando las regiones donde se tuvo ruido y una buena resolución del perfil.

Luego de seleccionar los ecogramas más representativos y en lo posible con menor ruido, se procede como en la figura 26 a escoger los puntos que el usuario considera que son los más relevantes para su posterior clasificación (en el Anexo A se muestran los ecogramas de 12 y 200 kHz). El muestreo de los puntos sería ideal en un intervalo periódico o regular de tiempo, es decir, los puntos deberían estar en el mismo intervalo de tiempo (en el proyecto se determinó que fuera cada 15 s de la toma del registro) con el fin de analizar cuanto varió el tipo de sedimento superficial.

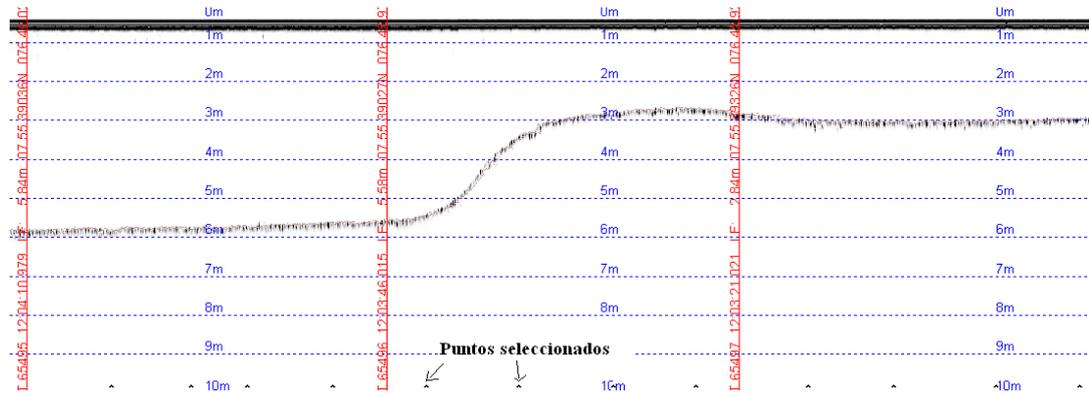


Figura 26. Ecograma mostrando los puntos de mayor interés para determinar la clase de sedimento

El paso que sigue después de seleccionar los registros (o ecos) más importantes de la batimetría, es acceder al formato del código ASCII (figura 27) que contiene las variables donde se permite analizar registro por registro cuáles fueron las características que tuvo la onda acústica al incidir en el fondo marino. El código está conformado por cuatro columnas diferentes. La primera columna de izquierda a derecha permite visualizar la cantidad de registros (o ecos) obtenidos por la ecosonda como también la hora de la toma de éstos. La segunda columna se caracteriza por dar información acerca del uso de la frecuencia, profundidad y el eco strength. El resto de las variables dependen del interés del usuario que quiera estudiar las características de cada eco de acuerdo con su aplicación. La tercera columna es aplicar las correcciones de la profundidad por movimientos de cabeceo, balanceo y guiñada de la lancha, estos campos se dejaron vacíos ya que no se utilizaron en la batimetría, estos dispositivos se denominan sensores de movimiento. Por último, la cuarta columna son las unidades de trabajo (metros o pies) así como también los límites de la profundidad establecidos para cada zona.

La funcionalidad del código ASCII es procesar y filtrar los registros más importantes que sirven como datos de entrada al sistema de clasificación de lechos marinos.

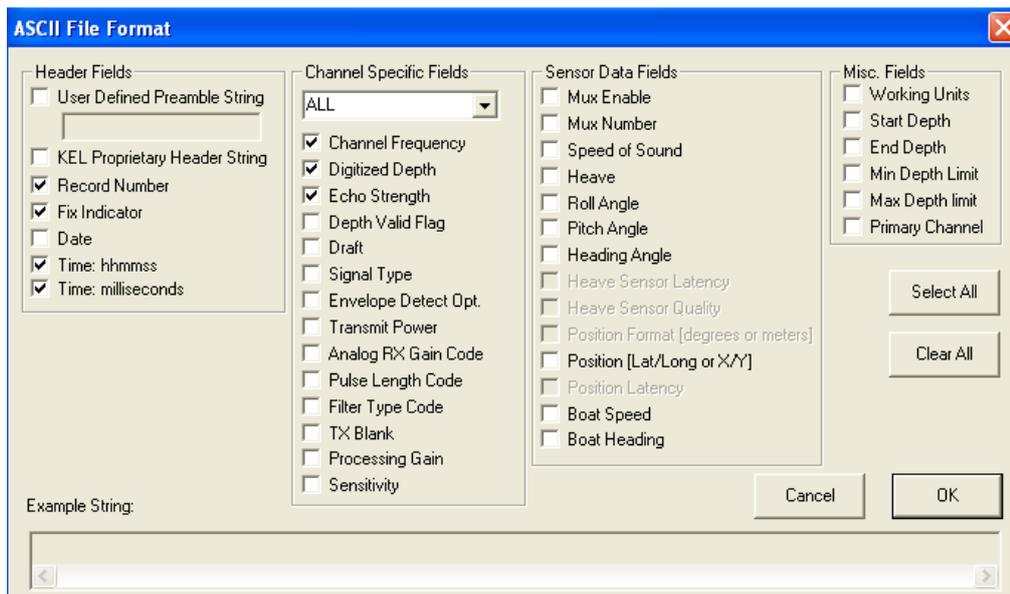


Figura 27. Formato en código ASCII donde se muestran varios parámetros que se analizaron en la batimetría.

Finalmente la figura 28 es una muestra de los 3740 datos procesados y filtrados a lo largo de todo el recorrido batimétrico en el Golfo de Urabá en el formato .KEA. A partir de este formato los datos se exportaron a EXCEL, con el propósito que fueran la base para el análisis y el cálculo de la magnitud de la energía del primer (rugosidad) y segundo eco (dureza).

RecNum	hhmmss.sss	Freq	Depth	Strength	Lat/Y	Long/X
47858	95256.067	200kHz	20.63	-057,08	09.503391N,076	47.043657w
47825	95253.310	200kHz	20.73	-058,08	09.502448N,076	47.042331w
47795	95250.813	200kHz	20.64	-063,08	09.501849N,076	47.041419w
47761	95247.979	200kHz	20.78	-062,08	09.501011N,076	47.040038w
47724	95244.895	200kHz	20.50	-056,08	09.500252N,076	47.038665w
47676	95240.895	200kHz	20.57	-056,08	09.499388N,076	47.036623w
47636	95237.559	200kHz	20.57	-054,08	09.498853N,076	47.034252w
47593	95233.978	200kHz	20.57	-059,08	09.498720N,076	47.032059w
47537	95229.309	200kHz	20.50	-057,08	09.499245N,076	47.026834w
47499	95226.145	200kHz	20.40	-059,08	09.500270N,076	47.021695w
47438	95221.066	200kHz	20.39	-059,08	09.501695N,076	47.012486w
47390	95217.065	200kHz	20.32	-058,08	09.502592N,076	47.005030w
47357	95214.312	200kHz	20.13	-055,08	09.503186N,076	46.999347w
47341	95212.978	200kHz	20.20	-054,08	09.503318N,076	46.997441w
47295	95209.145	200kHz	20.34	-058,08	09.503803N,076	46.989770w
47242	95204.728	200kHz	20.00	-058,08	09.503981N,076	46.980025w
47203	95201.478	200kHz	19.97	-053,08	09.504177N,076	46.974177w
47146	95156.728	200kHz	19.82	-055,08	09.504406N,076	46.964754w
47097	95152.644	200kHz	19.91	-055,08	09.504514N,076	46.957372w
47060	95149.561	200kHz	19.75	-057,08	09.504590N,076	46.951879w
46989	95143.645	200kHz	19.67	-057,08	09.504107N,076	46.941011w
46942	95139.728	200kHz	19.53	-057,08	09.502668N,076	46.933637w

Figura 28. Formato .KEA donde muestra las variables más importantes de la batimetría con los respectivos datos.

3.3.1.2 Modelo Físico

Para entender el mecanismo que permite discriminar la clase de sedimento utilizando el método del primer y segundo eco, siempre y cuando se cumpla que el pulso acústico (onda acústica) incida normal al lecho marino, fue necesario desarrollar las ecuaciones de la intensidad de retro dispersión (backscattering) en series de tiempo para cada uno de los retornos. Para el primer eco la principal región será la cola inferior, mientras que la región de estudio para el segundo eco es sobre toda el área bajo la curva del pico, como se aprecia en la figura 29, en ella se muestra una gráfica de la amplitud de la señal versus tiempo y en la figura 30 es una representación real de la onda acústica interactuando con el fondo marino. La magnitud del valor calculado de la energía del primer y segundo eco se logra mediante la integración en series de tiempo. Estos se representan por medio de E_1 y E_2 ya que representan la integral en función del tiempo de la intensidad de retro dispersión o backscattering (Heald, 2000).

La gráfica de E_1 versus E_2 muestra la manera de clasificar los diferentes sedimentos que pueden estar conformando el lecho marino, de este modo puede dar un índice desde lo más suave a lo más duro y de lo más liso a lo más rugoso, como lo hace el sistema comercial RoxAnn discriminando el tipo de lecho calculando los valores de E_1 y E_2 .

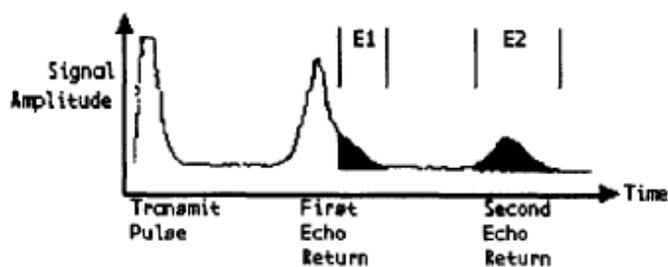


Figura 29. E_1 indica rugosidad, E_2 relativo a la dureza (impedancia acústica).
Schlagintweit (1993)

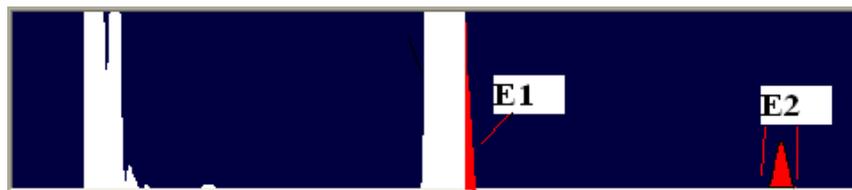


Figura 30. Representación real del primer eco y segundo eco para discriminar el lecho marino. Software Post-Survey.

En esta sección las ecuaciones para la obtención de la energía emitida por el primer y segundo eco en series de tiempo serán desarrolladas, además de las ecuaciones para la integración en función del tiempo.

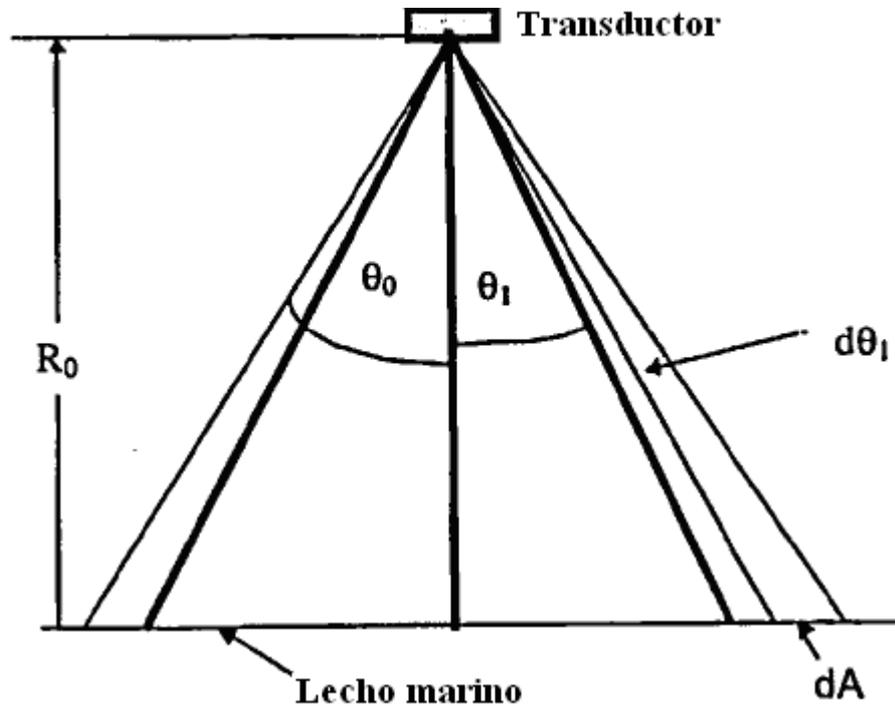


Figura 31. Geometría para el primer eco. θ_0 : ángulo de incidencia de la fuente; θ_1 : ángulo medio que permite calcular un diferencial para toda el área de cobertura (Heald y Pace, 1996)

El primer eco que se origina al reflejarse en la superficie del sedimento utilizando la geometría monoestática (Heald, 2001) como se muestra en la figura 31, la ecuación y su desarrollo para este caso se muestran en la sección 3.3.1.2.1.

Antes de desarrollar la ecuación que expresa la intensidad del segundo eco será necesario explicar la geometría que ha sido utilizada, ya que ésta es un factor que contribuye al por que hay información adicional que no está disponible en el primer eco. La geometría se muestra en la figura 32. En un principio se ha determinado que la superficie del agua está en calma y que no hay dispersión de la señal resultante del primer eco (o scattering) que proviene del fondo del mar. La pérdida debido al coeficiente de reflexión en la primera interacción con el fondo marino ha sido sin

embargo incluida. El tratamiento que lleva al desarrollo del primer eco muestra que el sonar (o transductor) funciona como fuente y receptor en un mismo punto (es decir, geometría monoestática), mientras que el tratamiento para hallar el segundo eco debe ser tratado en términos de un eje de geometría bi-estática, es decir las posiciones de la fuente y del receptor están espaciadas una cierta distancia vertical. Esto se muestra en un diagrama de la figura 32 y la figura 33 muestra por partes el mecanismo del segundo eco. De esta manera en la superficie del agua, el eco representa una fuente que transmite por segunda vez al lecho marino y se dispersa nuevamente hacia el receptor (Heald, 2000)

La evolución temporal del segundo eco ha sido analizada en dos etapas. La primera etapa es donde el área de radiación es un círculo completo, es decir, el flanco de subida y la segunda etapa es la región donde el área de radiación se ha convertido en un anillo, es decir, flanco de bajada (Heald, 2001)

Luego de ser calculadas las intensidades del primer y segundo eco (retrodispersión) se procede a calcular las integrales de E_1 y E_2 con respecto al tiempo respectivamente con el fin de indicar las medidas de las energías en la cola del primer retorno y sobre la totalidad del segundo retorno (eco) (Heald, 2001). En el Anexo C se muestra la tabla en Excel de los valores de E_1 y E_2 con sus respectivas variables geofísicas, coordenadas y puntos localizados en el Google EARTH.

3.3.1.2.1 La primera intensidad del eco (backscattered) en series de tiempo

La intensidad del primer eco debe incluir el efecto de dispersión y reflexión de la señal que incide en la interfase rugosa, la respuesta del haz de la fuente y del receptor, además debe incluir el rango del transductor de la interfase del sedimento (Heald, 2000). Estos efectos se incluyen debido al uso de un transductor de 200 kHz que responde de manera muy distinta a un transductor que sea de 12 o 28 kHz a causa del patrón de radiación, el alcance y la cobertura del fondo marino (ver sección 1.5). A lo largo del desarrollo de la teoría se ha establecido que el transductor se encuentra en la superficie del agua, no obstante la teoría se sigue cumpliendo para un transductor que esté por debajo de la

superficie del agua con el fin de evitar ruidos como las olas del mar. El resultado de la integral para la intensidad del primer eco puede ser escrita como (Heald, 2000):

$$I_{bs1} = I_0 \int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{S_1(\theta_1) G^2(\theta_1)}{(R'_0)^4} dA \quad (3.1)$$

Donde

$$dA = 2\pi R'^2_0 \tan \theta_1 d\theta_1 \quad (3.2)$$

$$R'_0 = R_0 \sqrt{(1 + \tan^2 \theta_1)} \quad (3.3)$$

I_0 es la intensidad de la fuente a una distancia de un metro de dicha fuente y los límites de integración están en función del tiempo por el cual se discuten más adelante.

El coeficiente de retrodispersión (backscattering) $S_1(\theta_1)$ es un resultado de una solución del límite de las altas frecuencias de la integral Helmholtz-Kirchhoff (asumiendo una superficie Gaussiana) (Brekhovskikh y Lysanov, 1988; Pace, 1990) y puede ser escrita:

$$S_1(\theta_1) = \frac{\Re^2 T^2}{32\pi h^2} \left(\frac{\exp\left(-\left(\frac{T \tan \theta_1}{2h}\right)^2\right)}{\cos^4 \theta_1} \right) \quad (3.4)$$

Donde h es la raíz cuadrática media de la altura de la rugosidad de la superficie, T es la raíz cuadrática media de la longitud de correlación de la rugosidad de la superficie y \Re es el coeficiente de reflexión de la onda plana (ver ecuación 1.11). (Heald, 2000; Pace, 1990).

Para encontrar la magnitud de h y T es necesario explicar los diferentes tamaños de grano que conforman el lecho marino, a causa de esto se puede dar un estimativo acerca de la rugosidad de la superficie dada por h y T . De esta manera se muestra en la tabla 1 los cuatro principales sedimentos con sus respectivos tamaños de grano, a partir de esta

tabla se mostrará el respectivo cálculo para hallar la raíz cuadrática media de la altura de la rugosidad y la longitud de correlación donde se podrá ver que dependiendo del tipo de sedimento o material que esté en la superficie del fondo marino, la calibración del modelo físico será más exacta y confiable.

Nombre	Rango de los diferentes diámetros de las partículas (mm)	Valor Correspondiente al Phi $-\log_2 D$
Grava		
Roca	>256	< -8
Cobble (Guijarros)	64 a 256	-.6 a -8
Pebble (Guijos)	4 a 64	-.2 a -6
Granulo	2 a 4	-.1 a -2
Arena		
Arena muy gruesa	1 a 2	0 a -1
Arena gruesa	0,5 a 1	1 a 0
Arena Media	0,25 a 0,5	2 a 1
Arena fina	0,125 a 0,25	3 a 2
Arena muy fina	0,0625 a 0,125	4 a 3
Limo	0,00195 a 0,0625	9 a 4
Arcilla	<0,00195	>9

Tabla 1. Clasificación de los diferentes tamaños de grano de sedimento con la escala logarítmica expresado como valor phi. Heald (2000)

Con esta tabla de clasificación de sedimentos se procede a la deducción de las variables h y T , de la siguiente manera (Jackson y Richardson, 2001; Heald, 2000):

$$h = 0.62 * \text{el radio medio de partícula} \quad (3.5)$$

$$T = \sqrt{2} h \quad (3.6)$$

La fuente y el receptor que vienen siendo un mismo dispositivo, ambos tienen la misma función de patrón del haz gaussiano $G(\theta_1)$, por tanto (Heald, 2001; Heald & Pace, 1996):

$$G^2(\theta_1) = G_t G_r = \exp\left(-2\left(\frac{\tan^2 \theta_1}{\tan^2 \theta_0}\right)\right) \quad (3.7)$$

El área de interés para el primer eco es la cola de la intensidad mostrada en la figura 29, donde ocurre que en un tiempo cero corresponden a su llegada al receptor. Esta es la región donde el área irradiada en el fondo marino es un anillo y pasa cuando (Heald, 2001):

$$\frac{ct}{2} > \frac{c\tau}{2}$$

Los límites de la integral θ_a y θ_b vienen de:

$$\sqrt{\frac{c(t-\tau)}{R_0}} \leq \theta_1 \leq \sqrt{\frac{ct}{R_0}}$$

Por tanto la solución de la integral de la ecuación 3.1 para hallar la intensidad de la cola del eco, es de la siguiente forma:

$$I_{bsl} = I_0 \int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{S_1(\theta_1) G^2(\theta_1)}{(R'_0)^4} 2\pi R'^2_0 \tan \theta_1 d\theta_1 \quad (3.8)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.7 y 3.4 en la 3.8, resulta 3.9

$$I_{bsl} = 2\pi I_0 \left(\frac{\mathfrak{R}^2 T^2}{32\pi h^2} \right) \int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{\exp - \left(\frac{T \tan \theta_1}{2h} \right)^2 \exp \left(-2 \frac{T \tan^2 \theta_1}{\tan^2 \theta_0} \right) \tan \theta_1}{\cos^2 \theta_1 R_0^2} d\theta_1 \quad (3.9)$$

Simplificando la 3.9 resulta de la forma 3.11

$$I_{bsl} = \frac{I_0 \mathfrak{R}^2 T^2}{16h^2 R_0^2} \int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{\exp - \left(\frac{T^2 \tan^2 \theta_1}{4h^2} + 2 \frac{\tan^2 \theta_1}{\tan^2 \theta_0} \right) \tan \theta_1}{\cos^2 \theta_1} d\theta_1 \quad (3.10)$$

La Ec. 3.10 se puede dejar de una manera más simplificada como se aprecia en 3.11

$$I_{bsl} = M \int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{\exp - (\beta \tan \theta_1)^2 \tan \theta_1}{\cos^2 \theta_1} d\theta_1 \quad (3.11)$$

Donde

$$M = \frac{I_0 \mathfrak{R}^2 T^2}{16h^2 R_0^2}$$

$$\beta = \frac{T^2}{4h^2} + \frac{2}{\tan^2 \theta_0}$$

Haciendo sustitución en la ecuación 3.11, resulta:

$$u = \beta \tan \theta_1 \quad (3.12)$$

$$du = \beta \sec^2 \theta_1 d\theta_1 \quad (3.13)$$

$$d\theta_1 = \frac{\cos^2 \theta_1}{\beta} du \quad (3.14)$$

Reemplazando 3.12 y 3.14 en la ecuación 3.11, se deduce la 3.15:

$$I_{bsl} = \frac{M}{\beta^2} \int_{\theta_a}^{\theta_b} \exp(-u)^2 u du \quad (3.15)$$

Volviendo hacer sustitución en la ecuación 3.15 con:

$$x = u^2 \quad (3.16)$$

$$dx = 2u du \quad (3.17)$$

$$du = \frac{dx}{2u} \quad (3.18)$$

Al tener en cuenta las ecuaciones 3.16 y 3.18 en la 3.15, se deduce la ecuación 3.19:

$$I_{bsl} = \frac{M}{2\beta^2} \int_{\theta_a}^{\theta_b} \exp - x dx \quad (3.19)$$

El resultado de la integral de la 3.19, teniendo en cuenta la 3.12, resulta la ecuación 3.20:

$$I_{bs1} = \frac{M}{2\beta^2} \left[\exp(-\beta^2 \theta_b^2) - \exp(-\beta^2 \theta_a^2) \right] \quad (3.20)$$

Donde se puede apreciar en la ecuación 3.20, que el término $\tan \theta_1$ se aproximó a θ_1 debido a que este ángulo es muy pequeño por el tipo de haz que utiliza el transductor.

Al reemplazar las expresiones de θ_b y θ_a explicadas anteriormente en la ecuación 3.20, resulta la 3.21:

$$I_{bs1} = \frac{M}{2\beta^2} \left[\exp\left(-\beta^2 \left(\frac{c(t-\tau)}{R_0}\right)\right) - \exp\left(-\beta^2 \left(\frac{ct}{R_0}\right)\right) \right]$$

$$I_{bs1} = \frac{M}{2\beta^2} \left[\exp\left(-\beta^2 \frac{ct}{R_0}\right) \exp\left(\beta^2 \frac{c\tau}{R_0}\right) - \exp\left(-\beta^2 \frac{ct}{R_0}\right) \right]$$

$$I_{bs1} = \frac{M}{2\beta^2} \exp\left(-\beta^2 \frac{ct}{R_0}\right) \left(\exp\left(\beta^2 \frac{c\tau}{R_0}\right) - 1 \right) \quad (3.21)$$

Finalmente la ecuación 3.21 expresa la intensidad de la cola del primer eco en función del tiempo.

3.3.1.2.2 La segunda intensidad del eco (I_{bs2})

En la figura 32 se muestra la trayectoria de la señal acústica que se propaga hasta el fondo marino, se refleja en la superficie del agua (indicando el primer eco), vuelve y regresa al fondo marino y finalmente regresa al transductor para un segundo eco. Un punto de vista importante en este mecanismo para hallar el índice de la dureza del fondo, consiste en que el radio de cobertura del haz acústico cuando incide sobre el lecho marino es ahora tres veces mayor que el radio de la radiación originada por el primer eco. La línea punteada de la figura 32 indica el retorno de la onda hacia el transductor. La propagación de la onda acústica en la columna de agua se dispersa por segunda vez hacia el fondo marino después de dispersarse en la superficie del agua indicando así información del segundo eco (índice de dureza), esto se obtiene siempre y cuando se asuma que la fuente esté situada a tres veces la distancia al fondo del agua y a

dos veces de la distancia del receptor. Esto significa que el segundo eco debe ser tratado en términos de un eje de geometría bi-estática, presentado en la figura 33 (Heald, 2000).

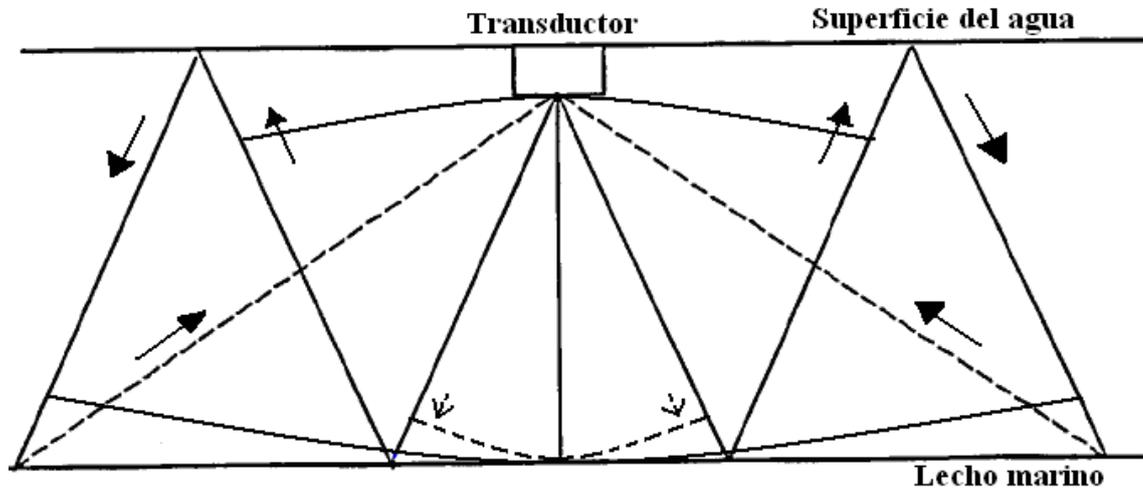


Figura 32. Trayectoria de la señal acústica para mostrar una segunda radiación sobre el fondo marino (línea sólida) y la trayectoria de la señal cuando retorna al receptor (línea punteada). Heald (2001)

Para entender la geometría de la trayectoria del segundo eco, ésta ha sido expandida en varias etapas con el propósito de mostrar que la posición efectiva de la fuente está situada a tres veces de la profundidad del agua con respecto a la posición del receptor. Esto se muestra en la figura 33, en la cual la geometría suele ser utilizada para derivar las ecuaciones de la intensidad del segundo eco (backscattering) y E_2 . (Heald, 2000; Pace y Heald, 1996).

“Una vez más se asumió una función Gaussiana del haz. Debido a la geometría de la figura 33 hay una relación entre θ_1 y θ_2 . El parámetro α puede ser introducido para permitir que la integral sea escrita en términos solamente de θ_1 ”. Para ángulos pequeños se puede aproximar $\tan\theta_1$ a θ_1 , de esta manera ha sido resuelta la ecuación de la intensidad bi-estática del segundo eco que puede ser escrita de la siguiente forma (Heald, 2001):

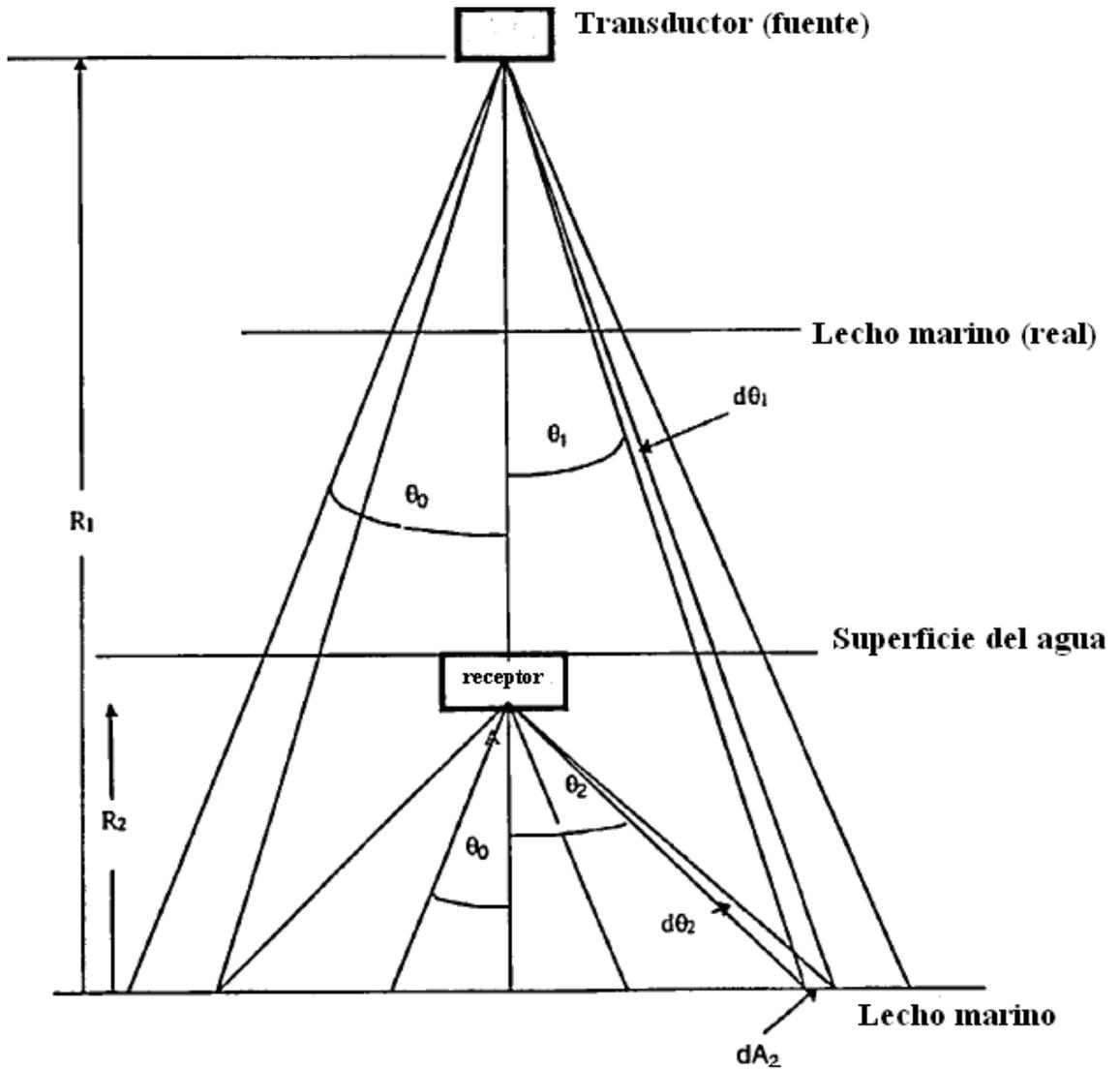


Figura 33. Geometría que explica la trayectoria para encontrar el segundo eco (dureza) mostrando que la posición efectiva de la fuente está situada a una distancia que es el triple de la profundidad del agua con respecto al receptor.

Heald (2001); Pace y Heald (1996).

$$I_{bs2} = \frac{I_0 \mathcal{R}^4 \beta_1^2}{4} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\exp\left(-\beta_1^2 \frac{\theta_1^2}{4} (1+\alpha)^2\right) \exp(-\beta_2^2 \theta_1^2)}{R_2^2 (1+\alpha^2 \theta_1^2)} \theta_1 d\theta_1 \left(1 + \frac{\theta_1^2 (1+\alpha)^2}{4}\right)^2 \quad (3.22)$$

Donde

$$\beta_1 = \frac{T^2}{4h^2} \quad (3.23)$$

$$\beta_2^2 = \frac{(1 + \alpha^2)}{\tan^2 \theta_0} \quad (3.24)$$

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2} \quad (3.25)$$

Reemplazando y sustituyendo en:

$$\beta_4^2 = \frac{\beta_1^2(1 + \alpha)^2}{4} + \beta_2^2 \quad (3.26)$$

Y

$$x = \theta_1^2 \beta_4^2 \quad (3.27)$$

La 3.22, se convierte en una solución de la integral de la intensidad de la forma 3.28:

$$\int \frac{x^n e^{-x}}{a+x} dx \quad ; a = \frac{\beta_4^2}{\alpha^2} \quad (3.28)$$

Donde $n = 0, 1$ y 2

La solución de la integral de la ec. 3.22, teniendo en cuenta la forma de la 3.28, se obtiene como:

$$I_{\text{total}} = \frac{\pi R_1^4 \beta_1^2}{4 R_2^2 \beta_4^2} \left[\exp(-x) \left(\left(\frac{-1}{x + \frac{1}{E_1}} + \frac{1}{\left(x + \frac{1}{E_1}\right)^2} \right) \left(1 - \frac{2E_1}{E_2} + \frac{E_1^2}{E_2^2} \right) \exp\left(\frac{-1}{E_1}\right) + \left(\frac{-2E_1}{E_2} + \frac{E_1^2}{E_2^2} - \frac{x E_1^2}{E_2} - \frac{E_1^2}{E_2} \right) \right) \right]_{\mathbf{xb}}^{\mathbf{xa}} \quad (3.29)$$

Donde

$$B_1 = \left(\frac{\beta_5}{\beta_4} \right)^2$$

$$B_2 = \frac{\alpha^2}{\beta_4^2}$$

$$\beta_5^2 = \frac{(1 + \alpha)^2}{4}$$

Para hallar la intensidad en función del tiempo del segundo eco a partir de la ecuación 3.29, será necesario dividir la ecuación en dos partes de la siguiente manera (Heald, 2001):

Primer caso: Radiación completa o círculo completo. Esta es la región donde $ct \leq c\tau$ (τ = la longitud del pulso). Además este caso ocurre cuando la onda incide por primera vez sobre el fondo marino.

$$x_a = 0 \quad (3.30)$$

$$x_b = \theta_a^2 \beta_4^2 \quad (3.31)$$

Segundo caso: Anillo. Pertenece a la región donde $ct > c\tau$. Ocurre cuando la onda incide por segunda vez sobre el fondo.

$$x_a = \theta_a^2 \beta_4^2 \quad (3.32)$$

$$x_b = (\theta_a + \Delta\theta) \beta_4^2 \quad (3.33)$$

Las expresiones completas de I_{bs2} para los dos casos están dadas en el anexo B

En el análisis del segundo retorno, la dispersión de la onda cuando incide por primera vez sobre el lecho marino, la señal acústica es tratada como una componente coherente (reflexión especular), mientras cuando la onda incide por segunda vez sobre el fondo marino después de reflejarse en la superficie del mar, la señal acústica es tratada como una componente incoherente (la onda sufre un fenómeno llamado backscattering) (Heald, 2000)

3.3.1.2.3 Definición de las integrales E_1 y E_2

Para obtener las expresiones de E_1 y E_2 se requiere integrar las intensidades del primer y segundo eco respectivamente sobre un intervalo de tiempo particular (Heald, 2000; Siwabessy et. al, 2004).

La expresión I_{bs1} corresponde a la cola del primer eco donde el área irradiada sobre el fondo marino es un anillo. Al reemplazar la ecuación 3.21 en la 3.34 y así mismo al integrar E_1 desde t_1 a ∞ . El resultado da la ecuación 3.36 (Heald, 2000):

$$E_1 = \int_{t_1}^{\infty} I_{bs1}(t) dt \quad (3.34)$$

$$E_1 = \frac{M}{2\beta^2} \left(\exp\left(\frac{\beta^2 c \tau}{R_0}\right) - 1 \right) \int_{t_1}^{\infty} \exp\left(\frac{-\beta^2 c t}{R_0}\right) dt \quad (3.35)$$

$$E_1 = \frac{-MR_0}{2\beta^4 c} \left(\exp\left(\frac{\beta^2 c \tau}{R_0}\right) - 1 \right) \left[\exp\left(\frac{-\beta^2 c t_1}{R_0}\right) \right] \quad (3.36)$$

La expresión I_{bs2} es la intensidad del segundo eco en función del tiempo, cuando ésta se integra con respecto al tiempo para dar la expresión E_2 se necesita integrar el flanco de subida y el flanco de bajada del pico, por tanto es necesario que los límites del tiempo no sean solo la duración de la onda al propagarse de la superficie del agua hacia el lecho marino sino también el tiempo que ésta se propague cuatro veces a través de la columna de agua, por esta razón es necesario analizar la energía del primer eco (cuando incide por primera vez indicando el flanco de subida del segundo pico) y luego analizar la energía del segundo eco después de que la onda se halla dispersada en la superficie del agua e incidido en el fondo por segunda vez, indicando así el flanco de bajada del pico. Aplicando el primer caso de las expresiones 3.30 y 3.31 al primer término de la ecuación 3.37 y posteriormente aplicando el segundo caso de las expresiones 3.32 y 3.33 al segundo término de la ecuación 3.37, se conoce la energía total del segundo eco de la siguiente manera (Heald, 2000):

$$E_2 = \int_0^{t_3} I_{bs2}(t) dt + \int_{t_3}^{t_4} I_{bs2}(t) dt \quad (3.37)$$

La expresión completa para E_2 se presenta en el anexo A.

3.3.2 Hardware

En el hardware de la ecosonda KNUDSEN 320 B/P se trabaja con dos canales de altas frecuencias (200 kHz) y bajas frecuencias (12 ó 28 kHz). En la actividad de laboratorio se trabajó con un transductor de 200 y 28 kHz como se aprecia en la figura 35, de este modo se emplearon dos clases de circuitos electrónicos como se muestra en la figura 34, donde se puede observar que la parte superior de la electrónica pertenece a todo el procesamiento batimétrico de 200 kHz (en esta parte se obtiene información del perfil batimétrico) y en la parte inferior de la caja electrónica se desarrolla todo el procesamiento batimétrico de 28 kHz donde se puede visualizar el subsuelo marino. Debido a que esta ecosonda es digital no es necesario hacer correcciones por temperatura como lo requieren las ecosondas analógicas. Vale aclarar que las componentes electrónicas para cada frecuencia varían en cuanto a la capacidad de adquirir información acerca de la capa del fondo marino.



Figura 34. Ecosonda Knudsen 320 BP con su respectivo hardware que permite hacer levantamiento batimétrico.

El transductor de 28 y 200 kHz (figura 35) se conecta a través de dos tarjetas de bajas y altas frecuencias por medio de un cable que luego se dividen en dos (ver

figura 34) para llevar su respectiva información acerca de las características del fondo en función del ciclo de trabajo del material piezoeléctrico del transductor (ver sección 1.5.2).

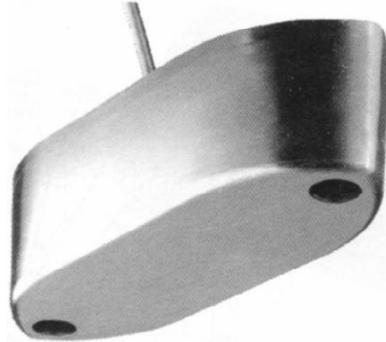


Figura 35. Transductor de dos canales con frecuencias de 28 y 200 kHz.

Manual de KNUDSEN (2009)

La ecosonda con la cual se trabajó funciona de acuerdo al ciclo de etapas presentadas en la figura 36, donde se aprecia que durante la recepción del eco, la señal recibida es amplificada como una función de tiempo (ganancia de variación de tiempo) y transferida hacia un detector envolvente donde es finalmente convertida al formato digital, que es la señal que es procesada para determinar la profundidad. Esto permite que la información sea guardada y mostrada en varios formatos como el archivo .KEA y .KEB (ver sección 3.3.1) (OHI, 2005; Acquaticci et. al, 2007).

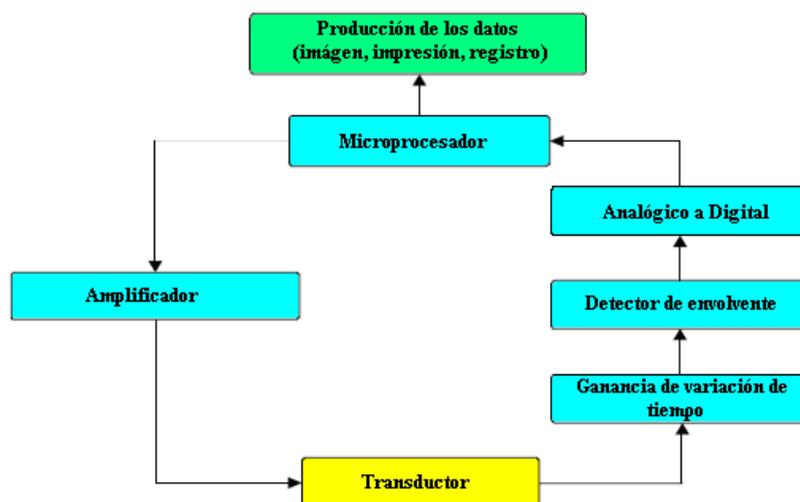


Figura 36. Ecosonda digital, diagrama de bloques donde muestra las etapas del funcionamiento del equipo. Antoine (2005)

3.3.2.1 Señal de voltaje

Con el fin de analizar la amplitud del voltaje que registra la ecosonda para determinados materiales presentes en la superficie del fondo del tanque del laboratorio, fue necesario tener un osciloscopio (figura 37) que permitiera analizar e interpretar los picos del primer y segundo eco según el tipo de material, así mismo se tuvo en cuenta las paredes del tanque para que no interfirieran en las pruebas (Dyer et. al, 1997).



Figura 37. Osciloscopio digital (con un ancho de banda de 20 kHz) para analizar la amplitud del voltaje dado por diferentes tipos de materiales evaluados en el laboratorio.

Esta metodología demostró que perfectamente la ecosonda KNUDSEN 320 B/P es capaz de discriminar el fondo de un cuerpo de agua a partir de la amplitud del voltaje del primer y segundo eco como se puede ver en la figura 37, de este hecho se pudo analizar con satisfacción que diferentes materiales responden de manera distinta al voltaje y así mismo el eco strength. En la sección de resultados se mirará que la amplitud del voltaje originado por el actuador piezoeléctrico no

siempre es función del eco strength, pero si es dependiente de la ganancia de la onda acústica. A partir de este hecho se demuestra que el sistema RoxAnn es un dispositivo que hace uso la magnitud del voltaje con el fin de poder discriminar/clasificar el lecho marino.

3.4 Sistema de clasificación de lechos marinos

El sistema de clasificación se basa en un método estadístico, el cual es aplicado a una red neuronal LVQ2, esto con el objetivo de clasificar los datos E_1 y E_2 obtenidos por el programa Excel con el uso de la ecosonda 320 B/P. En las dos siguientes secciones se explica por medio de la teoría el método estadístico utilizado para llevar a cabo la determinación de los cinco grupos de fondos sedimentarios del golfo de Urabá y las pruebas que se hicieron en el laboratorio. Por otra parte, se ilustra el pseudocódigo del algoritmo LVQ para determinar la clase de sedimento que pertenece a cada dato de E_1 y E_2 .

3.4.1 Método estadístico

El análisis cluster es un método estadístico que consiste de una técnica de análisis exploratorio de datos para resolver problemas de clasificación. Su fin es ordenar objetos (personas, cosas, animales, plantas, variables, entre otros) en grupos de modo que el grado de asociación/similitud entre miembros del mismo cluster sea más fuerte que el grado de asociación/similitud entre miembros de diferentes clusters. Cada cluster define la clase a la que sus miembros pertenecen (Vicente, 2010).

El análisis cluster es un método que sirve para explorar asociaciones y estructuras en los datos que no son claras a priori pero que pueden ser convenientes una vez que se han encontrado (Vicente, 2010).

Los resultados de un Análisis de Clusters pueden cooperar con la definición de un esquema de clasificación tal como una taxonomía para un conjunto de objetos,

a proponer modelos estadísticos para describir poblaciones, a asignar nuevos individuos a las clases para diagnóstico e identificación, entre otros (Vicente, 2010).

Las etapas de un análisis cluster son (I.A.A.E, 2010):

1. Selección de la muestra de datos.
2. Selección y transformación de variables a utilizar.
3. Selección de concepto de distancia o similitud y medición de las mismas.
4. Selección y aplicación del criterio de agrupación.
5. Determinación de la estructura correcta (Elección del número de grupos).

Cada etapa se explica de la siguiente manera:

1. Selección de la muestra:

Trata de dos condiciones, la primera es adecuar la muestra al objeto de análisis y la segunda es la depuración de atípicos (interesan elementos como miembros de grupos, no interesan la excesiva “individualidad”) (I.A.A.E, 2010).

2. Selección de variables:

Consiste en la cantidad y en la transformación, en el cual la primera de ellas radica en no elegir variables indiscriminadamente, es decir, cada estructura se manifiesta en una serie de variables y cada grupo de variables revela, sólo, una determinada estructura. La segunda que es la transformación trata de varios factores (I.A.A.E, 2010):

- Depende / Afecta a muchas decisiones posteriores (medida de distancia /similitud empleada, por ejemplo) (I.A.A.E, 2010).
- Estandarización por variable: aunque resulta útil para mediciones posteriores de distancia, puede afectar al resultado del análisis y no se

recomienda si las diferencias de medidas reflejan alguna cualidad natural de interés conceptual (I.A.A.E, 2010).

- Estandarización por encuestado: singular, pero en baterías de indicadores elimina patrones de respuesta en los sujetos, ofreciendo la importancia relativa de cada indicador (I.A.A.E, 2010).

3. Medidas de similitud o distancia

Las medidas de similitud o distancia se clasifican en dos tipos:

- A. Correlación: Se traslada el concepto tradicional de covarianza, de conexión entre variables, de "pautas" de transición (por ejemplo, el cálculo de un coeficiente de correlación) aplicándolo a las observaciones de los sujetos como si fuesen observaciones de variables (I.A.A.E, 2010).
- B. Medidas de Similitud / Distancia: Definen proximidad, no Covarianza, y su elección (tipos) viene determinada por la escala de medida de las variables: binaria u ordinal o de intervalo/razón (I.A.A.E, 2010).

Algunas medidas de distancia son: Euclídea, Manhattan (o función de la distancia absoluta, o City-Block), formulación general de power, D^2 de mahalanobis (I.A.A.E, 2010). Vale la pena aclarar que en el sistema de clasificación se utilizó la distancia euclídea, por lo tanto se tuvo en cuenta la fórmula:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^t (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (\text{Para "t" variables})$$

4. Algoritmo de agrupación – división para la obtención de conglomerados.

Se pueden encontrar dos tipos fundamentales de métodos de clasificación:

Jerárquicos y No Jerárquicos. En los primeros, la clasificación resultante tiene un número creciente de clases anidadas (Estructura progresiva árbol) mientras que en el segundo las clases no son anidadas (I.A.A.E, 2010).

Los métodos pueden dividirse en **aglomerativos** y **divisivos**. En los primeros se parte de tantas clases como objetos tengamos que clasificar y en pasos sucesivos vamos obteniendo clases de objetos similares, mientras que en los segundos se parte de una única clase formada por todos los objetos que se va dividiendo en clases sucesivamente (I.A.A.E, 2010).

Los jerárquicos aglomerativos consisten en cinco clases de distancia y un método llamado Ward. Las distancias son las siguientes: mínima (single linkage), máxima (complete linkage), entre centros (centroide), mediana y promedio (I.A.A.E, 2010).

La distancia utilizada para clasificar los datos fue la denominada *complete* que radica en que los grupos se unen considerando la menor de las distancias existentes entre los miembros más lejanos de distintos grupos (I.A.A.E, 2010).

5. Número óptimo de grupos:

Se fundamenta en que a medida que se van formando grupos estos son menos homogéneos (las distancias para las que se forman los grupos iniciales son menores que las de los grupos finales) pero la estructura es más clara. (I.A.A.E, 2010).

3.4.2 Red neuronal (LVQ2)

Kohonen ha mostrado que es posible afinar los límites de clase de un SOM (tipo de red neuronal no supervisada) de forma supervisada y ha desarrollado muchos métodos para hacer esto. Todos son variaciones de Cuantización de vectores de aprendizaje (Learning vector quantization, LVQ). El vector de cuantización es una técnica estándar de agrupación estadística, la cual busca dividir el espacio de

entrada en áreas que son asignadas como “code book” vectores. En la red LVQ, los valores de los target están disponibles para el patrón de entrenamiento de entrada y el aprendizaje es supervisado (Sivanandam, 2006).

Para entender las técnicas de LVQ hay que tener en cuenta que el vector de peso más cercano w_j al patrón X puede ser asociado con un nodo j , que tiene la etiqueta de clase equivocada para X (Sivanandam, 2006).

3.4.2.1 Arquitectura

La arquitectura de una red neuronal LVQ es mostrada en la figura 38.

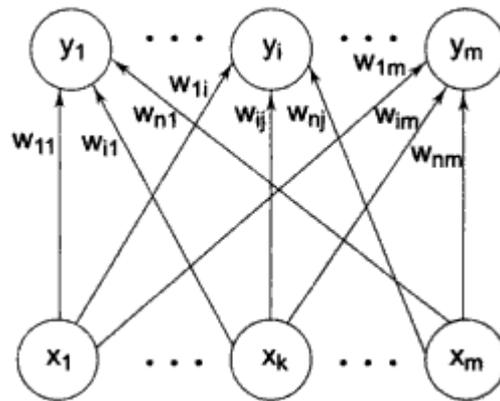


Figura 38. Red neuronal LVQ. Sivanandam (2006).

En la red LVQ, cada unidad de salida tiene una clase conocida, ya que utiliza un aprendizaje supervisado. Esta red es competitiva donde la salida es conocida; por lo tanto es una red de aprendizaje supervisado (Sivanandam, 2006; Chen et. al, 2006).

Métodos para inicializar vectores de referencia (Sivanandam, 2006):

- Tomar primero „m“ vectores de entrenamiento y utilizarlos como vectores de peso; los restantes vectores son utilizados para el entrenamiento.

- Inicializar los vectores de referencia aleatoriamente y asignar los pesos iniciales y la clase aleatoriamente.
- El método de agrupamiento de K-medio puede ser adoptado.

3.4.2.2 Algoritmo de entrenamiento

El algoritmo para la red LVQ consiste en encontrar la unidad de salida que tiene un patrón de coincidencia con el vector de entrada. Al final del proceso, si x y w pertenecen a la misma clase, los pesos son desplazados hacia un nuevo vector de entrada y si ellos pertenecen a una clase diferente, los pesos son desplazados lejos de los vectores de entrada. El índice de unidad ganadora es comparado con el blanco (target), con base en su resultado de comparación, la actualización del peso se lleva a cabo como se muestra en el siguiente algoritmo (Sivanandam, 2006).

Primer paso: Inicializar vectores de pesos (referencia).

Inicializar tasa de aprendizaje.

Segundo paso: Mientras se detiene es falso, hacer los pasos del 3 al 7

Tercer paso: Para cada entrenamiento del vector de entrada x , hacer los pasos 4 y 5

Cuarto paso: Computar J utilizando la distancia Euclidea al cuadrado

$$D(j) = \sum (w_{ij} - x_i)^2$$

Encontrar j cuando $D(j)$ es mínimo

Quinto paso: Actualizar w_j como sigue:

Si $t = c_j$, entonces

$$w_{j(\text{nuevo})} = w_{j(\text{viejo})} + \alpha [x - w_{j(\text{viejo})}]$$

Si $t \neq c_j$, entonces

$$w_{j(\text{nuevo})} = w_{j(\text{viejo})} - \alpha [x - w_{j(\text{viejo})}]$$

Sexto paso: Reducir la tasa de aprendizaje

Séptimo paso: Prueba que permita detener la condición

La condición puede establecer el número de iteraciones o la tasa de aprendizaje para alcanzar un valor suficientemente pequeño (Sivanandam, 2006).

3.4.2.3 Variantes de LVQ

Dos variantes técnicas (LVQ2 Y LVQ3) son también desarrolladas por Kohonen. Estos son más complejos que el previo LVQ pero permite obtener un rendimiento importante en la clasificación. En el algoritmo de LVQ, solo el vector de referencia que es el más cercano al vector de entrada es actualizado. En los algoritmos LVQ2 y LVQ3, dos vectores aprenden si de la mayoría de las condiciones están satisfechos. Los dos vectores son ganador y finalista (Sivanandam, 2006).

LVQ2

En este caso, el ganador y el finalista representan diferentes clases. La clase finalista es la misma que el vector de entrada. La distancia del vector de entrada al ganador y del vector de entrada al finalista es aproximadamente igual (Sivanandam, 2006).

“Aquí, x es el vector de entrada, y_c es el vector de referencia que está más cercano al x , y_r es el vector de referencia que está más próximo al x , d_c es la distancia del x a y_c y d_r es la distancia del x a y_r ” (Sivanandam, 2006).

La ventana es definida como: el vector de entrada x cae en la ventana si,

$$\frac{d_\xi}{d_r} > 1 - \xi \quad \text{y} \quad \frac{d_r}{d_\xi} < 1 + \xi$$

Donde ξ es el número de entrenamientos de la muestra ($\xi \cong 0.35$)

La fórmula actualizada es dada por

$$y_c(t+1) = y_c(t) + \alpha(t)[x(t) - y_c(t)]$$

$$y_r(t+1) = y_r(t) + \alpha(t)[x(t) - y_r(t)]$$

LVQ3

LVQ3, el algoritmo de entrenamiento, se extiende para proporcionar una formación si x , y_{c1} y y_{c2} pertenecen a la misma clase, las actualizaciones están dadas por:

$$y_{c1}(t+1) = y_{c1}(t) + \beta(t)[x(t) - y_{c1}(t)]$$

$$y_{c2}(t+1) = y_{c2}(t) + \beta(t)[x(t) - y_{c2}(t)]$$

El valor de β es un múltiplo de la tasa de aprendizaje $\alpha(t)$ que es utilizado si

y_{c1} y y_{c2} pertenecen a diferentes clases, por ejemplo:

$\beta = m\alpha(t)$; para $0.1 < m < 0.5$ (Sivanandam, et. al, 2006)

3.5 Reporte final

En el reporte final, luego de haber empleado la metodología para llevar a cabo el sistema de clasificación de fondos marinos, se muestra en el capítulo siguiente los respectivos resultados que llevaron a determinar los posibles tipos de sedimentos que conforman el Golfo de Urabá y además se hace un análisis del voltaje versus eco strength y demás variables como la ganancia y la señal del pico en porcentaje para cada tipo de material que se utilizó en el laboratorio como también su clasificación manteniendo una profundidad constante. Estos resultados se lograron gracias al uso de buenos trabajos de campo, de laboratorio y la implementación de un buen desarrollo metodológico.

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Análisis y resultados del Hardware

Los resultados del hardware se obtuvieron utilizando el osciloscopio para tener información sobre la amplitud del pico del voltaje del primer y segundo eco de los cuatro materiales que se analizaron en el laboratorio. No solo se entendió que la ecosonda entrega información mediante el software eco-control sobre los dos picos que indican las características del lecho marino gracias a un material piezoeléctrico del transductor procesando a 200 kHz, sino también que variables como la ganancia, la señal cuantificada del eco en porcentaje y el eco strength (dB) varían en función de la magnitud del voltaje dependiendo de los valores de entrada que le ingrese el operador al software.

Según el artículo publicado por Dyer et. al (1997) muestra que el sistema comercial RoxAnn procesa toda la información de la discriminación de los fondos marinos a partir de la amplitud del voltaje para cada tamaño de grano del sedimento. De esta manera, en el proyecto batimétrico del Golfo de Urabá fue necesario analizar si la ecosonda KNUDSEN 320 B/P tendría la capacidad de entregar información no solo de la profundidad sino también de la variación de la amplitud del voltaje para el primer y segundo eco dependiendo del tipo de sedimento, teniendo en cuenta que el eco strength (dB) es la base fundamental para discriminar desde el lodo hasta los fondos rocosos.

En las secciones siguientes se muestran los resultados que se obtuvieron para dos clases de grava que son el pebble y el cobble, así mismo se analizan los resultados del concreto y por último de la platina de acero.

Los resultados para cada tipo de material en el laboratorio se analizaron de dos distintas maneras, en la primera se observó para cada material su correspondiente amplitud de voltaje y en la segunda se construyeron tres gráficas donde se indica si la amplitud del voltaje tenía relación alguna con variables tales como la

ganancia, la señal (%) y el eco strength (en decibeles) y por tanto determinar si estas variables juegan un papel importante a la hora de caracterizar el fondo marino.

4.1.1 La grava

Según la tabla 1 la grava es un tipo de sedimento conformado por dos tipos de clastos por el cual se dividen en 4 grupos que dependen del diámetro. Los que comprenden un diámetro de 64 a 256 mm o más se clasifican como bloque y los que son de 2 a 64 mm se clasifican como canto (Tarbuck & Lutgens, 1999).

Los dos tipos de clastos que se utilizaron en el laboratorio fueron el pebble, el cual está dentro del grupo clasificado como canto y el cobble que se encuentra dentro del grupo clasificado como bloque. Ambos clastos tienen granos con diámetro promedio de 31 mm y 100 mm respectivamente. Estas clases de grava dieron resultados muy distintos en cuanto a la amplitud del voltaje como también en el eco strength (dB).

4.1.1.1 Los Pebbles

En la figura 39 se aprecian los pebbles que se utilizaron en el laboratorio con el propósito de analizar cómo la onda acústica se dispersaba cuando incidía sobre este tipo de grava, este análisis se visualizó de dos maneras, la primera mediante el osciloscopio (amplitud del voltaje) y la segunda por el software (eco strength, señal cuantificada y la ganancia).



Figura 39. Tamaño de grano del pebble (guijarro con 31 mm de diámetro)

4.1.1.2 Los Cobbles

Los cobbles son una clase de grava clasificada como bloque por su tamaño de grano (100 mm de diámetro) como se puede apreciar en la figura 40. En el laboratorio se utilizaron varias muestras de esta grava (ubicadas en el fondo del tanque) por la necesidad de hallar la respuesta del eco strength. Los resultados para caracterizar las energías del primer y segundo eco se muestran más adelante y se ilustrará que efectivamente la ecosonda obtiene resultados distintos con respecto a los pebbles por su amplitud de voltaje y la respuesta del echo strength, siempre y cuando sea en condiciones de laboratorio ya que se analizó cuando el agua estaba en calma, la presión acústica de la onda era aproximadamente constante, el transductor estaba fijo en la parte superior de la tapa y las condiciones de la temperatura y la salinidad de la columna de agua se podían despreciar por la poca profundidad del tanque. Por otro lado si la superficie del agua comienza a tener movimientos ondulatorios, la respuesta de la amplitud del voltaje y el echo strength del cobble variarán de forma drástica ya que la presión longitudinal del pulso acústico no es constante en la columna del agua a causa de las interacciones con las partículas del agua que se mueven de manera diferente desde la superficie del agua hasta el fondo del tanque y esto hace que la presión de la onda acústica responda de diferentes maneras en un intervalo dado de tiempo conduciendo así a una variación del echo strength (dB).



Figura 40. Tamaño de grano del cobble (guijarro de 100 mm de diámetro)

4.1.2 El concreto

Un material estudiado en el laboratorio con el objetivo de analizar sus características físicas debido a la complejidad de las componentes geológicas que lo conforman fue el concreto (también llamado hormigón) ya que es el principal material que conforma el fondo del tanque del laboratorio. Este material se ha caracterizado por ser un producto resultante de la mezcla de un aglomerante (generalmente cemento, arena, grava o piedra machacada y agua) que al fraguar y endurecer adquiere una resistencia similar a la de las mejores rocas naturales.

4.1.3 La platina de acero

La platina que se utilizó en el laboratorio fue de acero (ver figura 41) no resistente a la corrosión¹¹, por tal razón no contiene cromo ni níquel que son los que ayudan a poseer una gran afinidad con el oxígeno para poder formar una capa pasivadora¹², ya que sin ésta tiende a oxidar la placa por agentes externos tales como sustancias electroquímicas, salinidad del agua que está en permanente contacto con el material y también la temperatura.

Las dimensiones de la platina (área de 1616.04 cm² y espesor de 8 mm) están lo suficientemente establecidas para permitir al haz acústico del transductor cubrir en gran parte el área irradiada con el fin de brindar información sobre el índice de la rugosidad y dureza del material.



Figura 41. Platina de acero oxidable

¹¹ Se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno

¹² Se refiere a la formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos.

El objetivo de hacer esta prueba experimental en el laboratorio se debe a que hay muchas embarcaciones hundidas en el fondo marino y es necesario averiguar de manera aproximada cual seria el valor de la dispersión acústica como también la amplitud de las señales de los ecos con el fin de identificar naufragios o aquellos objetos que se pueden considerar de gran valor.

Cabe notar que las pruebas experimentales son hechas a una profundidad baja, los gradientes de la temperatura, salinidad, densidad y presión son consideradas despreciables ya que se supone en un principio que la velocidad del sonido es constante mientras que se propaga por la columna de agua. Por esta razón la ecosonda es manejada con condiciones controladas en el laboratorio.

4.1.4 Parámetros de control del Software

El software eco control es el que permite saber de entrada cuáles son los parámetros más importantes para llevar a cabo un buen desempeño de la ecosonda ya sea en pruebas experimentales (laboratorio) o en la batimetría (en el campo). En condiciones de laboratorio se determinó, en ausencia de niveles de reverberación, que la potencia, el periodo del pulso, el tx blank (parámetro para medir la referencia del nivel medio de la columna del agua con respecto al fondo del tanque) y la profundidad del tanque fueran establecidas como se muestra en el cuadro 1, con el fin de analizar el primer y segundo eco de las gravas, concreto y la platina de acero.

Potencia: 1 KW
Tipo de pulso: 0.2 ms
Tx Blank: 0.9
Profundidad: 1,30 m

Cuadro 1

Para obtener una calibración de la batimetría depende no solo de las propiedades del fondo sino también de la columna de agua (temperatura, presión, densidad, entre otros) sin tener a consideración por supuesto los niveles de reverberación o tratar de ignorarlos lo máximo posible. Sin embargo no casi siempre se consigue

que la profundidad del agua (tanque) sea la misma para los diferentes materiales que se trabajó en el laboratorio debido a la atenuación que sufre la onda en la interfase agua-sedimento.

4.1.5 Amplitud de voltaje del primer y segundo eco para las gravas, concreto y platina de acero

La amplitud del voltaje registrado en el osciloscopio y en el software se aprecia en la figura 42, donde se señala el primer y el segundo eco que son fundamentales para describir las características del índice de la rugosidad y de la dureza de las gravas, concreto y platina de acero.

El registro del pebble en el osciloscopio muestra dos picos adicionales que representan el eco falso y el pulso que transmite el transductor. La reverberación (eco falso) es causada por las paredes del tanque debido a que la onda cuando incide sobre este tipo de fondo se dispersa con un ángulo tal que puede interferir en dichas paredes y por tanto la ecosonda lo registrará como un tercer pico y el pulso transmitido representa el desempeño del transductor (también se puede llamar una explosión de energía), el cual se configura mediante parámetros de entrada como la potencia (KW), ganancia y el periodo del pulso (que tan largo se necesita para que la onda viaje sin perder intensidad durante su propagación en el agua).

El análisis en el osciloscopio para verificar si la señal de voltaje pico del primer y segundo eco del pulso acústico que incide en un medio sedimentario como el cobble es la misma que se registra en el software (señal cuantificada en porcentaje) se puede apreciar en la figura 42, donde se evidenciaron dos picos adicionales que indicaron ecos falsos a diferencia del pebble que mostró solo un eco falso debido al tamaño de grano, es decir, la onda acústica tuvo mayor dispersión en los cobbles que en los pebbles.

Pese a que los picos del voltaje para los cobbles tuvieron un mayor efecto en cuanto a niveles de reverberación en comparación con los pebbles, se puede decir que la amplitud del voltaje y así mismo el valor del eco strength fue mucho mejor para aquellos tipos de grava de diámetro (promedio) 100 mm que para los que son de 31 mm (de diámetro) porque la onda acústica tuvo menos pérdidas de presión longitudinal en el agua en el momento de incidir en este tipo de sedimento de 100 mm. Con el hecho de trabajar en el laboratorio con estos dos tipos de gravas se pudo notar que la amplitud del voltaje podría ser proporcional al valor del eco strength para este caso particular; en otras palabras si se analizan los registros del pebble y del cobble (ver figura 42) se puede ver claramente que a menor amplitud del voltaje del primer eco significa (pero no siempre) que el valor del eco strength también es menor y viceversa.

La necesidad de determinar la respuesta de los picos de los ecos para el concreto se debe a la importancia de apreciar la forma como la ecosonda es capaz de discriminar una clase de material dentro de una mezcla, es decir, mirar e interpretar cómo el pulso acústico se dispersa en un medio que se conforma por varios tamaños de grano, lo cual se puede apreciar en la figura 42. Además se observa únicamente un eco falso cuya amplitud está muy cercana a la amplitud del segundo eco.

Los métodos acústicos dan por medio de los picos (figura 42) la posibilidad de atribuir al operador de la ecosonda la clase de fondo marino que podría estar evaluando de manera indirecta (se puede saber por el eco strength y la amplitud del pico). Por esta razón, el concreto que se utilizó en el fondo del tanque tuvo el propósito de analizar su índice de dureza y por tanto se probó que no importa la clase del material que se esté examinando, lo importante es la magnitud del segundo eco que siempre va estar por debajo del primer eco. Igualmente se puede apreciar en la figura 42 (concreto) que la magnitud del índice de la rugosidad no resultó tan alta debido a diferentes causas por las cuales significa que el pulso acústico depende definitivamente de las propiedades del agua y también de diversos tamaños de grano que constituyen el hormigón.

La representación del primer y segundo eco, tanto del hardware como del software para la platina de acero, se muestra en la figura 42. La forma de estas señales en el osciloscopio es diferente con relación a los tres materiales: concreto, pebble y cobble. La presencia de solo un eco no deseado permite ver que la dispersión de la onda sonora no influyó en gran parte en las paredes del tanque o alguna otra partícula flotando debajo de la superficie del agua. Considerando al acero un metal duro, se puede apreciar en la figura 42 que la amplitud del segundo eco sigue siendo menor que la amplitud del primer eco como era de esperarse. Además la amplitud del índice de la rugosidad es muy alta debido a que la base de la platina está muy oxidada, lo cual hace ver que no es lisa (ocurre más el fenómeno de la dispersión que la reflexión especular).

Los picos del primer y segundo eco representados en el software eco control se muestran en tiempo real (indicando en milisegundos el índice de la rugosidad y de la dureza del fondo marino), indicando la efectividad de la ecosonda en el momento de discriminar los fondos como también de ignorar aquellos ecos falsos (reverberación) provocados por extraños objetos flotantes en la columna de agua (en el mar) o aquellos que son provocados por las paredes del tanque (laboratorio).

Cabe recordar que la mejor manera de verificar si la ecosonda KNUDSEN 320 B/P discrimina los fondo sedimentarios es analizando los picos de voltaje capturados con el osciloscopio, que a su vez se encuentra conectado con el hardware del equipo y permite obtener información acerca de los valores numéricos de E_1 y E_2 .

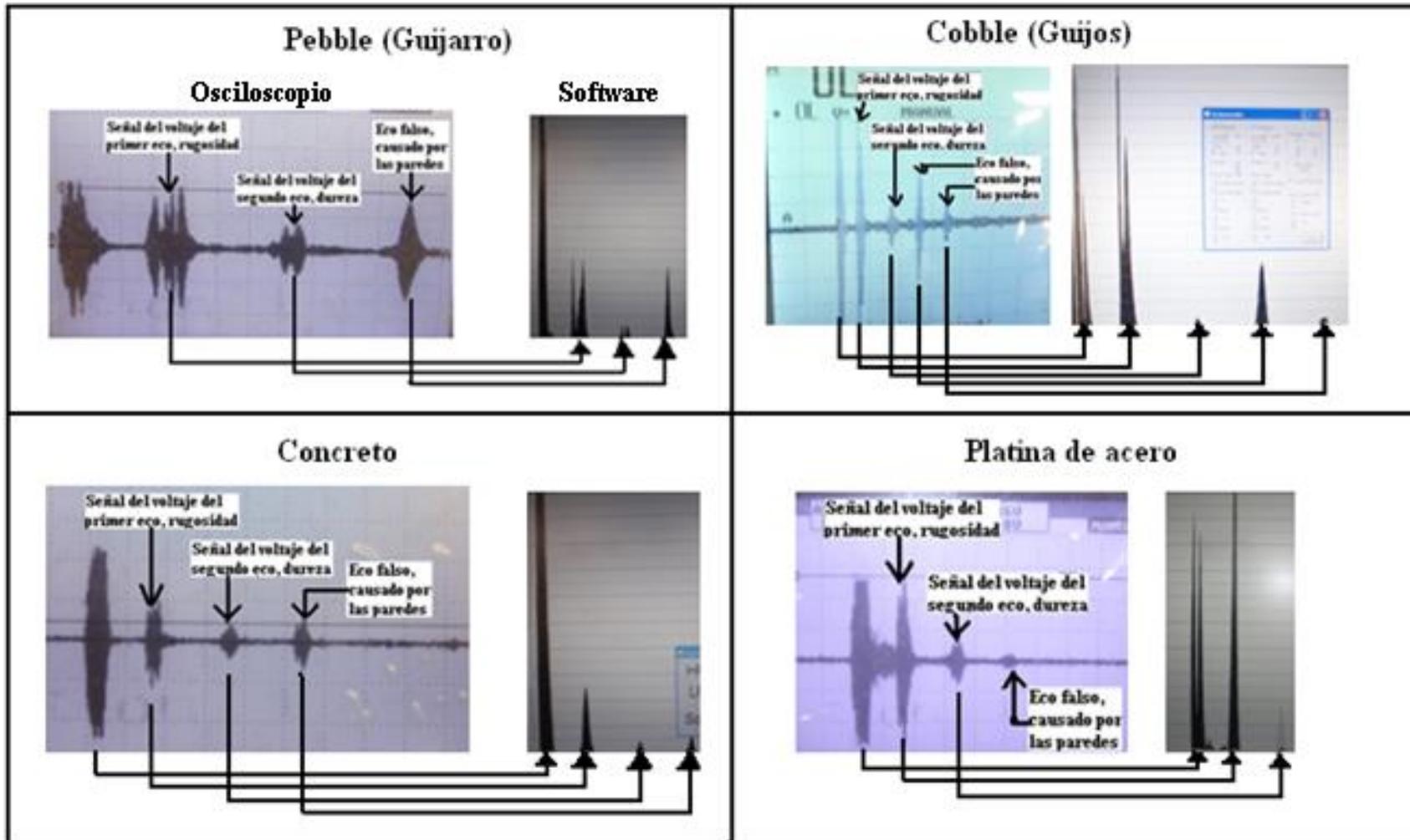


Figura 42. Señal de pico del voltaje del primer y segundo eco en el osciloscopio, señal cuantificada del primer y segundo eco en el software Eco-Control del pebble, cobble, concreto y platina de acero

4.1.6 Análisis de la señal del primer eco (rugosidad)

- **Comparación de la Señal (%) vs. Voltaje pico del eco para las gravas, concreto y platina de acero**

En la figura 43.a se muestra la curva de la señal del eco cuantificada en función del voltaje registrado en el osciloscopio para los pebbles. Por otro lado en esta figura se obtuvo que la mejor ecuación que se ajusta a los datos experimentales es la parábola con un coeficiente de determinación del 99.56%, lo cual significa que si el voltaje va aumentando o disminuyendo a causa de los parámetros de entrada del control del software lo hará también la señal del eco. Por esta razón en la figura 42 (refiriéndose a los pebbles) se puede ver claramente que la cantidad de picos registrados en el software (eco control) es proporcional a la cantidad de éstos en el osciloscopio.

Es claro que la curva de tendencia que se ajusta más a los puntos de la figura 43.b es la del modelo exponencial, con un coeficiente de correlación del 96.92%. Además si se compara con la de los pebbles se notan diferencias en cuanto a la amplitud del pico del voltaje y un tramo de la figura 43.b se comporta como constante en el eje del voltaje (V). Por esta razón la primera señal del eco para el pebble es distinta a la del cobble a pesar que sean de la misma naturaleza y pertenezcan al mismo grupo de las gravas.

La señal del primer eco (figura 43.b) varía exponencialmente a medida que la amplitud del voltaje aumenta hasta el valor 5.28 V para los cobbles. No obstante luego de este valor la señal del eco sigue aumentando pero con una amplitud del voltaje constante, esto quiere decir que para estimar el índice de la rugosidad basta contener un porcentaje de señal máximo del 58% ya que si aumentamos la ganancia del pulso acústico no se registrará mayor diferencia en la amplitud del voltaje. Por lo tanto si se analiza el pico de la señal del eco, con solo el 58% del registro eléctrico capturado por el transductor es suficiente para tener un buen análisis del índice de la rugosidad sin tener en cuenta ecos falsos y por consiguiente desde el 58% al 100% de la señal acústica se podría ignorar ya que no se diferencia en el voltaje y así en el modelo físico.

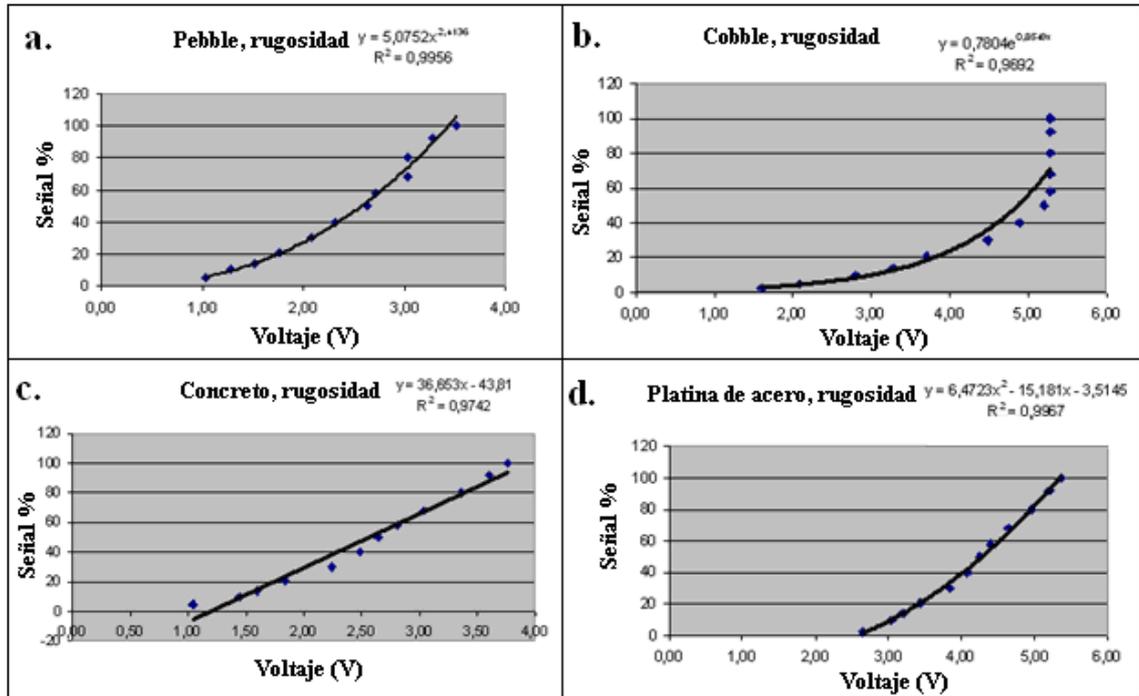


Figura 43. Variación de la señal (%) registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero.

No todos los materiales de cualquier tipo responden de manera idéntica a las señales de estímulo como puede observarse en la figura 43. En esta se nota que el resultado del concreto tiene una relación señal (%) vs amplitud del voltaje (V) del pico muy diferente con respecto a las figuras del pebble, cobble y acero en cuanto a la función matemática que mejor se ajusta a los datos experimentales. Con la prueba experimental hecha en el laboratorio, se obtuvo que el nivel de los ecos que retornan del fondo no necesariamente dependa de las características de la columna de agua sino de la naturaleza de misma del material.

Es conveniente ilustrar que en todos los materiales analizados hasta ahora la señal de amplitud del eco (software) varía en proporción directa con la amplitud del voltaje (osciloscopio) ya sea de forma polinomial, exponencial o potencial dependiendo de la clase de material que se halla analizado, esto con el fin de comprobar experimentalmente que las energías E_1 y E_2 son efectivamente la base para calcular el índice de la rugosidad y de la dureza del material respectivamente. Además en la figura

43.d representa una ecuación de segundo grado donde quiere decir que una señal de 20% al 40% simboliza una amplitud de tres a cuatro voltios y en consecuencia el rango por el cual esté operando la ecosonda que es de 9 a 36 voltios DC hará que el transductor procesando a altas frecuencias capte una señal determinada que es suficiente para discriminar el tipo de material.

- **Comparación de la Ganancia vs. Voltaje pico del eco para las gravas, concreto y platina de acero.**

Para hacer un buen uso de la ganancia (ver sección 1.5.3.1.1) debe tener en cuenta no solo el tipo de fondo que se está examinando sino también las condiciones del agua, es decir, la temperatura y las sustancias disueltas (ver sección 1.5.1.1.3 y 1.5.1.1.4) en el tanque del laboratorio. Se puede apreciar en la figura 44.a que la ganancia del pulso acústico varía de manera logarítmica con respecto al registro de la amplitud del voltaje obtenido para la primera señal del eco, lo cual da por hecho que a mayor ganancia será mayor la amplitud del voltaje. Cabe recordar que la onda acústica (o pulso acústico) es emitida por un transductor piezoeléctrico que tiene por función dar información de la profundidad y de sus características gracias a la ganancia, ya que sin ésta es imposible que la propagación de la onda por la columna del agua y el eco se logren de forma exitosa.

La mejor manera de controlar la fuerza del eco de acuerdo con su nivel de energía es aplicando control de ganancia automática (AGC), para que el ecograma tenga una buena resolución y así los picos del primer y segundo eco sean más claros sin tener en cuenta los niveles de reverberación. En consecuencia, las pruebas experimentales en el laboratorio al momento de evaluar a los cobbles se dieron de manera manual, es decir, el operador le introducía al software la ganancia (amplificación de la señal) con el propósito de determinar cómo las amplitudes de las señales del voltaje variaban y así evaluar la eficiencia de esta muestra en respuesta al pulso acústico que emitía el transductor. Por esta razón la naturaleza del tamaño del sedimento depende en una cierta magnitud de la amplificación de la señal para que pueda tener una respuesta coherente con el voltaje sin necesidad de tener ecos falsos, por consiguiente según la figura 44.b,

la curva de tendencia que más se ajustó a los puntos fue una ecuación polinomial de orden tres en la cual cuando se le daba la orden a la ecosonda de emitir con una amplificación de 60 a 70, la respuesta del voltaje fue la misma sin ocasionar ruido. La diferencia entre el análisis de la rugosidad del pebble con la del cobble se debió a dos factores: la primera varían en cuanto a su función matemática, y la segunda la amplitud del pico del voltaje resultaron ser muy distinta.

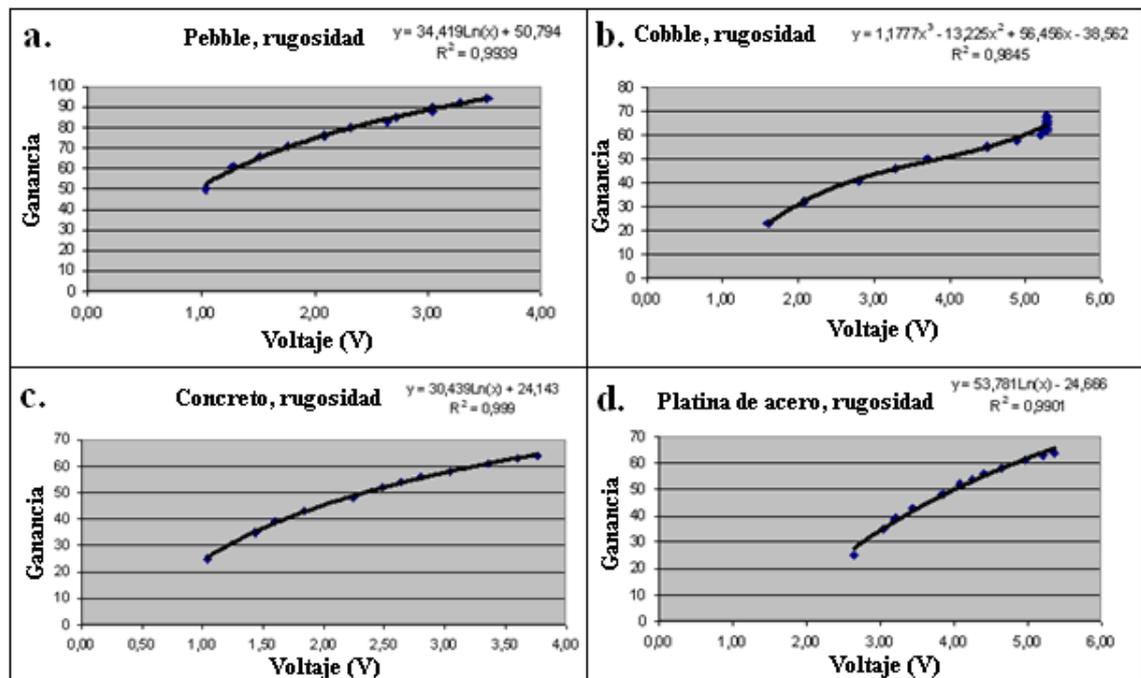


Figura 44. Variación de la Ganancia del pulso acústico registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero

Según la figura 44.c, el promedio para establecer una ganancia adecuada en función del material que se evalúo y del día por el cual se hizo (la temperatura y las sustancias disueltas en el agua del tanque varían con la cantidad de experimentos que se hagan allí) es 45, resultando así una amplitud del voltaje cercana a 2 V. Lo importante de esta gráfica es la relación matemática que existe entre la ganancia y el voltaje. Por eso la función que mejor se ajustó a los datos experimentales es el logaritmo, con un coeficiente de determinación de casi 100% y con una pendiente positiva. Por otro lado, teniendo en cuenta el contenido de material que compone el concreto, surgió que si se

aumenta mucho la ganancia por un factor de 10, la amplitud del voltaje del primer eco solo variara por un factor de 0.5 V, de manera que la principal causa para que genere un buen pico del eco no solo es manipular la amplificación de la señal sino los parámetros de control (potencia, tx blank, periodo del pulso).

Se analizó que en función de una buena amplificación del pulso emitido por el transductor de 200 kHz permitió visualizar una determinada amplitud del voltaje originado ya sea por el fondo marino (Golfo de Urbá) o por la clase de material evaluado en el laboratorio. Con base en esto, los ensayos realizados en el laboratorio (condiciones ideales) demostraron que la ganancia varía logarítmicamente y polinómicamente con el voltaje pico del eco y en efecto se adquirió un rango de amplificación que osciló entre 30 a 60 (ver figura 44.d), lo cual bastó para averiguar el índice de la rugosidad de la platina de acero. Del mismo modo si se hace pruebas con una profundidad mayor que 10 metros, seguramente la amplificación para analizar el primer eco tendrá que ser mayor que 60 e incluso sobrepasar los 100 debido que las altas frecuencias son muy susceptibles a que se atenúen por los factores físicos explicados en la sección 1.5.

- **Comparación del Eco-Strength vs. Voltaje pico del eco para las gravas, concreto y platina de acero.**

En la geofísica marina se ha establecido el criterio que a menor sea el tamaño de grano del sedimento mucho menor será el valor del eco strength en decibeles (Jackson y Richardson, 2001; Du y Chen, 2007). Este hecho se verificó en el laboratorio utilizando cuatro distintos materiales, en donde se comprobó que no importa la variación de la ganancia o la señal del primer eco para dar un buen resultado del eco strength de las dos distintas clases de gravas, concreto y platina de acero. Al referirse a la figura 45.a, se experimentó que independiente de la amplitud del voltaje del primer eco fue constante el valor del eco strength que marcó -19 dB para los pebbles. Sin embargo varió para los cobbles que marcó entre -13 y -11 dB, -11 y -10 dB para el concreto, -9 y -8 dB para la platina de acero.

El resultado del análisis de los cobbles de la figura 45.b quiso decir que a menor amplitud del voltaje de la señal del primer eco, menor fue la dispersión acústica y por tanto menor fue la pérdida de la intensidad en el momento de incidir en este tipo de grava.

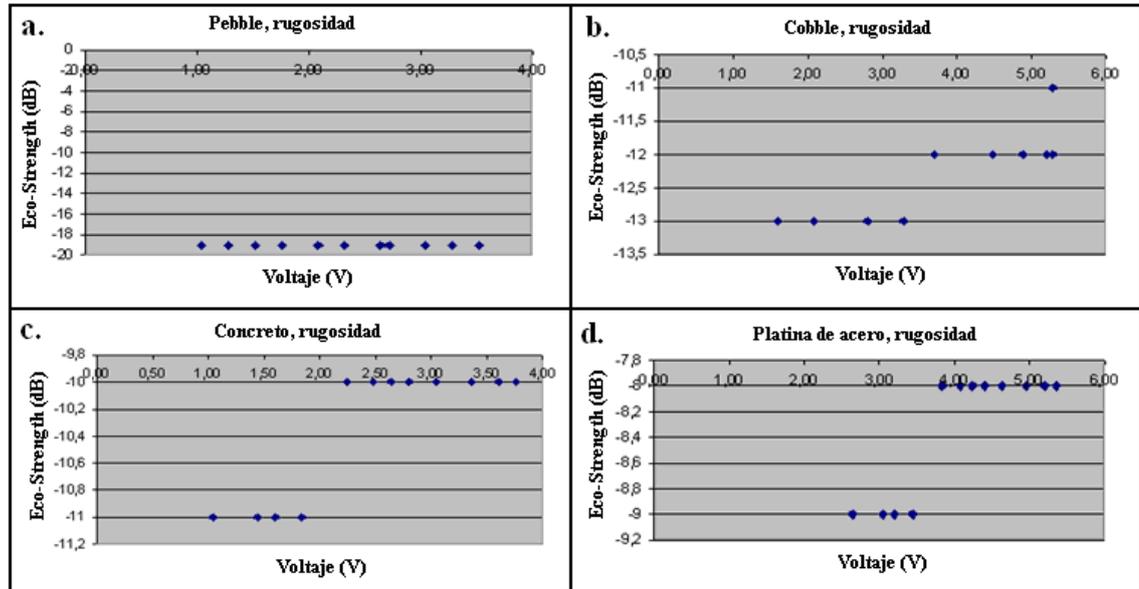


Figura 45. Variación del Eco-Sternngth registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero.

La cobertura del haz acústico de 200 kHz es angosta por la poca profundidad que hay en el tanque (1.30 m), por lo tanto la dispersión acústica en el concreto pudo haber afectado a múltiples materiales (arena, grava, cemento que están incrustadas en la superficie del fondo) de modo que la amplitud del voltaje relativo a la rugosidad no resultó tan alta y en consecuencia el eco strength no tuvo mayor variación con respecto al pico del primer eco. En otras palabras, independiente del resultado de la medida del índice de la aspereza del concreto, se puede decir con relación a esta figura 45.c que la dispersión del pulso no varió con la ganancia debido a que depende de la amplitud del eco (figura 44.c).

Los cuatro materiales puestos en el fondo del tanque y en efecto investigados por medio de un transductor de 28/200 kHz, a una profundidad constante y además la superficie del agua totalmente en calma, se determinó que haciendo uso de una geometría mono-estática (modelo físico) para analizar la señal del primer eco, se requería mantenerla estable siempre y cuando ningún agente externo interfiriera en la señal por diversas causas, tales como perturbar el agua (generar olas), el transductor produciendo movimientos laterales, entre otros. Teniendo en cuenta estos problemas se pudo estudiar que el eco strength no depende (para ningún material analizado en el laboratorio) por ninguna razón de la amplitud del voltaje para hallar información del índice de la rugosidad de la platina. La figura 45 aprueba el hecho que el eco strength permanece estable a no ser que la amplificación sea tan alta que permita que la fuerza del eco empiece a variar y así generar ecos falsos sin poder tener una información concreta acerca del primer eco.

4.1.7 Análisis de la señal del segundo eco (dureza)

- **Comparación de la Señal (%) vs. Voltaje pico del eco para las gravas, concreto y platina de acero**

La figura 46.a representa la variación de la amplitud del voltaje (tercer pico en el osciloscopio) con respecto a la cuantificación de la señal del segundo eco, la cual es semejante a la figura 43.a (representación del primer eco) debido a que tienen el mismo comportamiento matemático (potencia) y aproximadamente el mismo coeficiente de determinación. A partir de las figuras 46.a y 43.a se concluye que independiente de que el pulso acústico incida una o dos veces sobre los pebbles, la señal cuantificada (software) y el registro del voltaje (osciloscopio) en función del tiempo da aproximadamente igual para el índice de la rugosidad y la dureza sin que tengan ventaja la una sobre la otra.

A diferencia de la figura 43.b donde los puntos se ajustaron a una función exponencial con el objetivo de analizar la variación de la señal en porcentaje del primer eco (rugosidad) con respecto a la amplitud del voltaje registrado en el osciloscopio, en la

figura 46.b los puntos tienden más a una función potencia con un coeficiente de determinación del 99.29%. Una vez más se observa que la señal del eco (vista en el software) varía de manera parabólica con la amplitud del voltaje, por tanto si se nota que el pico varia entre 20% y 40% en el software entonces registra una amplitud del voltaje entre dos y tres voltios en el osciloscopio. Con este resultado experimental hecho en el laboratorio, se puede decir que la amplitud del voltaje del segundo eco (tomado desde el eje de referencia hasta el pico del eco) oscilará entre un mínimo de un voltio y un máximo de cinco voltios

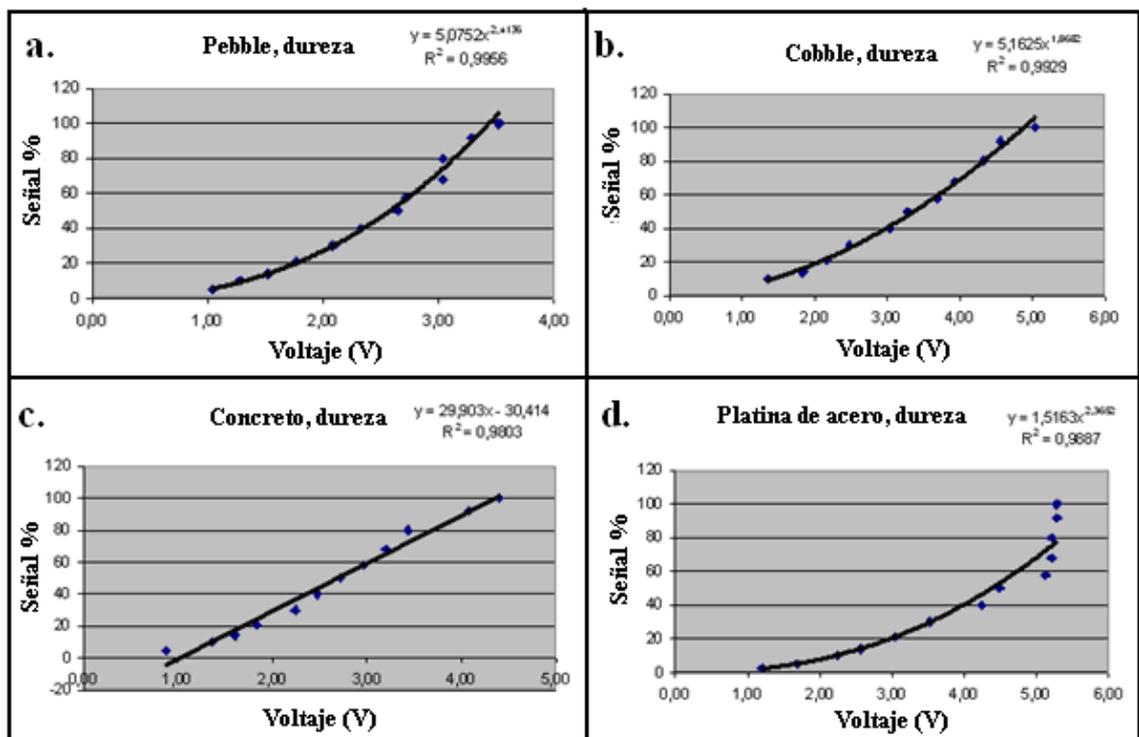


Figura 46. Variación de la señal (%) registrada en el software versus el voltaje (V) de la amplitud del pico del segundo eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero

La línea de tendencia que mejor se acopló a los datos de la figura 46.c fue la línea recta con un coeficiente de determinación del 98.03%. La señal del segundo eco registra la misma función matemática de la figura 43.c, de ahí que las amplitudes de los voltajes para las dos señales que retornan del concreto sean proporcionales a las escalas de porcentaje que figuran en el software. Así mismo los puntos experimentales de la figura

46.c manifiestan que si se aumenta la amplitud del voltaje pico a una razón de un voltio aproximadamente, la señal del segundo eco aumenta a una razón de 0 a 20% (para los cuatro primeros datos, comenzando desde 1 V en el eje x). Además con una escala del 20% al 40% y así sucesivamente hasta llegar a la escala del 100% la amplitud del voltaje aumenta a razón de 0.5 V.

En la figura 46.d se encontró una relación matemática entre la señal (en escala de porcentaje) y la amplitud del voltaje del eco. Además no solo los datos experimentales de la señal del segundo eco para la platina se ajustan más a una potencia, sino los otros tres materiales evaluados también resultaron con la misma función, lo cual quiere decir que la señal que indica relativo a la dureza, está relacionado con el software y el osciloscopio. Así mismo en condiciones ideales de laboratorio permite resaltar que una escala de 0 a 60 % se logró tener una amplitud de uno a cinco voltios debido al material piezoeléctrico del transductor y también de un proceso de filtros que atraviesa por el hardware de manera que pueda dar información del voltaje.

- **Comparación de la Ganancia vs. Voltaje pico del eco para las gravas, concreto y platina de acero.**

La variación de la ganancia del pulso acústico con respecto al registro de la amplitud de pico del voltaje del primer eco de la figura 58.a es muy similar al de la figura 61.a en cuanto a que la curva se ajustan más entre si a la función logaritmo y al coeficiente de determinación. La diferencia que hay entre estos dos tipos de figuras del primer pico (índice de rugosidad, figura 44.a) y del segundo pico (índice de dureza, figura 47.a) consiste en la magnitud de la ganancia de la onda acústica, ya que para hallar el valor de la energía del primer eco se necesita poca amplitud de la señal (por medio del software). La causa es que la onda se refleja una vez en el fondo pero debe tener en cuenta las propiedades físicas de la columna del agua (si la densidad del medio por el cual la onda se propaga es muy alta o la temperatura, presión y salinidad son muy altas la ganancia que el operador le debe suministrar a la ecosonda debe ser alta con el fin de que la intensidad o la presión acústica no se atenúe o se pierda antes de tocar el fondo), mientras que si se quiere obtener buena información del segundo eco (dureza) debe

tener un balance entre el nivel de reverberación y la ganancia del pulso acústico, es decir, es necesario que la onda se propague cuatro veces a través de la columna del agua para permitir discriminar la dureza del fondo con cobertura sedimentaria de pebbles, por esta razón según la figura 47.a se debe imprimir una ganancia a la onda acústica tan alta para que permita una buena visualización de la magnitud del segundo eco. Sin embargo se requiere tener cuidado en el momento de discriminar la dureza porque a mayor ganancia del pulso acústico tienden a formarse eco trazos (ecos falsos). Se puede decir de la figura 47.a que el nivel óptimo que se registró en el laboratorio para obtener el pico de la dureza del pebble fue cuando el osciloscopio marcó 1 voltio (amplitud del pico desde el eje) con una ganancia de 80. El registro de la magnitud del voltaje para los dos casos de las gráficas de la rugosidad y dureza mostró que varían entre uno y cuatro voltios independientemente que fueran característicos para hallar el primer o el segundo eco. Además se supo con certeza (de acuerdo con los resultados experimentales en el laboratorio) que a menor ganancia del pulso acústico menor es la amplitud del voltaje para caracterizar a los pebbles. Cabe mencionar que no solo esta ganancia es función de la columna de agua sino también del tipo de tamaño de grano que interactúe con la onda, de manera que el osciloscopio registre un determinado valor y grafique la forma del pico.

Si se evalúa un grupo de cobbles en un volumen y en una área de determinada dimensión como es el caso de un tanque, se puede determinar la cantidad de ganancia o amplificación de señal que se necesita para obtener un buen registro de amplitud del segundo eco sin tener en cuenta interferencias de señales que se originan en las paredes. Debido a que se sabe por pruebas de laboratorio (condiciones ideales) que de forma aproximada la amplificación del pulso acústico varía en una función logarítmica con la amplitud del voltaje (ver figura 47.b). Por esta razón al momento de hacer un trayecto batimétrico en una zona del mar dada y además si se conoce la geología del fondo marino (la primera capa de la superficie del fondo ya que se utilizan altas frecuencias, 200 kHz) se podría saber de antemano la magnitud de la ganancia que se necesita con el fin de obtener un buen eco por medio de la amplitud del voltaje sin ocasionar reverberación alguna.

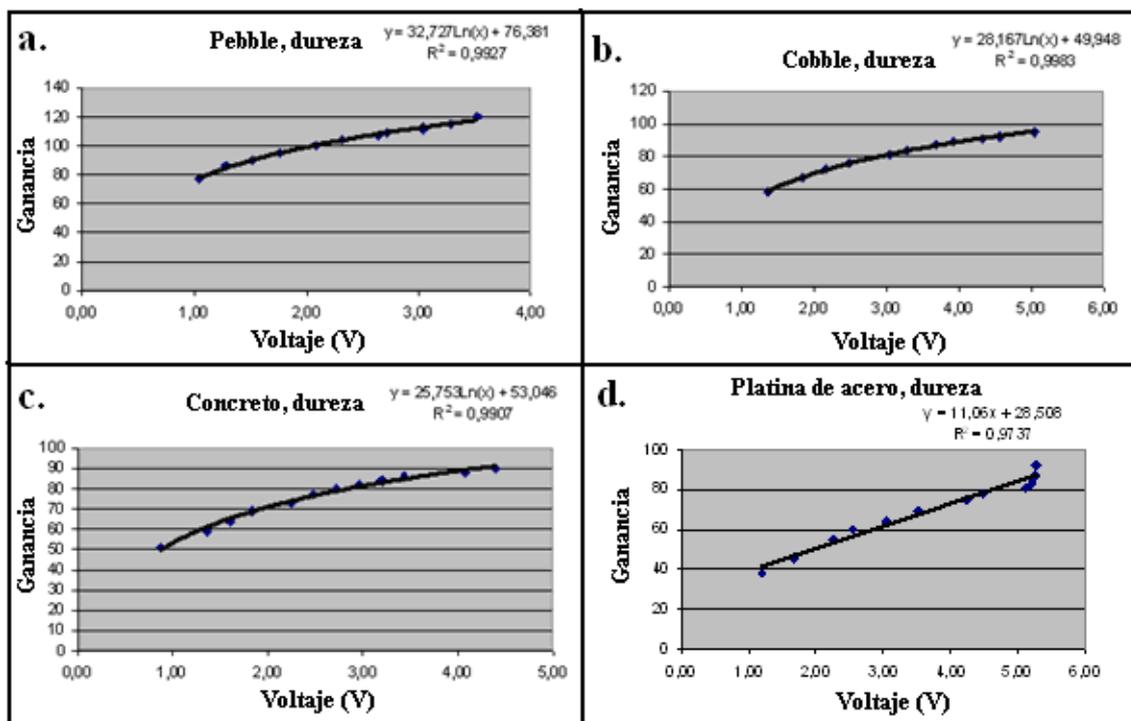


Figura 47. Variación de la Ganancia del pulso acústico registrado en el software vs el voltaje de pico del segundo eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero

La intensidad del segundo eco que retorna del fondo del cuerpo de agua luego de haberse reflejado en la superficie de ésta, tiene altas posibilidades de atenuarse debido a varios factores físicos. Por esta razón no casi siempre la ecosonda registra la amplitud del segundo eco (ya sea en el osciloscopio o en el mismo software eco control o en el postsurvey) de modo que no necesariamente sea una justificación para no poder calcularlo porque es conveniente recordar que la información de la segunda señal por más pequeña que sea es importante para poder predecir qué tan rugoso y duro se halla el tipo de material que reposa en la superficie del fondo. Con base en esto, las pruebas experimentales que se hicieron en el laboratorio para amplificar la señal, no solo indican dureza sino también impedancia acústica entre la interfaz agua-sedimento. Aquellos sedimentos que cubren desde la arcilla hasta la arena fina se consideran lisos y suaves de manera que el segundo eco no es tan visible como si lo podrían ser aquellos sedimentos como las arenas gruesas, grava, basamento o cualquier tipo de material duro en las que se destaca en esta sección. Según la figura 47.c la mínima amplificación que se necesita para que la señal del segundo eco sea visible sin tener en consideración

niveles de reverberación en el ecograma es 50, produciendo así una amplitud del voltaje de solo un voltio. No obstante si se aumenta aún más la ganancia, la amplitud sigue creciendo de forma logarítmica generando gradualmente ecos falsos (cada vez que se amplifique la señal del transductor los ecos no deseados crecerán constantemente).

Por otro lado, la máxima amplificación (figura 47.c) que se le ingresó al programa fue 90 debido a que el pico superaba los límites establecidos en la ventana del software (escala del 0 a 100 %). Además con este tipo de amplificación era suficiente para que los ecos no deseados comenzaran a ser notables y no dejaran caracterizar de forma exitosa la señal de la dureza del concreto. Así mismo la máxima amplitud se registró en 4.40 V pero no era lo ideal porque en el ecograma comenzaba a tener ruido que impedía obtener buenas señales.

Los tres materiales examinados hasta ahora indican que la ganancia varía logarítmicamente con la amplitud del voltaje (para el caso del segundo eco). No obstante refiriéndose a la figura 47.d la relación que hay en la ganancia con el voltaje es una línea recta. La amplificación de la señal según la figura 47.d, resultó a partir de 40 obteniendo una amplitud del pico de solo un voltio. Sin embargo, si se aumentaba la ganancia a 80 o más, no era recomendable porque se producía ruido y pobre en la resolución del perfil batimétrico.

- **Comparación del Eco-Strength vs. Voltaje pico del eco para las gravas, concreto y platina de acero.**

En la figura 48.a se pudo notar que a menor magnitud del eco-strength, mayor era la amplitud del voltaje. A diferencia con la figura 45.a donde el eco strength permaneció constante a medida que la amplitud del pico de la señal aumentaba debido a la ganancia, la figura 48.a muestra que ocurre todo lo contrario porque la amplificación que se requiere para el segundo eco debe ser mayor con el fin de obtener información adicional acerca de las características del pebble, por lo cual se requiere analizar hasta qué punto del valor del echo strength es capaz la ecosonda de lograr un buen pico del índice de la dureza sin tener en cuenta niveles de reverberación. Por medio de esta hipótesis se

verificaron dos casos, el primero de ellos es que a mayor ganancia del pulso acústico mayor será el valor del echo strength y el pico del voltaje; el segundo caso mostró que a partir del valor -21 dB empezaba a tener ecos falsos a causa de las paredes del tanque por el resultado del tamaño de grano del pebble, debido a que el pulso acústico, cuando incide en este tipo de grava, se dispersa en todas las direcciones dando así reflexiones adicionales en las paredes y mala caracterización del material ya que se superponen dos tipos de medios como la grava y el concreto.

En la batimetría, su principal objetivo se centra en caracterizar el perfil batimétrico del fondo marino (con el uso de las altas frecuencias) y hallar el espesor del subsuelo marino dependiendo del rango de las bajas frecuencias por cual se utilice. Además se ha aclarado que no solo la ecosonda indica la profundidad (ya sea en metros, pies o millas) sino también la dispersión de la presión de la onda acústica longitudinal que ha incidido sobre un fondo sedimentario. La batimetría hecha en el Golfo de Urabá se focalizó en los ecogramas para 200 kHz y 12 kHz, de manera que tuviera una buena resolución del fondo sin tener ruido en la columna de agua (objetos no deseados). Con base en esto, la ecosonda calculaba en tiempo real los picos del primer y segundo eco para cada tipo de fondo marino, esto se logró por los parámetros de entrada del software sin tener en consideración la amplitud del segundo eco, solamente se tuvo en cuenta el desempeño del transductor para producir un buen ecograma. En cuanto a las representaciones de los ecos dados por los picos, se procesaron en el laboratorio para elaborar la pregunta, qué tan rugoso y duro estuvo el fondo sedimentario del Golfo de Urabá. Además de esto, los análisis en el laboratorio para evaluar la eficiencia de la ecosonda en la captura de los registros del segundo eco del cobble fueron importantes para visualizar la relación entre la amplitud del voltaje y el eco strength, en consecuencia según la figura 48.b se ve claramente que a mayor dispersión del pulso en la superficie del fondo (muestras de cobble) mayor es la amplitud del voltaje, sin embargo aumentan los niveles de reverberación (paredes del tanque, partículas diminutas flotando, entre otros) dentro del haz acústico que transmite el transductor.

Para el caso particular de un tamaño de grano, que osciló alrededor de los 100 mm y clasificado como bloque, la función matemática que mas se ajustó a los puntos de la

figura 48.b fue una ecuación de línea recta con un coeficiente de determinación del 94.98%. Por tanto se puede decir que la fuerza del eco cuando incide por primera y segunda vez sobre el lecho marino cambia en cuanto a su intensidad acústica.

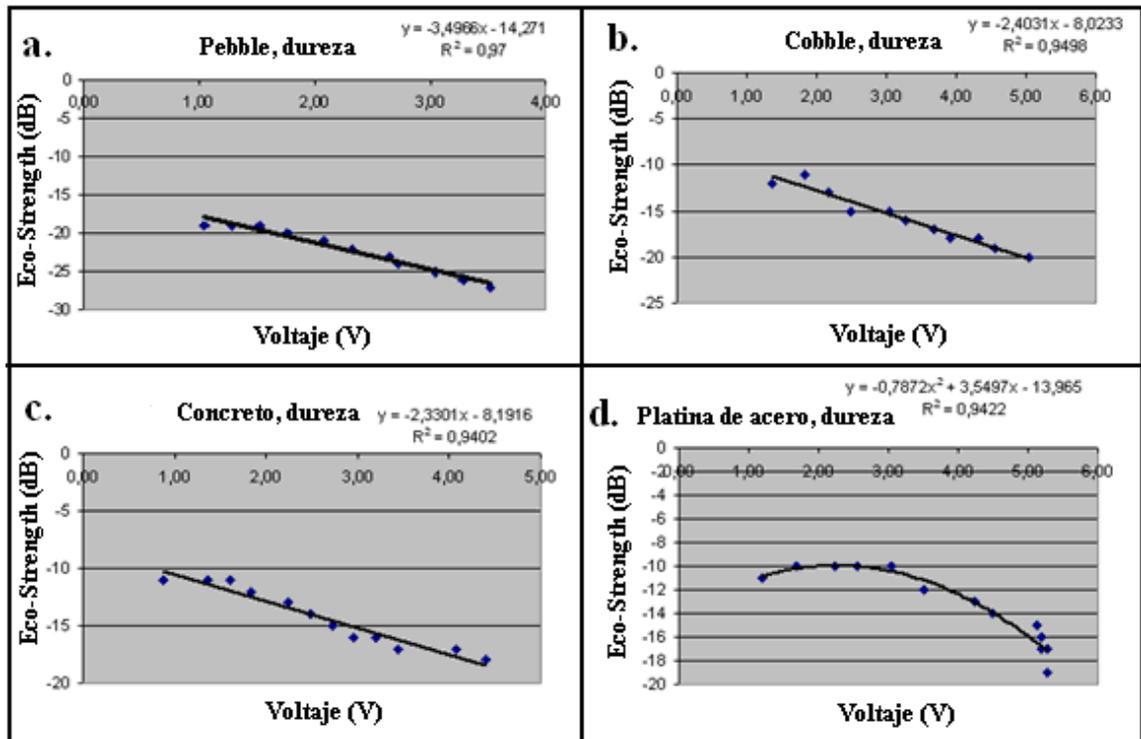


Figura 48. Variación del Eco-Sterngth registrado en el software vs el voltaje de pico del primer eco registrado en el osciloscopio para el pebble, cobble, concreto y platina de acero

El análisis del segundo eco conforme a la figura 48.c empezó a ser inestable cuando la amplitud del voltaje superaba los dos voltios ya que la dispersión acústica comenzó a ser susceptible con la amplificación de la señal y también con variaciones muy pequeñas de temperatura, entre otros. La función matemática que preferiblemente se ajustó a los datos experimentales de la figura 48.c es una ecuación de línea recta, lo cual tuvo un significado muy particular porque indicó que en un rango de amplitud de uno a dos voltios el eco strength era estable, es decir fue el punto exacto para procesar un buen grado de dureza. Sin embargo cada vez que la amplitud (en el eje x) fuera más grande se originó los ecos que no son de interés y desde luego el eco strenght bajó gradualmente hasta un límite que eran los -18 dB con una amplitud de 4 V. Con los

datos del segundo eco obtenidos hasta ahora es factible que el índice de la dureza del material esté preferiblemente entre 1 a 3 V de amplitud, ignorando así los ecos no deseados.

La mejor ecuación que más se ajustó a los datos de la figura 48.d fue el polinomio de grado dos. Según esta figura, se interpretó que la amplitud del voltaje de 1 a 3 V aproximadamente, la dispersión acústica oscilaba entre -10 a -12 dB, por el hecho que no presentaba ninguna anomalía que permita la obtención de baja resolución ya sea tanto en el ecograma como la representación de los picos de los ecos. Así mismo a partir de los tres voltios hasta llegar a cinco no representó un buen eco debido a dos razones: la primera porque el eco strength empezó a decrecer a causa de las paredes del tanque o algún cuerpo presente en la columna de agua y la segunda porque la amplificación de la señal debió ser proporcional a la profundidad, es decir, dependiendo del valor de la ganancia se logró que el valor E_1 y E_2 tuvieran un valor característico del eco strength que coincidió con el tipo de suelo y a su vez estuvieron en un rango establecido para determinar que la efectividad de la dispersión de la onda fuera importante tanto para la rugosidad como para la dureza.

Los resultados experimentales de los cuatro materiales para analizar la relación entre el Eco-Strength vs. Voltaje mostraron que a menor amplitud del pico, mayor fue la dispersión. Por tanto si la amplitud empezaba a crecer, el eco strength disminuía aún mas provocando así ecos no deseados que hacia que la señal del segundo eco no fuera tan significativa para discriminar el grado de dureza del material debido a que podría contener información de otros cuerpos de agua.

4.2 Análisis y resultados del Software

Se tuvieron cuatro tipos de resultados ejecutados con el programa MATLAB mediante el uso del algoritmo del método estadístico y la red neuronal, por otro lado se utilizó el programa Excel para almacenar los 3740 datos adquiridos durante el recorrido batimétrico del Golfo de Urabá y por último el software ARCGIS para visualizar en un mapa la distribución espacial de los sedimentos desde el sur hacia el norte. En la primera sección de los resultados se presenta la gráfica de E_1 vs E_2 con el fin de mostrar

los diferentes grupos que posiblemente conforman el relieve del Golfo, en la segunda sección se analiza la distribución espacial de los diferentes tipos de sedimentos, desde el lodo hasta los fondos rocosos, se muestra como varía el Eco-Strength frente a diferentes variables geofísicas y se definen los posibles grupos en función de la gráfica y finalmente se muestran los resultados obtenidos en el laboratorio.

4.2.1 Análisis del resultado de la gráfica de rugosidad versus dureza de los sedimentos del golfo de Urabá

Con el empleo del programa Excel (donde se almacenaron los datos) y Matlab (donde se implementó el método estadístico y la red neuronal) se logró construir la gráfica de E_1 (índice de rugosidad) y E_2 (índice de dureza) con el propósito de analizar que tan rugoso y liso se conformaba el relieve del Golfo de Urabá, con el apoyo gráfico del sistema comercial RoxAnn se determinó la clasificación de los fondos que ayudaron aclarar la geología de la zona.

La gráfica dada en la figura 39 representa los resultados arrojados por la red neuronal con el método estadístico *Euclidean Complete* (ver sección 3.4) donde se observa que posiblemente la batimetría del Golfo está conformada por sedimentos suaves y duros. Un aspecto importante en el método de clasificación utilizando la ecosonda Knudsen 320 B/P es que tiene la capacidad de dar información de las características de cuerpos de agua. Sin embargo se hace necesario el uso de otros procesos matemáticos para poder llevar a cabo la clasificación, de modo que se utiliza una herramienta adicional como el software MATLAB y Excel para complementar un buen sistema de clasificación de fondos de cuerpo de agua teniendo en cuenta principalmente los conceptos de geofísica marina y por tanto la programación.

En el párrafo siguiente se explica la descripción geológica de la zona basada en la gráfica de E_1 vs E_2 :

A la fecha se han diferenciado cinco tipos de materiales de fondos en el Golfo de Urabá, cada uno de ellos agrupado en un rectángulo y numerado en la Figura 49. El grupo

número cinco agrupa los materiales de máxima dureza y rugosidad, correspondientes a los fondos rocosos del sector noroccidental del Golfo, en donde rocas de afinidades basálticas y terrazas calcáreas bordean la costa actual. En el otro extremo, el grupo número uno agrupa los materiales con la mínima dureza y con la mínima rugosidad, correspondientes a muestras de lodos orgánicos, típicos de los fondos profundos (45 m a 60 m) de los sectores centrales del Golfo. Los restantes grupos se interpretan como tipos de fondos con coberturas intermedias: el número dos como un grupo intermedio mínimo (limo), el número cuatro como un intermedio máximo (arenas de grano grueso abundantes en el prodelta próximo del río Atrato), y el número tres como mezclas de limos y arenas finas abundantes en el sector de la Bahía Colombia.

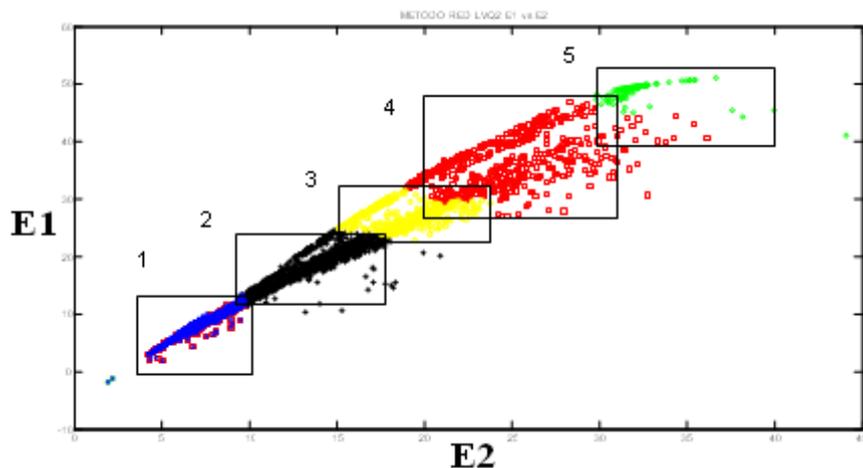


Figura 49. Caracterización de los cinco grupos de sedimentos encontrados por el método de red neuronal Learning Vector Quantization (LVQ2), E1 vs E2, donde E1 es rugosidad y E2 dureza. En esta figura se puede identificar la rugosidad y la dureza gracias a la onda acústica ultrasónica que se reflejó y de acuerdo con la señal de voltaje registrada en la ecosonda se pudo calcular sus características físicas. Los rectángulos son los definidos por el sistema RoxAnn (OHI, 2005).

4.2.2 Análisis del resultado de los datos mapeados en el Golfo

Con respecto a la sección 4.1.1 de la gráfica de resultados de E_1 vs E_2 se vio la necesidad de señalar con base en un mapa del Golfo los respectivos fondos de sedimentos de los diferentes lugares pertenecientes a cada eco registrado por la ecosonda KNUDSEN 320 B/P, cabe anotar que sin el dispositivo DGPS no sería posible

localizar los diferentes registros, de este modo se tuvo en cuenta las posiciones geográficas latitud y longitud (en el anexo C se muestran las coordenadas latitud y longitud de varios registros de la batimetría y mostrados en Google Earth). Se puede apreciar en la figura 50 (el mapa se obtuvo a través del ARCGIS) las líneas batimétricas cuyo resultado arrojaron la clase del sedimento de cada eco, mientras que en la figura 51 se muestran los tipos del fondo pero aplicando un método de interpolación llamado Kriging en la que se aprecia unas manchas de colores indicando aproximadamente la distribución espacial por toda el área del Golfo.

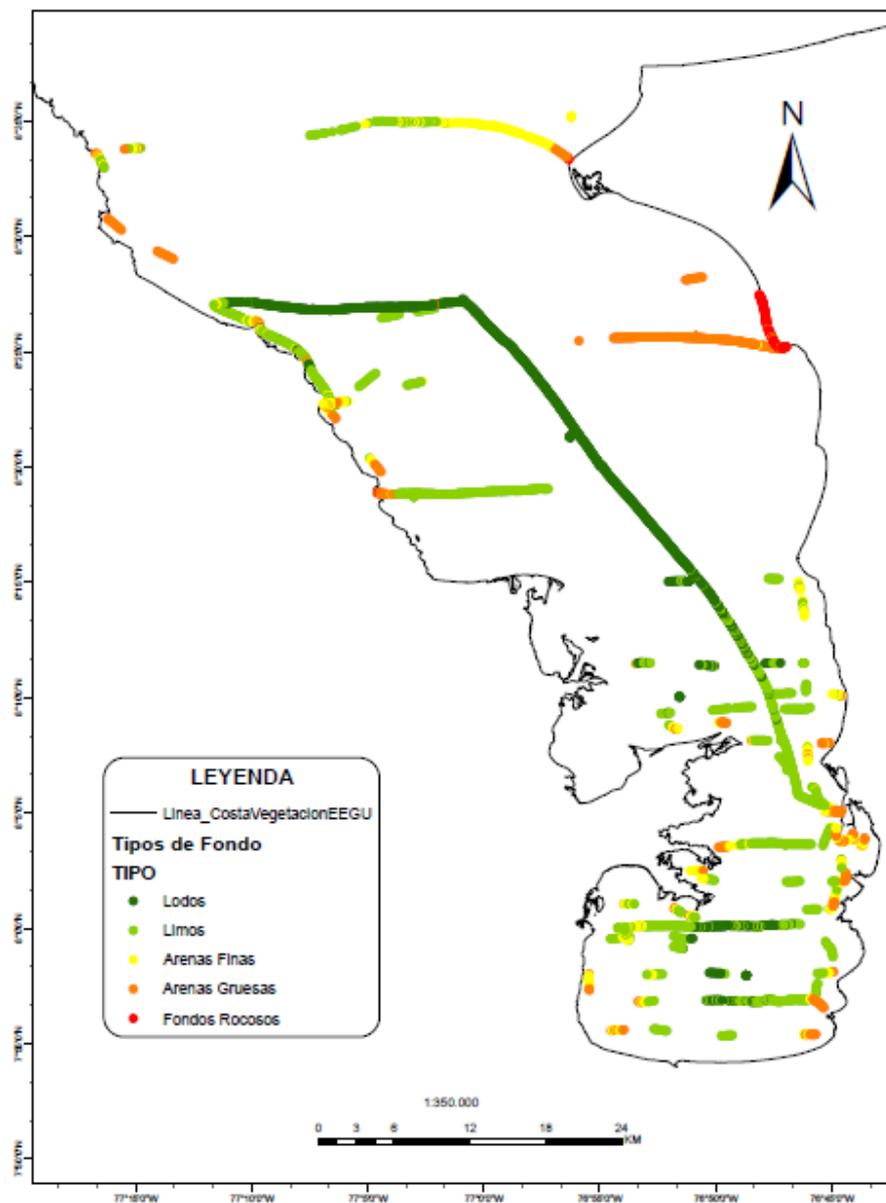


Figura 50. Tipos de fondo del Golfo de Urabá (líneas batimétricas)

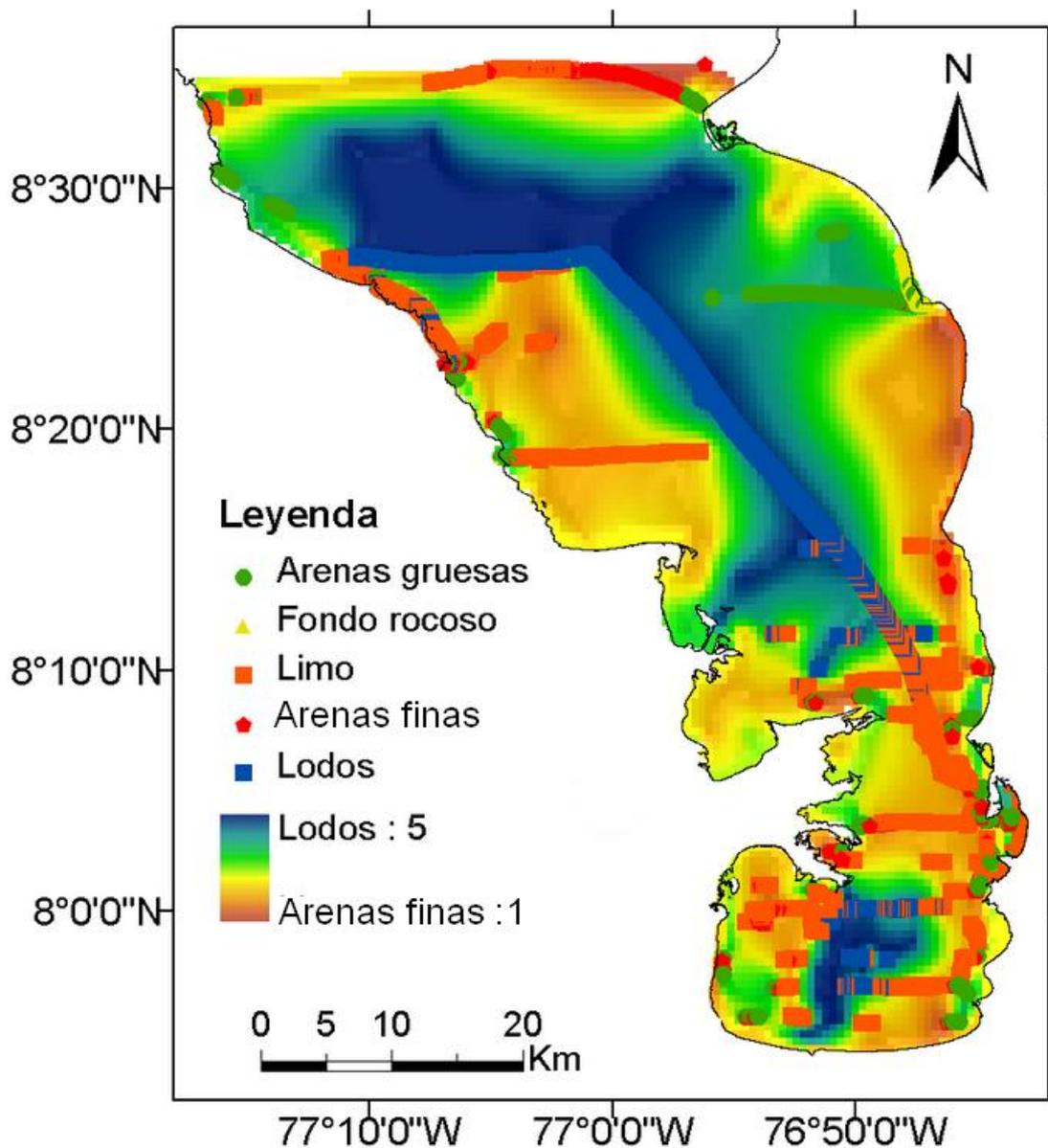


Figura 51. Tipos de fondos del Golfo de Urabá (aplicando método de interpolación)

Según en la figura 51, la mayor cantidad de los sedimentos que son suaves como el lodo o el limo se localizan más que todo en Bahía Colombia (Sur del Golfo) y cerca del municipio de Turbo (margen oriental), como también los diferentes tamaños de granos se encuentran a lo largo del Golfo.

Según el sistema de clasificación que arrojó la red neuronal junto con los datos de entrada que se le suministraron por medio de E_1 y E_2 originados por la ecosonda, se

puede apreciar que los fondos rocosos se encuentran en su mayoría por la parte noreste. Sin embargo por la parte noroeste se podría interpretar que hay arenas gruesas que inmediatamente por escasos centímetros de espesor se podría hallar fondos rocosos (recordemos que al utilizar altas frecuencias la onda ultrasónica tiende a reflejarse y a dispersarse en la primera capa de interfase entre el agua-sedimento, es decir, bajo una sutil diferencia de impedancia acústica en el medio, la onda se reflejará inmediatamente), por otro lado en el sector Bahía Colombia se encuentran en su mayoría limos y en el extremo inferior derecho del mapa se encuentran arenas finas.

En el recorrido batimétrico desde el centro hacia el norte del Golfo y en toda la mitad de éste, donde oscila una profundidad entre 45 a 60 m (Figura 40) se hallan sedimentos de granos finos como el lodo. Por otro lado, las zonas costeras ya sea entre la parte oeste y este, se caracterizan por arenas finas, gruesas y fondos rocosos.

4.2.3 Análisis de los resultados del eco-strength versus presión, intensidad, coeficiente de reflexión, profundidad y tiempo

En la batimetría se establecieron en función de la columna de agua, diferentes variables geofísicas que permitieron analizar en profundidad cómo variaba la onda acústica a medida que se propagaba y brindaba información acerca del suelo marino. Estas variables geofísicas se explicarán a continuación y se interpreta que la onda acústica (presión acústica por tratarse de ondas longitudinales, ver sección 1.4.1.1.1) tiende a perder su intensidad debido a los efectos de la atenuación por tratarse de altas frecuencias.

4.2.3.1 Eco-strength vs profundidad

A partir de los 3740 datos adquiridos en la batimetría, procesados en Excel y por un método estadístico *Euclidean Complete* con el fin de brindar información acerca de la variación del eco-strength contra la profundidad, se logró entender por medio de la figura 52 que existen cinco diferentes grupos que responden a un intervalo de decibeles (eco) con su respectiva profundidad en metros.

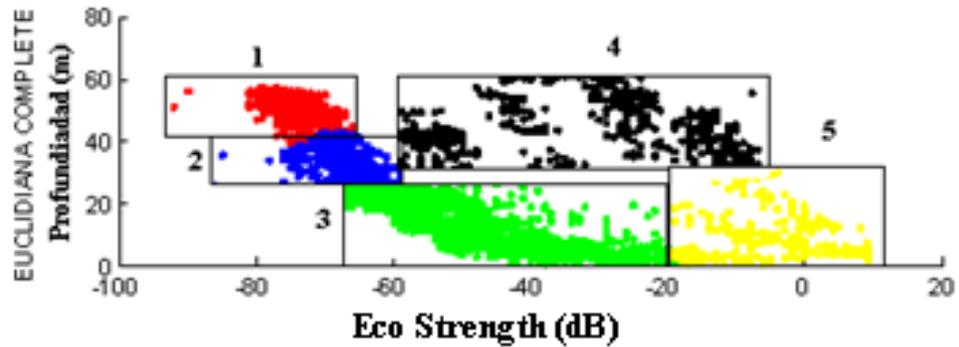


Figura 52. Clasificación del fondo marino del Golfo de Urabá mediante la variación de la profundidad (m) vs eco strength (dB)

El grupo número uno son aquellos tipos de sedimentos que respondieron a un eco strength entre -62 y -90 dB con una profundidad entre 41 y 60 m de columna de agua, estos sedimentos generalmente son de grano muy fino como el lodo con contenido de arcilla y limo. En el grupo número dos se tienen fondos de cobertura sedimentaria que comprenden entre -60 y -75 dB con una profundidad entre 25 y 40 m, distinguiéndose en su mayoría como arenas finas. El grupo número tres comprende aquellos cuerpos de sedimentos como la arena gruesa, que responden a un eco strength entre -20 y -65 dB con una profundidad que oscila entre 1 y 20 metros. En el grupo número cuatro están en un rango entre -15 y -58 dB con una profundidad aproximadamente entre 25 y 60 m, con estas características los eco strength corresponden a las gravas que son partículas de tamaño de grano más grande que las arenas y el lodo, de esta manera puede haber poca presencia de arena fina y limo debido al gran intervalo de la respuesta del echo strength. Por último está el grupo número cinco que comprende el intervalo 17 y -20 dB con un rango de profundidad entre 1 y 25 m, generalmente corresponde a fondos rocosos o un basalto (Du & Chen, 2007).

Para esta descripción acerca de cómo responde cada tipo de sedimento a un determinado echo strength se debe conocer en principio la geología de la zona donde posiblemente podría encontrarse estos tipos de sedimentos. Además el trabajo hecho por Du y Chen en el año 2007 en su artículo “Investigation of the relationship between seafloor echo strength and sediment type” hacen referencia a que estos tipos de medidas se deben de corroborar con muestras físicas y por tanto no dicen nada acerca de qué tan rugoso o

duro puede ser el fondo de cobertura sedimentaria o los fondos rocosos. Sin embargo es importante conocer que dependiendo del tamaño del grano, la energía de reflexión del pulso acústico se reflejará mucho más rápido o tendrá efectos de absorción dentro del sedimento.

4.2.3.2 Eco-Strength vs Tiempo

En la figura 42 se muestra la respuesta de los diversos grupos de tamaño de grano de los sedimentos que tuvieron mayor y menor tiempo de respuesta y así mismo en el eco strength (dB).

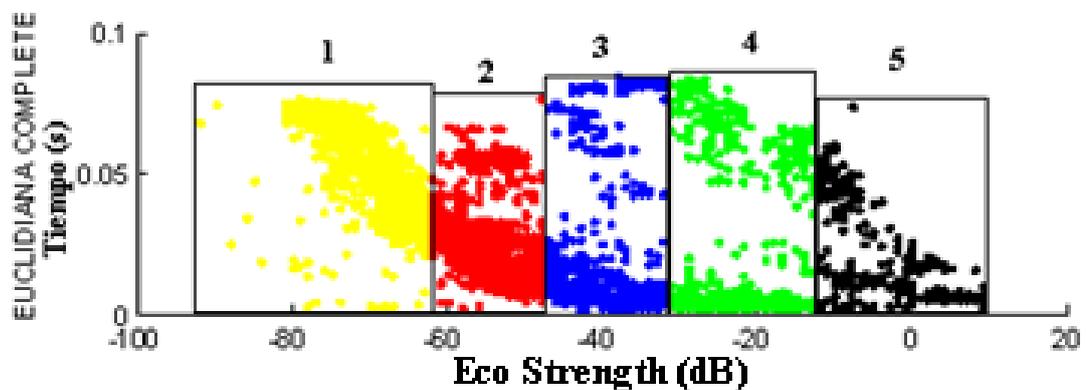


Figura 53. Clasificación del fondo marino del Golfo de Urabá mediante la variación del tiempo (s) vs eco strength (dB)

Se puede apreciar en la figura 53 que independientemente del tamaño de grano o de las características físicas que tenga el sedimento en la superficie del fondo, la respuesta del eco en función del tiempo en segundos estará entre 0.01 y 0.08 s. De este modo el método estadístico halló cinco grupos de sedimentos que tuvieron la misma respuesta en segundos pero con diferentes valores del eco strength. Este método de clasificación por eco (dB) versus tiempo (s) no es muy confiable a la hora de discriminar el tipo de sedimento pero si se puede decir que el rango de 15 a -15 dB comprende los fondos rocosos, con un tiempo de respuesta entre 0.01 a 0.06 s y por el otro extremo están los sedimentos de tamaño de grano muy pequeño como el limo o el lodo entre -62 y -90 dB.

4.2.3.3 Presión vs Eco-Strength

En la figura 54 se muestra la variación del echo strength versus la presión de reflexión de la onda acústica con el fondo marino, se aprecia que en el rango de -24 a -90 dB la presión de la onda cuando se refleja en la interfase agua-sedimento no tiene mayor desviación cuando se trate de sedimentos como el lodo, arenas finas, gruesas y gravas. Por otro lado, según el método estadístico, el valor del eco strength comienza a tener un comportamiento exponencial entre -20 a 15 dB que pertenecen a aquel grupo de cuerpos de fondo rocosos o basalto que tienen generalmente respuesta muy alta del eco, de modo que a mayor material duro la presión de la onda acústica tenderá a aumentar en el momento que se refleje o se disperse con el fondo marino.

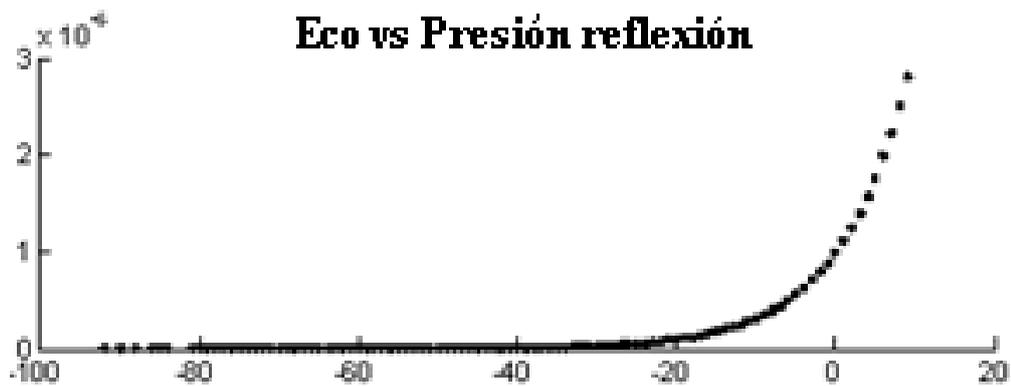


Figura 54. Análisis de la variación de la presión acústica reflectora versus el eco strength (dB)

4.2.3.4 Intensidad vs Eco-Strength

La figura 55 muestra que a valores altos del eco strength será mayor la intensidad de reflexión de la onda acústica. Las gráficas de las figuras 43 y 44 son muy similares debido a que la intensidad es proporcional a la presión acústica elevada al cuadrado.

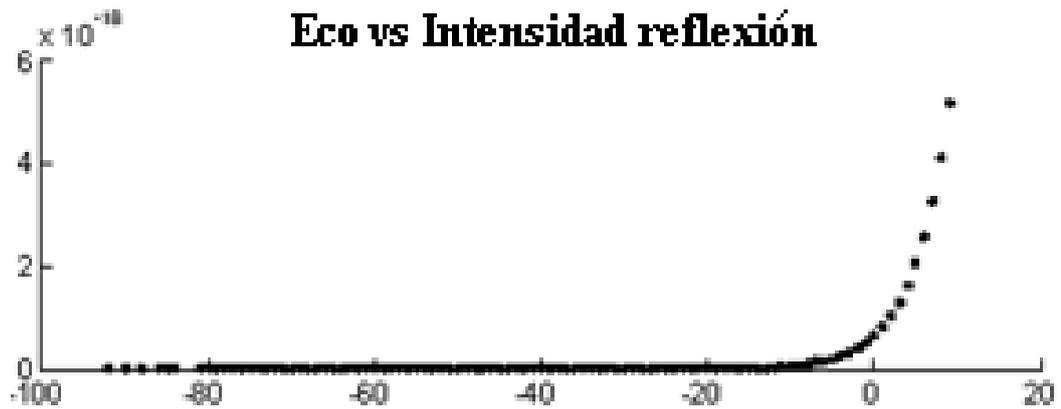


Figura 55. Análisis de la variación de la intensidad acústica reflectora versus el eco strength (dB)

4.2.3.5 Coeficiente de Reflexión vs Eco-Strength

La figura 56 presenta la grafica del eco strength versus coeficiente de reflexión acústica, debido a que este coeficiente es igual a la presión de reflexión dividida por la presión de referencia (ver sección 1.5.1.2.2), es decir cada vez que la onda acústica incide sobre el fondo marino, el valor del coeficiente será un indicio de cómo la magnitud de la presión de reflexión acústica cambia con respecto a la presión de referencia que se mide a un metro de profundidad con respecto al transductor y la magnitud que equivale a 10^{-6} μ Pa.

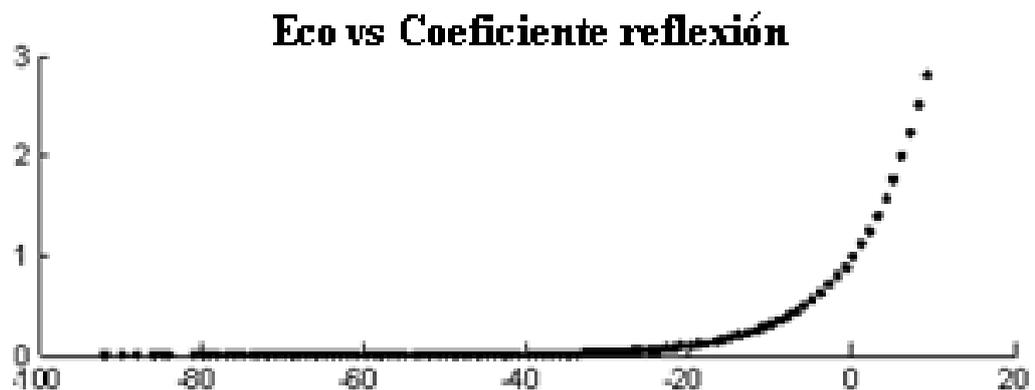


Figura 56. Análisis de la variación del coeficiente de reflexión acústica versus el eco strength (dB)

4.2.4 Análisis y resultados del Laboratorio

En el laboratorio se procesaron 40 datos de cada uno de los siguientes materiales: platina de acero, concreto, cobble y pebble. Los resultados presentados en la figura 57 muestran que la platina de acero es el material más duro y rugoso (se utilizó la platina presentada en la figura 19 de la sección 3.1) y el menos duro y rugoso es el pebble (ver figura 19, donde la muestra se encuentra en el medio). Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 57, el eje x que significa relativo a la dureza no tiene mayor diferencia entre la máxima y la mínima de ésta, de la misma manera pasa con el eje y que significa relativo a la rugosidad debido a que los cuatro materiales son relativamente duros y rugosos (las muestras no eran lisas). Por esta razón la ecosonda KNUDSEN 320 B/P no tiene la capacidad suficiente para discriminar muy bien los diferentes materiales pese a su distinta naturaleza, es decir resultó que la ecosonda era eficiente más no preciso.

Al emplear la red neuronal LVQ2 resultó que la platina de acero tiene una eficiencia del 35% de los 40 datos de la energía E_1 y E_2 , lo cual significa que la ecosonda en el laboratorio no reconoce muy bien este tipo de material.

El concreto tuvo una eficiencia del 65% de los datos que se utilizaron para la red, lo cual quiere decir que la ecosonda podría tener la suficiente capacidad para discriminar este tipo de material.

Así mismo, el cobble (guijarro de tamaño promedio de 31 mm de diámetro) que pertenece al grupo de las gravas, tuvo una eficiencia del 65%, de manera que la ecosonda si permitió dar a conocer este tipo de sedimento a partir de los 40 datos de entrada procesados por la red neuronal.

Por último están los pebbles, clasificados por la red neuronal con una eficiencia del 65%. Sin embargo la ecosonda no es capaz de distinguir estas dos clases de gravas (cobble y pebbles) por lo tanto se hace necesario, de acuerdo con la clasificación hecha por la red neuronal LVQ2, distinguir el límite entre el símbolo asterisco con el círculo y

el símbolo diamante con el asterisco con el fin de reconocer con base en los 40 datos de pebble y cobble cuál es el área que pertenecen a cada uno.

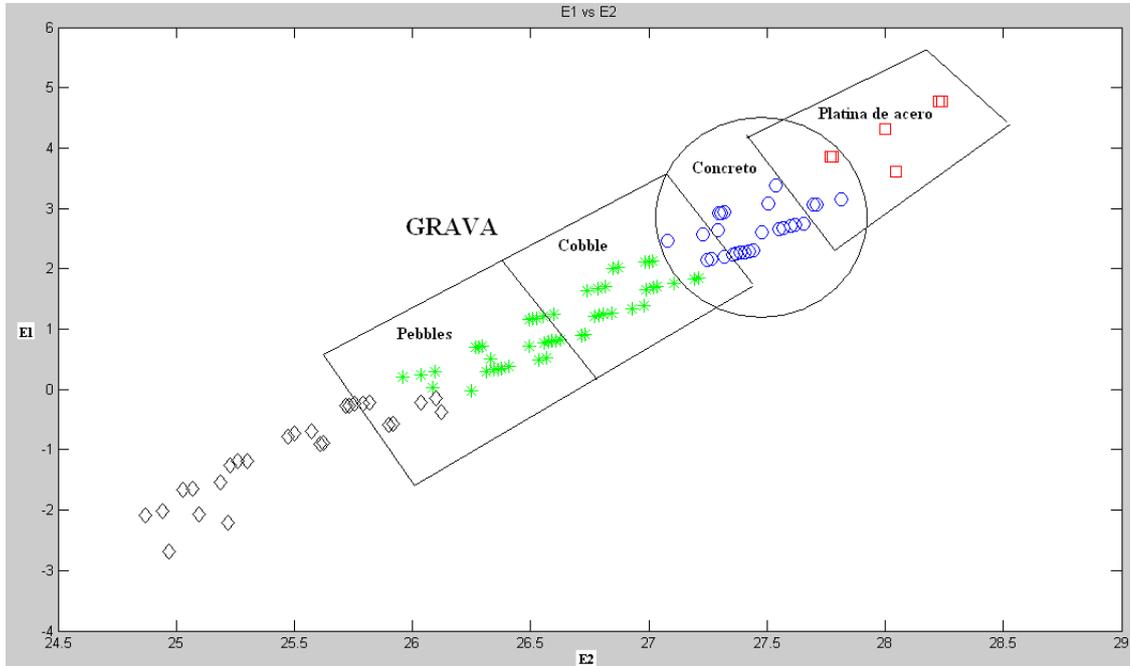


Figura 57. Gráfica de E_1 vs E_2 obtenidos para diferentes materiales en el laboratorio.

Conclusiones

Los transductores de las ecosondas que trabajen a altas frecuencias (200 kHz) permiten no solo caracterizar la profundidad sino también determinar el relieve del fondo marino por medio del Eco Strength. . Por otra parte, aquellos transductores que operan a bajas frecuencias (12 kHz) facilitan obtener información de las capas del subsuelo marino como también la profundidad.

El sistema de clasificación de fondos marinos es un método que permite discriminar, por medio de la cola del pico del primer eco (E_1) y el pico del segundo eco (E_2), la rugosidad y la dureza de la primera capa sedimentaria que reposa sobre el fondo del agua.

El sistema de clasificación se basó en el cálculo de los valores numéricos de E_1 y E_2 , los cuales sirvieron como variables de entrada a la red neuronal LVQ2 con el objetivo de clasificar en cinco grupos (basados en el sistema RoxAnn) los tipos de sedimentos al que pertenecían. Esto se logró por un conocimiento previo de la geología del Golfo de Urabá.

Los valores del eco strength (dB) y la profundidad (m) bastaron para calcular las demás variables geofísicas tales como la presión acústica, la intensidad, el coeficiente de reflexión, el coeficiente de dispersión, el tiempo y la velocidad del sonido (1500 m/s en el agua) como parámetro de entrada de la ecosonda. Así mismo, un conocimiento previo del haz acústico permitió determinar el ángulo de apertura (para altas frecuencias el ángulo oscila entre 5° y 10° , mientras que para bajas frecuencias el ángulo es mayor a 15°) que para este caso en particular fue de 8 grados que resultó importante para el análisis del modelo físico junto con las variables geofísicas.

La red neuronal LVQ2 es una herramienta eficaz para clasificar en grupos los datos E_1 y E_2 y asignarlos a una determinada clase de sedimento.

Las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio para los cuatro materiales indicaron que efectivamente el Eco Strength es mucho menor cuando el tamaño de grano del sedimento es pequeño y se aumenta proporcionalmente al diámetro del material como se puede apreciar en la Tabla 2 (en función del patrón del haz acústico a 200 kHz que irradia o refleja el material). Por otro lado se puede concluir de dicha tabla que cada escala (%) del primer pico en el software representa un determinado valor del eco strength y esto indica que independiente de la amplitud del primer eco tanto del software como en el hardware, el eco strength caracteriza las propiedades del fondo del agua sin tener en cuenta la amplitud del pico.

Eco strength (decibeles) para el primer eco				
Grava (dB)		Concreto (dB)	Platina oxidable (dB)	Escala %
Pebble	Cobble			
-19	-11	-10	-8	100
-19	-11	-10	-8	92
-19	-11	-10	-8	80
-19	-11	-10	-8	68
-19	-12	-10	-8	58
-19	-12	-10	-8	50
-19	-12	-10	-8	40
-19	-12	-10	-8	30
-19	-12	-11	-9	21
-19	-13	-11	-9	14
-19	-13	-11	-9	10
-19	-13	-11	-9	5

Tabla 2. Resultados del eco strength del primer eco para los cuatros materiales examinados en el laboratorio

En la tabla 3 se muestran los valores característicos del eco strength para cada material cuando se analizó el segundo eco, donde se puede apreciar que a mayor amplitud del pico (escala en %) expresado en el software (como también en el osciloscopio) resulta mucho menor la dispersión acústica originada por el material puesto en el fondo del tanque debido a que la onda se dispersa en la superficie del agua y se dispersa en el fondo por segunda vez. Por esta razón la fuerza del eco cambia de acuerdo a su nivel de energía a causa del suelo o por la columna del agua.

La amplitud del primer eco (para cada escala en %) resultó ser independiente del valor del Eco Strength. Por el contrario, la amplitud del segundo eco evidenció ser dependiente del valor del Eco Strength.

Eco strength (decibeles) para el segundo eco				
Grava (dB)		Concreto (dB)	Platina oxidable (dB)	Escala %
Pebble	Cobble			
-27	-	-18	-19	100
-26	-20	-17	-17	92
-25	-19	-17	-17	80
-25	-18	-16	-16	68
-24	-18	-16	-15	58
-23	-17	-15	-14	50
-22	-16	-14	-13	40
-21	-15	-13	-12	30
-20	-15	-12	-10	21
-19	-13	-11	-10	14
-19	-11	-11	-10	10
-19	-12	-11	-10	5

Tabla 3. Resultados del eco strength del segundo eco para los cuatros materiales examinados en el laboratorio

La amplificación de la señal es un proceso muy importante (junto con los parámetros de entrada –software- como la potencia, periodo y tx blank) porque ayuda a obtener, no solo una buena resolución en el ecograma, sino también una buena caracterización del primer y segundo eco. Así se logra un buen valor del Eco Strength, el cual sirve posteriormente, en el modelo físico, para hallar E_1 (rugosidad) y E_2 (dureza).

Por medio de los experimentos hechos en el laboratorio y en el recorrido batimétrico del golfo de Urabá se determinó que la ganancia debe ser alta (por encima de 90) cuando el pulso acústico incide en un fondo de cobertura sedimentaria de lodo o arena fina, por otro lado la ganancia debe ser baja (por debajo de 90) cuando el pulso acústico incide en un fondo rocoso o de cobertura sedimentaria de grava.

La amplitud del voltaje del primer y segundo eco dada por el osciloscopio es la hipótesis que determina la eficacia de discriminar los fondos rocosos y sedimentarios. Por tanto es un índice para integrar la cola del primer pico (E_1) y todo el segundo pico (E_2).

A través del uso de la ecosonda KNUDSEN 320 BP y el sistema de clasificación de fondos marinos implementados en los programas Excel y Matlab se estableció que la batimetría del Golfo se conforma por cinco tipos de sedimentos, por las cuales son: lodo, limo, arenas finas, arenas gruesas, grava y roca. Éstos están ubicados en los fondos del Golfo de Urabá.

Recomendaciones

En la adquisición de datos batimétricos se puede instalar de diferentes maneras el transductor en el bote ya sea en la proa, estribor o a babor ya que en la popa generalmente se encuentra el motor del bote. Sería conveniente en lo posible instalar el transductor en el casco con el fin de aislar los ruidos causados por la superficie del agua (olas del mar), las burbujas de aire que genera el motor, así mismo su ruido y tener siempre presente como valor fijo el calado de la cara del transductor donde se emite el pulso hacia la superficie del agua.

En las pruebas realizadas (laboratorio o campo), es importante que el transductor este bien sujeto sobre la borda, debido a que si hay movimientos laterales o vibraciones las señales se deterioran y los datos tienen resoluciones pobres.

Antes de hacer un transecto batimétrico es conveniente calibrar la velocidad del sonido de acuerdo con las propiedades físicas del agua. Si no hay una buena calibración inicial los valores de profundidad pueden resultar imprecisos.

La eficacia de las redes neuronales en el ámbito de clasificación requiere contar con un volumen importante de datos para poder entrenar y clasificar adecuadamente los valores de entrada, en función del número de grupos para discriminar.

Es beneficioso clasificar aquellos ecogramas (los que se adquirieron con 200 kHz) que resultaron con una buena adquisición de datos (buena profundidad, eco strength y batimetría) para obtener la máxima información posible pero teniendo en cuenta la velocidad que tuvo el bote con el fin de seleccionar los datos a un espaciamiento constante y preciso (con un buen uso de DGPS). Esto con el objetivo de tener un poco más de confianza, buenos datos de E_1 y E_2 y para tener más seguridad que la clasificación se llevó a cabo en un área donde el ruido se hizo despreciable.

Con ayuda de algún programa adicional (Corel, entre otros) es conveniente corregir la escala de las profundidades que muestra el software de postprocesamiento (post Survey) cuando se han registrado todos los perfiles batimétricos del área de interés. Es decir no

todos los ecogramas arrojados por el software eco-control muestran un perfil batimétrico constante en todo el recorrido, por el contrario hay tramos donde el perfil cambia su auto escala causando una confusión en la profundidad y en el eco strength en un área particular.

Es recomendable conocer previamente de manera superficial el fondo marino de la zona batimétrica con el fin de tener un conocimiento de cuál intervalo de ganancia se necesita introducirle al software (eco-control) de la ecosonda para tener no solo un buen registro del eco strength sino también de la profundidad.

Es necesario tener en cuenta el uso de los sensores de movimiento (corrección por guiñada, cabeceo y balanceo del bote) a la hora de utilizar la ecosonda para fines batimétricos porque éstos ayudan a corregir las profundidades y demás parámetros que se necesiten evaluar cuando el mar o el bote tienen movimientos que no son adecuados para desarrollar la prospección geofísica.

Trabajos futuros

Clasificar los fondos marinos utilizando frecuencias menores a 12 kHz y analizar la estructura del subsuelo marino teniendo en cuenta las características del Eco Strength.

Configurar la señal del voltaje capturado por la ecosonda con el dispositivo *Compact Rio de National Instruments*, con el fin de implementar un sistema en tiempo real.

Por medio de modelos econométricos, determinar si hay relaciones entre las energías E_1 y E_2 con variables como el Eco strength, la profundidad y el tiempo.

Bibliografía

- Acquaticci F., Gwire S. y Martínez del Peso H. (2007). Ecosonda de baja profundidad para el Río de la Plata. *6° Jornadas de Desarrollo e Innovación Tecnológica*, 1-3.
- Bezdek H. F. (1973). Reflection of high-frequency sound at normal incidence from ocean bottom. *Journal of geophysical research* , 78 (17), 3390-3394.
- Brekhovskikh L. M., & Lysanov Y. P. (1988). *Fundamentals of Ocean Acoustics* (third Edition ed.). Moscow: Springer-Verlag.
- Clay C. S., & Medwin H. (1997). *Acoustical Oceanography*. Academic Press. New York.
- Chen Y., Zhou X., Wu Y., & Tang, Q. (Octubre de 2006). An approach to seafloor classification with GA-based Neural Network. *Hidrograhpy I* , 1-15.
- Cifuentes lemus J. L., Torres García M. d. & Frías M. (1997). *El océano y sus recursos. II. Las ciencias del Mar*. Mexico DF: Ciencias para todos.
- Du D., & Chen Y. (2007). Investigation of the relationship between seafloor echo strength and sediment type- a case study in Jiaozgou Bay, China. *Springer-Verlag* , 339-344.
- Dung T. V., & Stepnowski A. (2000). Sea Bottom Recognition using Multistage Fuzzy Neural Network operating on Multi-frequency data. *ACUSTICA- Acta acustica* , 86, 830-837.
- Erickson, J. (1992). *EL MISTERIO DE LOS OCEANOS*. Madrid: MCGRAW-HILL.
- Geyer R. A. (1983). CRC Handbook of Geophysical Exploration at sea. En N. G. Pace, *Acoustic classification of the seabed* (págs. 211-218). CRC Press.

Heald G. J. (2000). *An analysis of normal incidence acoustic backscatter for seabed discrimination*. University of Bath: PhD Thesis.

Heald G. J. (2001). High frequency seabed scattering and sediment discrimination. *Proceedings of Institute of Acoustic* , 23 (2), 258-267.

Heald G. J., & Pace N. G. (1996). An analysis of 1st and 2nd backscatter for seabed classification. *3rd European Conference on Underwater Acoustics* , 649-654.

Heald G., Dyer C., Murphy K., & Pace N. (1997). An experimental study of sediment discrimination using 1st and 2nd echoes. *NATO SACLANTEN Conference Proceedings Series CP-45* (págs. 139-146). La Spezia: High Frequency Acoustics in Shallow water.

Informatica aplicada al análisis Económico. (2010). *Análisis Cluster*. Madrid: Fondo Social Europeo.

Jackson D. R., & Richardson M. D. (2001). *High frequency seafloor acoustic*. Washington: Springer.

KNUDSEN. (Noviembre 8 de 2005). 320B *Series echosounder quick start guide*. Ontario: Knudsen Engineering Limited.

Lubniewski Z., & Stepnowski A. (1998). Application of the fractal analysis in the sea bottom recognition. *Archives of Acoustics* , 23 (4), 499-511.

Lubniewski Z., & Stepnowski A. (1998). Sea Bottom recognition using fractal analysis and scattering impulse response. *Proceedings of the fourth European Conference on Underwater Acoustic*, (págs. 179-184). Rome.

Mandelbrot B. B. (1982). *The fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W. H Freeman and Company.

Organización Hidrográfica Internacional. (2005). *Manual de hidrografía*. Monaco: Bureau Hidrografico Internacional.

Pace N. G. (1990). Acoustic backscatter and seabed characteristics. *Proceedings of the Institute of Acoustics* , 12 (Part 1), 21-31.

Prager B. T., & Poeckert, R. H. (1995). Bottom Classification: Operational Results from QTC view. In: *Oceans' 95 MTS/IEEE, challenges of our global environment conference proceedings* , 3, 1827-1835.

Sanz Molina A., & Martín del Brío B. (2001). *Redes Neuronales y Sistemas Difusos* (2nd Edicion ed.). Zaragoza: Alfaomega.

Satyanarayana Y., & Naithani S. (2007). Seafloor sediment classification from single beam echo sounder data using LVQ network. *Mar Geophys Res* , 28, 95-99.

Schlagintweit G. (1993). Real-Time acoustic bottom classification for hydrography a field evaluation of RoxAnn. *Canadian Hydrographic Service Department of Fisheries and Oceans* , 214-219.

Sivanandam S. N., Sumathi S., & Deepa S. N. (2006). *Introduction to neural networks using Matlab 6.0*. New Delhi: McGrill-Hill Companies.

Siwabessy P., Tseng Y., & Gavrilov A. (2004). Seabed habitat mapping in coastal waters using a normal incident acoustic technique. *Proceedings of ACOUSTICS* (págs. 1-6). Bentley: www.cmst.curtin.edu.au.

Tarbuck E. J., & Lutgens F. K. (1999). *Ciencias de la Tierra una introducción a la Geología Física* (Sexta ed.). (A. M. Rubio, Trad.) Madrid: Prentice Hall.

Tegowski J. (2001). Acoustical recognition of the bottom sediments in the southern Baltic Sea. *Institute of Oceanology, Polish Academy of Science* , 1-6.

Tegowski J., & Lubiniewski Z. (2000). The use of fractal properties of echo signals for acoustical classification of bottom sediments. *ACOUSTICA-Acta Acoustica* , 86, 276-282.

Tegowski J., & Lubniewski Z. (2002). Seabed Characterization Using Spectral Moments of the Echo Signal. *Acta Acoustica United with America* , 88, 623-626.

Tegowski J., Gorska N., & Klusek Z. (2003). Statistical analysis of acoustic echoes from underwater meadows in the eutrophic Puck Bay (southern Baltic Sea). *Aquatic Living Resources* , 16, 215-221.

Thomas V. F., Garcia C., & Rojas X. (2007). El paisaje en el Golfo. En C. Garcia Valencia, *Atlas del Golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Choco* (págs. 77-127). Santa Marta: Invemar y Gobernación de Antioquia. Serie de publicaciones especiales No 12.

Thorne P. D., Pace N. G., Zyad K. S., & Hamdani A. (1988). Laboratory measurements of backscattering from marine sediments. *Acoustical Society of America*, 84, 303-309.

Vicente Villagardón J. L. (2010). *Introducción al Análisis de cluster*. Salamanca: Universidad de Salamanca.

Walree P. A., Tegowski J., Laban C., & Simons D. G. (2005). Acoustic seafloor discrimination with echo shape parameters: A comparison with the ground truth . *Elsevier Applied Science* , 2273-2293.

ANEXO A

ECOGRAMAS DE 12 Y DE 200 kHz DEL GOLFO DE URABÁ

Las siguientes seis ecogramas representan las batimetrías hechas en el Golfo de Urabá realizadas con una ecosonda KNUDSEN 320 B/P a una frecuencia de 200 y 12 kHz. Como se analizará a continuación, la frecuencia de 200 kHz facilita la información del perfil del fondo marino, mientras que la frecuencia de 12 kHz muestra el subsuelo. Se puede decir que si el canal de 12 kHz es capaz de mostrar el subsuelo marino entonces en algunos sectores del transepto tendrá la capacidad de penetrar en el orden de 5 a 15 metros de sedimento. La geología marina clasifica cinco tipos de sedimento: arenas finas y gruesas, lodo (arcilla + limo), grava y roca, de estos sedimentos en el caso que hayan experimentado algún proceso de litificación y compactación se puede decir que los sedimentos llegaron a ser una roca sedimentaria, por ejemplo: Arenisca es una roca sedimentaria detrítica que se compone de la arena (sedimento), la lutita de arcilla, la limolita del limo, por último se tienen al conglomerado o la brecha que está en el mismo grupo de las anteriores pero el sedimento que experimento la litificación y la compactación es la grava (Tarbuck y Lutgens, 1999). En algunos de estos ecogramas se aprecia que la onda acústica no tuvo la suficiente energía de penetrar más de tres o más metros debido a que posiblemente se encuentre el basalto que es una roca que su mayor porcentaje se localiza en las cuencas oceánicas y por debajo del basalto está el gabro, en el caso que se quiera analizar en los ecogramas las propiedades de estos tipos de roca se debe utilizar frecuencias por debajo de 3 KHz.

A continuación se describirá algunas de las características de los ecogramas de las figuras 58, 59, 60, 61, 62 y 63 en el punto de vista geológico y geofísico:

A.1

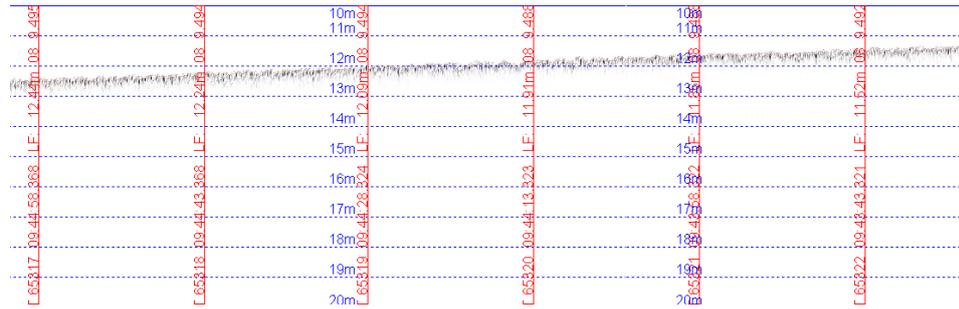


Figura 58. Primer perfil batimétrico trabajado a una frecuencia de 200 kHz

Se aprecia que en este ecograma (figura 58) solo se puede analizar el relieve del suelo marino, indicando las coordenadas geográficas cada 15 s dadas por el DGPS, la hora y la profundidad de cada eco (onda acústica reflejada por el lecho marino). La adquisición de las coordenadas se calculó teniendo en cuenta la velocidad de la lancha que oscilaba entre 10 y 14 Km/h. En términos geofísicos, la longitud del pulso que emitió el transductor fue de 0.05 ms. y operando con una ganancia automática, de este modo al operar a una frecuencia muy alta no se tiene argumentos necesarios para predecir el tipo de sedimento que se encuentra en el subsuelo marino, en consecuencia pasa lo mismos con los ecogramas de las figuras 60 y 62.

A.2 El ecograma de la figura 59 es el mismo que el ecograma de la figura 60, la diferencia consta en el uso de la frecuencia por el cual se procesó.

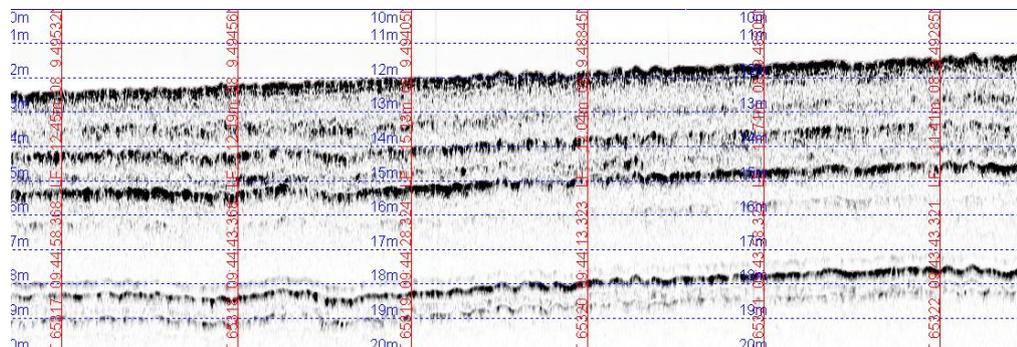


Figura 59. Primer perfil del subsuelo marino trabajado a una frecuencia de 12 kHz

El ecograma de la figura 59, se aprecia varias características, entre las cuales se destacan lo siguiente:

El pulso acústico tuvo la facilidad de penetrar aproximadamente siete metros de subfondo, por lo que se interpreta que en esa pequeña región del Golfo de Urabá esta conformada por varias capas estratigráficas. Se observa que en el ecograma de la Fig. 59, posiblemente habría un basalto a una profundidad del orden de 19 m que la misma onda acústica no tuvo la potencia y la frecuencia necesaria para dar información de ella.

Hay aproximadamente seis capas de sedimentos, en la cual podrían ser arena gruesa o una mezcla de arena y grava. Así mismo, entre las primeras cuatro capas estratificadas, posiblemente se encuentren arcillas por ser unos de las clases de sedimentos más lisos que los otros.

Otro nombre que puede recibir estas capas oscuras es reflector.

A.3

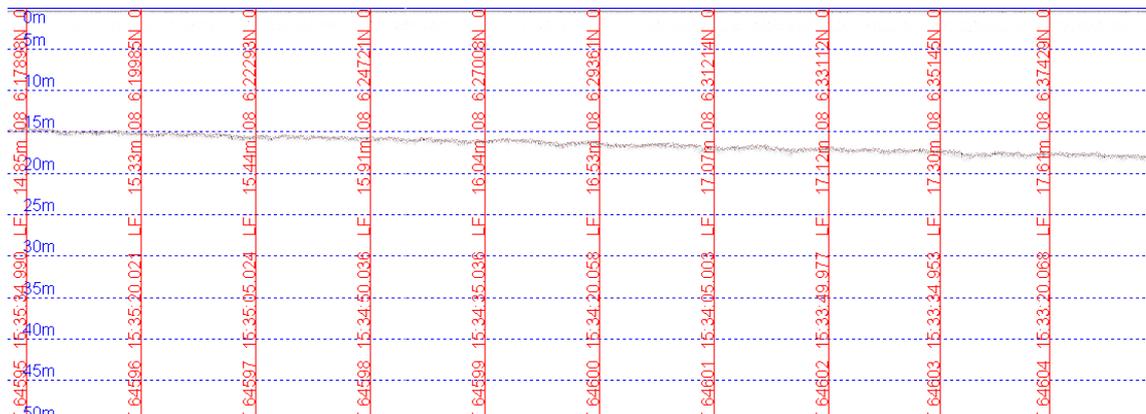


Figura 60. Segundo perfil batimétrico trabajado a una frecuencia de 200 kHz

A.4 El ecograma de la figura 61 es el mismo que el ecograma de la figura 62, la diferencia consta en el uso de la frecuencia por el cual se procesó.

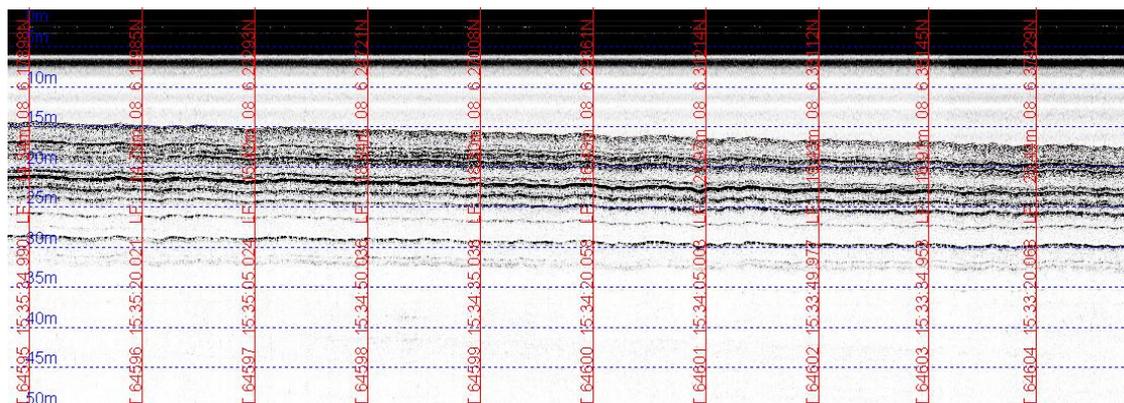


Figura 61. Segundo perfil del subsuelo marino trabajado a una frecuencia de 12 kHz

Este tipo de ecograma (figura 61) al igual que la anterior (figura 59) con la frecuencia de 12 kHz, proporciona una columna de agua de 15 m y aproximadamente 15 m de información de sedimentos, se dice sedimentos porque no parece haber alguna anomalía de algún otro objeto submarino (palos, naufragio, entre otros) desde un extremo a otro toda la capa es uniforme y homogénea, pero a diferencia de la anterior (figura 59) presenta capas estratificadas mas seguidas (reflectores mas seguidos) que puede dar información de acumulaciones de arena, limo y las partes que tiene menos resolución (menos oscuras) puede ser arcilla o lodo. Se observa en el ecograma de la figura 61 una anomalía en la columna de agua, esta anomalía es debido a mucha ganancia que se le transmitió a la ecosonda o también del uso de una potencia que se le suministró mayor a 1 KW. A mayor ganancia, mayor la amplificación de la señal y por ende mayor será la reverberación, por esta razón, se ve claramente que la columna de agua, antes que la onda de presión acústica incidiera en el fondo, sufrió varias reflexiones debido a mucha carga de sedimento que flotaba en el agua, seres orgánicos diminutos o la variación de la densidad o la salinidad hizo que la velocidad del sonido tuviera una variación de modo que sufriera una dispersión mayor en el agua que en la superficie marina.

A.5

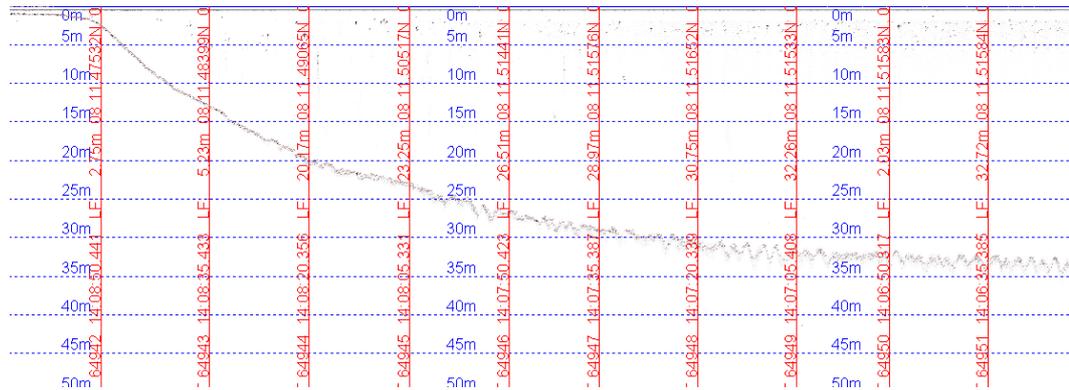


Figura 62. Tercer perfil batimétrico trabajado a una frecuencia de 200 kHz

A.6

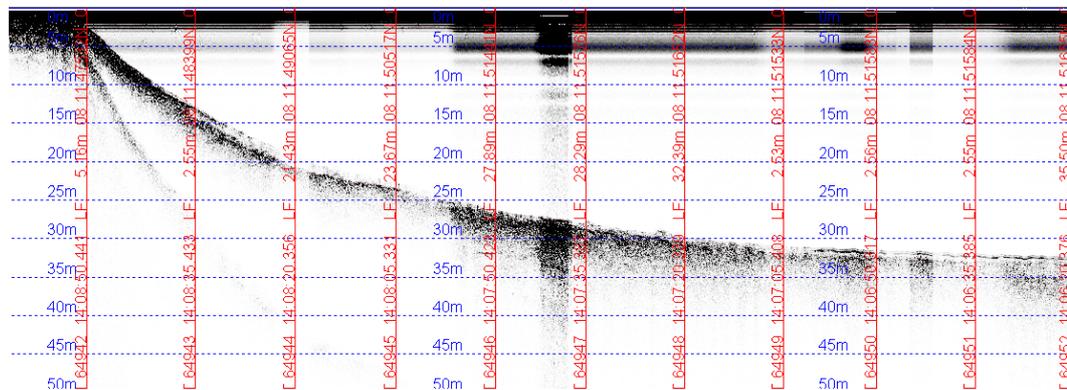


Figura 63. Tercer perfil del subsuelo marino trabajado a una frecuencia de 12 kHz

Este ecograma de la figura 63 tiene varias anomalías, durante el transepto de la batimetría, parece ser que la densidad del agua, la salinidad o la temperatura no fue uniforme en el sentido horizontal de la columna del haz, debido a esto, la ganancia no amplificó bien la señal para que permitiera estas clases de ruido entre la fracción 27.89 y 28.29 metros (no solo la ganancia sino también el tipo de pulso que pudo haber transmitido el transductor del ecosonda).

Este tipo de ecograma, resultó con muy poca información acerca del subsuelo debido a la presencia de un posible basalto o algo muy duro que hizo que la onda no penetrara más de dos metros, solo brindó información acerca de la primera capa de sedimento: arena fina o lodo. Podemos ver que en la pendiente hay dos estratos que marcaron una mayor resolución.

ANEXO B

I_{bs2} Y LA DERIVACIÓN DE E2

B.1 SEGUNDA INTENSIDAD DEL ECO

Utilizando la ecuación 3.25 de la segunda intensidad del eco, así mismo aplicando el primer caso de las expresiones 3.26 y 3.27 a esta ecuación, resulta la ecuación A.1:

El primer caso es donde:

$$x_a = 0$$

$$x_b = \frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2$$

Por tanto el B.1 queda de la forma:

$$I_{bs2}(t) = \frac{\pi \mathfrak{R}^4 \beta_1^2}{4R_1^2 \beta_4^2} (M - N) \quad (\text{B.1})$$

Donde B.2 y B.3 expresan junto con la B.1 la intensidad cuando la onda se refleja por primera vez al fondo marino:

$$M = (B_2^2 - B_2) \left(1 - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2} \right) \exp\left(-\frac{1}{B_2}\right) - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2} - \frac{B_1^2}{B_2} \quad (\text{B.2})$$

$$N = \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \left[C \left(1 - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2} \right) \exp\left(-\frac{1}{B_2}\right) - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2} - \frac{v(t-\tau)\beta_4^2 B_1^2}{R_1 B_2} - \frac{B_1^2}{B_2} \right] \quad (\text{B.3})$$

$$C = \frac{1}{\left(\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}\right)^2} - \frac{1}{\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}} \quad (\text{B.4})$$

El segundo caso es donde:

$$x_a = \frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2$$

$$x_b = \sqrt{\frac{vt}{R_1}} \beta_4^2$$

Aplicando el segundo caso a la ecuación B.1, resulta la expresión B.5, donde la onda incide por segunda vez al lecho marino.

$$I_{bs2}(t) = \frac{\pi R^4 \beta_1^2}{4R_1^2 \beta_4^2} (N - E) \quad (\text{B.5})$$

Donde N es la ecuación B.3 y E es de la forma B.6:

$$E = \exp\left(-\sqrt{\frac{vt}{R_1}} \beta_4^2\right) \left[(D) \left(1 - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{B_2}\right) - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2} - \frac{\sqrt{\frac{vt}{R_1}} \beta_4^2 B_1^2}{B_2} - \frac{B_1^2}{B_2} \right] \quad (\text{B.6})$$

Donde D significa:

$$D = \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{vt}{R_1}} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}\right)^2} - \frac{1}{\sqrt{\frac{vt}{R_1}} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}} \quad (\text{B.7})$$

Las variables $\beta_4, R_1, B_2, \beta_1, B_1$ están expresadas en la sección 3.3.1.2

B.2 INTEGRAR I_{BS2} PARA OBTENER E_2

El valor de E_2 se obtiene integrando toda el área bajo la curva del segundo pico del eco (es decir desde 0 a ∞). En el anexo B.1 se muestra la ecuación completa para $I_{bs2}(t)$.

La segunda integración de estas ecuaciones debe ser tratado en dos casos (ver sección B.1) y luego ser sumados para obtener el valor de E_2 . Los límites de integración son t_1 a

t_2 para el flanco de subida (E_{2r}) y t_2 a t_3 para el flanco de bajada (E_{2f}) de la intensidad de la onda. De este modo resulta B.8:

$$E_2 = E_{2r} + E_{2f} \quad (\text{B.8})$$

t_1 se toma como cero porque es el inicio del segundo eco.

Al desarrollar la B.8 el primer término que es E_{2r} aplicando así mismo el primer caso resulta el B.9 que significa el flanco de subida del pico:

$$E_{2r} = \int_0^{t_2} I_{bs2}(t) dt$$

$$E_{2r} = \frac{\pi \mathfrak{R}^4 \beta_1^2}{4R_2^2 \beta_4^2} \left\{ [M] - \int_0^{t_2} \exp\left(-\frac{\nu(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \left[(C)(G) - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2} - \frac{\nu(t-\tau)\beta_4^2 B_1^2}{R_1 B_2} - \frac{B_1^2}{B_2} \right] dt \right\} \quad (\text{B.9})$$

Donde M es la ecuación B.2 y C es la ecuación B.4, por tanto la ecuación G se expresa en B.10 así:

$$G = \left(1 - \frac{2B_1}{B_2} + \frac{B_1^2}{B_2^2} \right) \exp\left(-\frac{1}{B_2}\right) \quad (\text{B.10})$$

Simplificando la B.9 queda de la forma B.11:

$$E_{2r} = \frac{\pi \mathfrak{R}^4 \beta_1^2}{4R_2^2 \beta_4^2} \left\{ [M] - \left[(G)(H)(L) - 2\frac{B_1}{B_2}(J) + \frac{B_1^2}{B_2^2}(J) - (K) - \frac{B_1^2}{B_2}(J) \right] \right\} \quad (\text{B.11})$$

Donde M es la B.2 y G es la B.10. Las ecuaciones J , K , L y H están dadas en términos de la integral de la intensidad en función del tiempo, de este modo son B.12, B.13, B.14 y B.15 respectivamente:

$$J = \int_0^{t_2} \exp\left(-\frac{\nu(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) dt \quad (\text{B.12})$$

$$K = \int_0^{t_2} \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \frac{v(t-\tau) \beta_4^2 B_1^2}{R_1 B_2} dt \quad (\text{B.13})$$

$$L = \int_0^{t_2} \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \frac{1}{\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}} dt \quad (\text{B.14})$$

$$H = \int_0^{t_2} \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \frac{1}{\left(\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}\right)^2} dt \quad (\text{B.15})$$

Resolviendo J al integrar una exponencial sencilla, toma la forma de la B.16

$$J = \frac{R_1 \left(\exp\left(\frac{v\beta_4^2 \tau}{R_1}\right) - \exp\left(-\frac{(t_2 - \tau)v\beta_4^2}{R_1}\right) \right)}{v\beta_4^2} \quad (\text{B.16})$$

Resolviendo K después de aplicar técnicas de integración sencillas, resulta B.17

$$K = \frac{B_1^2}{\beta_4^2 v B_2} \left(\exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1}\right) (v\beta_4^2 \tau - R_1 - v\beta_4^2 t_2) - \exp\left(\frac{v\beta_4^2 \tau}{R_1}\right) (v\beta_4^2 \tau - R_1) \right) \quad (\text{B.17})$$

Resolviendo L por sustitución y por partes, resulta B.18

$$L = \frac{R_1 \beta_4^2}{v} \left[\exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1}\right) \ln\left(\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} + \frac{1}{B_2}\right) + L_1 \right] \quad (\text{B.18})$$

Donde L_1 es:

$$L_1 = \left(\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} + \frac{1}{B_2} \right) \exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} \right) - \frac{1}{B_2} \quad (\text{B.19})$$

Resolviendo H de la misma manera que la B.18.

$$H = -\frac{R_2}{v\beta_4^2} \left[\exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} \right) \frac{1}{\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} + \frac{1}{B_2}} + \exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} \right) \text{Ln}\left(\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} + \frac{1}{B_2} \right) + H_1 \right] \quad (\text{B.20})$$

Donde H_1

$$H_1 = \left(\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} + \frac{1}{B_2} \right) \exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} \right) + \frac{1}{B_2} \quad (\text{B.21})$$

Resolviendo la B.8 el segundo término que es E_{2f} aplicando así mismo el segundo caso resulta el B.22 que significa el flanco de bajada del pico:

$$E_{2f} = \int_{t_2}^{\infty} I_{bs2}(t) dt \quad (\text{B.22})$$

$$E_{2f} = \frac{\pi R^4 \beta_1^2}{4R_2^2 \beta_4^2} (P - Q) \quad (\text{B.23})$$

Las expresiones P y Q , se explican de la siguiente manera.

La ecuación P es la B.23 donde muestra que la onda acústica es el flanco de bajada del pico del segundo eco después de reflejarse por primera vez en la superficie del mar.

$$P = (G)(ae - af) - \frac{2B_1}{B_2}(ag) + \frac{B_1^2}{B_2^2}(ag) - (ah) - \frac{B_1^2}{B_2}(ag) \quad (\text{B.23})$$

G es la ecuación B.10, las variables ae , af , ag y ah , son de la forma B.24, B.25, B.26, B.27 respectivamente:

$$ae = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \frac{1}{\left(\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}\right)^2} dt \quad (\text{B.24})$$

$$af = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \frac{1}{\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2 + \frac{1}{B_2}} dt \quad (\text{B.25})$$

$$ag = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) dt \quad (\text{B.26})$$

$$ah = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\frac{v(t-\tau)}{R_1} \beta_4^2\right) \frac{v(t-\tau) \beta_4^2 B_1^2}{R_1 B_2} dt \quad (\text{B.27})$$

Resolviendo B.24 luego de un extenso proceso matemático y simplificando, resulta B.28

$$ae = -\frac{R_1}{v\beta_4^2} \left[\exp(-u) \left(\frac{1}{u + \frac{1}{B_2}} \right) - 2 \exp(-u) \text{Ln} \left(u + \frac{1}{B_2} \right) \left(1 + u + \frac{1}{B_2} \right) + \exp(-u) \left(u + \frac{1}{B_2} \right) + u + \frac{1}{B_2} \right] \quad (\text{B.28})$$

Resolviendo B.25 de la misma manera que el B.28, resulta B.29.

$$af = \frac{R_1}{v\beta_4^2} \left[2 \exp(-u) \text{Ln} \left(u + \frac{1}{B_2} \right) \left(1 + u + \frac{1}{B_2} \right) - \exp(-u) \left(u + \frac{1}{B_2} \right) - u - \frac{1}{B_2} \right] \quad (\text{B.29})$$

Donde el termino u de las ecuaciones B.28 y B.29 es la B.30

$$u = \frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1} \quad (\text{B.30})$$

Resolviendo B.26 resulta de un proceso matemático sencillo, por tanto su solución es la B.31.

$$ag = \frac{R_1 \exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1}\right)}{v\beta_4^2} \quad (\text{B.31})$$

Desarrollando B.27 luego de aplicar herramientas de integración se logra tener el B.32.

$$ah = \frac{B_1^2}{\beta_4^2 v B_2} \left[\exp\left(-\frac{v(t_2 - \tau)\beta_4^2}{R_1}\right) (R_1 - v\tau\beta_4^2 + vt_2\beta_4^2) \right] \quad (\text{B.32})$$

La ecuación Q es la B.33 donde muestra que la onda acústica es el flanco de bajada del pico del segundo eco después de reflejarse por segunda vez en el lecho marino.

$$Q = (G)(ad - ac) - \frac{2B_1}{B_2}(ai) + \frac{B_1^2}{B_2^2}(ai) - (ab) - \frac{B_1^2}{B_2}(ai) \quad (\text{B.33})$$

G es la ecuación B.10, las variables ad , ac , ai y ab , son de la forma B.34, B.35, B.36, B.37 respectivamente:

$$ad = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\sqrt{\frac{vt}{R_1}}\beta_4^2\right) \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{vt}{R_1}}\beta_4^2 + \frac{1}{B_2}\right)^2} dt \quad (\text{B.34})$$

$$ac = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\sqrt{\frac{vt}{R_1}}\beta_4^2\right) \frac{1}{\sqrt{\frac{vt}{R_1}}\beta_4^2 + \frac{1}{B_2}} dt \quad (\text{B.35})$$

$$ai = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\sqrt{\frac{vt}{R_1}}\beta_4^2\right) dt \quad (\text{B.36})$$

$$ab = \int_{t_2}^{\infty} \exp\left(-\sqrt{\frac{vt}{R_1}}\beta_4^2\right) \frac{\sqrt{\frac{vt}{R_1}}\beta_4^2 B_1^2}{B_2} dt \quad (\text{B.37})$$

Resolviendo B.34 de la misma manera que el desarrollo de la ecuación B.28 pero cambiando los límites de integración queda de la forma B.38

$$ad = -2 \frac{\sqrt{\frac{vt}{R_1}} R_1}{v\beta_4^2} \left[\exp(-u) \left(\frac{1}{u + \frac{1}{B_2}} \right) - 2 \exp(-u) \text{Ln} \left(u + \frac{1}{B_2} \right) \left(1 + u + \frac{1}{B_2} \right) + \exp(-u) \left(u + \frac{1}{B_2} \right) + u + \frac{1}{B_2} \right] \quad (\text{B.38})$$

Resolviendo B.35 del mismo modo que el desarrollo de la ecuación B.29 pero cambiando los límites de integración queda de la forma B.39

$$ac = 2 \frac{\sqrt{\frac{vt}{R_1}} R_1}{v\beta_4^2} \left[2 \exp(-u) \text{Ln} \left(u + \frac{1}{B_2} \right) \left(1 + u + \frac{1}{B_2} \right) - \exp(-u) \left(u + \frac{1}{B_2} \right) - u - \frac{1}{B_2} \right] \quad (\text{B.39})$$

Donde el termino u es la ecuación B.30

Resolviendo B.36 de un método sencillo, resulta B.40

$$ai = \frac{2R_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{vt_2}{R_1}}\beta_4^2\right) \left(\sqrt{\frac{vt_2}{R_1}}\beta_4^2 + 1 \right)}{v\beta_4^4} \quad (\text{B.40})$$

Resolviendo B.37 después de aplicar técnicas de integración y así mismo el concepto del límite, queda de la forma B.41.

$$ab = \frac{2B_1^2 \left(\sqrt{\frac{vt_2}{R_1}} R_1 + \beta_4^2 vt_2 \right) \exp \left(-\sqrt{\frac{vt_2}{R_1}} \beta_4^2 \right)}{R_1 B_2 \beta_4^2 v} \quad (\text{B.41})$$

Combinando las soluciones de E_{2r} y E_{2f} , se obtiene E_2 del B.8, por tanto queda de la siguiente manera, resultando B.42.

$$E_2 = E_{2r} + E_{2f}$$

$$E_2 = \frac{\pi \mathfrak{R}^4 \beta_1^2}{4R_2^2 \beta_4^2} \left\{ \begin{array}{l} \left[[M] - \left[(G)(H)(L) - 2\frac{B_1}{B_2}(J) + \frac{B_1^2}{B_2^2}(J) - (K) - \frac{B_1^2}{B_2}(J) \right] \right] \\ + \left[\begin{array}{l} \left[(G)(ae - af) - \frac{2B_1}{B_2}(ag) + \frac{B_1^2}{B_2^2}(ag) - (ah) - \frac{B_1^2}{B_2}(ag) \right] \\ - \left[(G)(ad - ac) - \frac{2B_1}{B_2}(ai) + \frac{B_1^2}{B_2^2}(ai) - (ab) - \frac{B_1^2}{B_2}(ai) \right] \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (\text{B.42})$$

ANEXO C

BASE DE DATOS DE LAS VARIABLES GEOFÍSICAS

En las tablas 4, 5 y 6 se aprecian los respectivos valores de E_1 y E_2 los cuales indican el índice de la rugosidad y la dureza respectivamente, como también las variables geofísicas más importantes del pulso acústico en el instante de interactuar con el fondo marino, cabe resaltar que el total de los datos fueron 3740 y lo importante de estas tablas es mostrar que para cada valor característico de la profundidad, eco strength, presión acústica, el coeficiente de reflexión y el tiempo de la señal del eco fueron relevantes para el cálculo de E_1 y E_2 por los que sirvieron de base a la hora de caracterizar a través de la red neuronal (con el método estadístico distancia euclídea) el tipo de sedimento desde el limo hasta los fondos rocosos que posiblemente podría estar en la superficie del fondo del Golfo de Urabá.

En la tabla 4 se muestran los valores característicos de E_1 (rugosidad) y E_2 (dureza) para el limo (número dos) como también sus propiedades geoacústicas. Las coordenadas geográficas (latitud y longitud) para cada eco (también se llama registro) con su respectiva clase de sedimento que se puede ver con el Google Earth (figuras 64, 65 y 66) resaltando así los registros que se quiso mostrar con el fin de ilustrar la ubicación exacta del pulso acústico antes de dispersarse con el lecho marino. En las tablas 5 y 6 se aprecia que para cada eco tiene asociado un número por el cual significa la clase que pertenece. Por tanto los números del uno al cinco con su respectivo sedimento se muestran en la tabla 4.

En la tabla 5 se muestran los valores característicos de E_1 (rugosidad) y E_2 (dureza) para los fondos rocosos (número tres) y las arenas gruesas (número cuatro).

En la tabla 6 se muestran los valores característicos de E_1 (rugosidad) y E_2 (dureza) para el lodo (número cinco) así mismo hay dos registros para las arenas finas.

Eco-Strength dB	Profundidad metros	Tiempo de la señal (s)	Presión de reflexión (l/m ²)	Coefficiente de reflexión	E1	E2 E2=E2a+E2b	Clase de sedimento Euclidean, Complete	Latitud /Y Horte (ll)	Longitud /X Oeste (W)	1. mezclas de limos y arenas finas 2. Limos 3. Fondos rocosos 4. arenas de grano grueso 5. Lodos
-59	13,78	0,0184	1,122E-09	0,0011	2,86E-11	7,81E-10	2	08 09.502172	076 46.397896	
-49	12,96	0,0173	3,548E-09	0,0035	3,35E-10	8,81E-08	2	08 09.506177	076 46.352073	
-88	19,25	0,0257	3,981E-11	0,0000	1,56E-14	6,39E-16	5	08 09.495960	076 46.303618	
-50	12,13	0,0162	3,162E-09	0,0032	3,18E-10	6,34E-08	2	08 09.494255	076 46.253693	
-52	11,67	0,0156	2,512E-09	0,0025	2,23E-10	2,72E-08	2	08 09.488057	076 46.204927	
-53	11,34	0,0151	2,239E-09	0,0022	1,91E-10	1,82E-08	2	08 09.488846	076 46.157899	
-49	11,02	0,0147	3,548E-09	0,0035	5,20E-10	1,22E-07	2	08 09.493722	076 46.113843	
-50	10,50	0,0140	3,162E-09	0,0032	4,72E-10	8,44E-08	2	08 09.500985	076 46.071417	
-51	10,29	0,0137	2,818E-09	0,0028	3,97E-10	5,54E-08	2	08 09.516356	076 46.032590	
-47	9,99	0,0133	4,467E-09	0,0045	1,09E-09	3,71E-07	2	08 09.530324	076 45.991623	
-50	9,82	0,0131	3,162E-09	0,0032	5,71E-10	9,64E-08	2	08 09.542947	076 45.954015	
-47	9,43	0,0126	4,467E-09	0,0045	1,28E-09	4,16E-07	2	08 09.562632	076 45.907459	
-60	23,40	0,0312	1,000E-09	0,0010	6,21E-12	1,73E-10	2	08 09.556856	076 49.123067	
-61	23,42	0,0312	8,913E-10	0,0009	4,92E-12	1,09E-10	2	08 09.560148	076 49.060410	
-55	23,43	0,0312	1,778E-09	0,0018	1,96E-11	1,73E-09	2	08 09.566046	076 48.995436	
-54	23,56	0,0314	1,995E-09	0,0020	2,43E-11	2,71E-09	2	08 09.569124	076 48.927680	
-53	23,54	0,0314	2,239E-09	0,0022	3,07E-11	4,30E-09	2	08 09.574523	076 48.860793	
-54	23,53	0,0314	1,995E-09	0,0020	2,44E-11	2,72E-09	2	08 09.578179	076 48.798183	
-58	23,52	0,0314	1,259E-09	0,0013	9,73E-12	4,31E-10	2	08 09.585480	076 48.735613	
-55	23,67	0,0316	1,778E-09	0,0018	1,91E-11	1,69E-09	2	08 09.587153	076 48.672652	
-60	23,73	0,0316	1,000E-09	0,0010	6,01E-12	1,69E-10	2	08 09.590762	076 48.607221	
-57	23,73	0,0316	1,413E-09	0,0014	1,20E-11	6,71E-10	2	08 09.595266	076 48.543577	
-57	23,65	0,0315	1,413E-09	0,0014	1,21E-11	6,76E-10	2	08 09.596316	076 48.484211	
-55	23,83	0,0318	1,778E-09	0,0018	1,88E-11	1,67E-09	2	08 09.599829	076 48.422828	
-59	29,91	0,0399	1,122E-09	0,0011	4,46E-12	1,70E-10	2	08 09.304979	076 52.349861	
-63	29,74	0,0397	7,079E-10	0,0007	1,80E-12	2,72E-11	2	08 09.304955	076 52.320675	
-62	30,00	0,0400	7,943E-10	0,0008	2,22E-12	4,24E-11	2	08 09.306419	076 52.286482	
-62	30,10	0,0401	7,943E-10	0,0008	2,20E-12	4,21E-11	2	08 09.307750	076 52.249932	
-62	30,09	0,0401	7,943E-10	0,0008	2,20E-12	4,22E-11	2	08 09.311157	076 52.213061	
-58	30,52	0,0407	1,259E-09	0,0013	5,36E-12	2,59E-10	2	08 09.312628	076 52.172012	
-63	30,79	0,0411	7,079E-10	0,0007	1,66E-12	2,54E-11	2	08 09.328255	076 52.131182	
-63	31,20	0,0416	7,079E-10	0,0007	1,61E-12	2,48E-11	2	08 09.329110	076 52.093599	
-62	31,53	0,0420	7,943E-10	0,0008	1,99E-12	3,85E-11	2	08 09.326710	076 52.052143	
-71	32,23	0,0430	2,818E-10	0,0003	2,38E-13	5,84E-13	5	08 09.336988	076 52.014863	
-58	31,97	0,0426	1,259E-09	0,0013	4,83E-12	2,36E-10	2	08 09.338531	076 51.974308	
-59	32,01	0,0427	1,122E-09	0,0011	3,83E-12	1,49E-10	2	08 09.336047	076 51.934855	
-58	25,26	0,0337	1,259E-09	0,0013	8,25E-12	3,75E-10	2	08 09.452695	076 50.118281	
-57	25,07	0,0334	1,413E-09	0,0014	1,06E-11	6,03E-10	2	08 09.461783	076 50.054137	
-58	24,87	0,0332	1,259E-09	0,0013	8,55E-12	3,86E-10	2	08 09.465638	076 49.985933	
-53	24,72	0,0330	2,239E-09	0,0022	2,74E-11	3,91E-09	2	08 09.472955	076 49.916553	
-51	24,53	0,0327	2,818E-09	0,0028	4,42E-11	9,97E-09	2	08 09.480124	076 49.850013	
-64	24,38	0,0325	6,310E-10	0,0006	2,25E-12	2,53E-11	2	08 09.488278	076 49.784936	
-54	24,11	0,0321	1,995E-09	0,0020	2,31E-11	2,59E-09	2	08 09.495795	076 49.721879	
-57	23,98	0,0320	1,413E-09	0,0014	1,17E-11	6,58E-10	2	08 09.504285	076 49.657298	
-53	23,85	0,0318	2,239E-09	0,0022	2,98E-11	4,19E-09	2	08 09.511716	076 49.593290	

Tabla 4. Valores de las variables geofísicas y además de E₁ y E₂ para el limo

-73	37,02	0,0494	2,239E-10	0,0002	1,10E-13	1,78E-13	3	08 25 200000	076 46,955996
-75	37,39	0,0499	1,778E-10	0,0002	6,82E-14	6,94E-14	3	08 25 200000	076 46,963996
-71	36,50	0,0487	2,818E-10	0,0003	1,81E-13	4,59E-13	3	08 25 200000	076 46,970998
-73	36,19	0,0483	2,239E-10	0,0002	1,16E-13	1,86E-13	3	08 25,198000	076 46,979996
-69	36,69	0,0489	3,548E-10	0,0004	2,83E-13	1,14E-12	3	08 25,195000	076 46,987996
-71	35,98	0,0480	2,818E-10	0,0003	1,86E-13	4,72E-13	3	08 25,191000	076 46,998997
-73	35,97	0,0480	2,239E-10	0,0002	1,18E-13	1,88E-13	3	08 25,186999	076 47,008996
-75	36,31	0,0484	1,778E-10	0,0002	7,27E-14	7,34E-14	3	08 25,178000	076 47,032996
-70	35,94	0,0479	3,162E-10	0,0003	2,35E-13	7,49E-13	3	08 25,171000	076 47,055995
-74	36,21	0,0483	1,995E-10	0,0002	9,21E-14	1,17E-13	3	08 25,162999	076 47,083998
-60	3,55	0,0047	1,000E-09	0,0010	2,53E-09	7,30E-09	3	08 25,156000	076 47,110995
-66	35,70	0,0476	5,012E-10	0,0005	6,00E-13	4,79E-12	3	08 25,147000	076 47,141998
-78	55,29	0,0737	1,259E-10	0,0001	1,47E-14	8,18E-15	3	08 25,143000	076 47,169997
-76	55,67	0,0742	1,585E-10	0,0002	2,29E-14	2,03E-14	3	08 25,140000	076 47,201997
-76	55,47	0,0740	1,585E-10	0,0002	2,31E-14	2,04E-14	3	08 25,141000	076 47,229996
-76	55,55	0,0741	1,585E-10	0,0002	2,30E-14	2,04E-14	3	08 25,140000	076 47,260995
-77	55,01	0,0733	1,413E-10	0,0001	1,87E-14	1,31E-14	4	08 25,139000	076 47,287996
-75	54,88	0,0732	1,778E-10	0,0002	2,97E-14	3,30E-14	4	08 25,139000	076 47,315998
-76	55,09	0,0735	1,585E-10	0,0002	2,34E-14	2,07E-14	4	08 25,141000	076 47,346997
-79	55,68	0,0742	1,122E-10	0,0001	1,15E-14	5,09E-15	3	08 25,143000	076 47,373995
-81	55,08	0,0734	8,913E-11	0,0001	7,41E-15	2,07E-15	4	08 25,150000	076 47,403996
-75	55,46	0,0739	1,778E-10	0,0002	2,91E-14	3,24E-14	4	08 25,149000	076 47,434995
-78	55,82	0,0744	1,259E-10	0,0001	1,44E-14	8,03E-15	4	08 25,154000	076 47,461996
-77	55,73	0,0743	1,413E-10	0,0001	1,81E-14	1,28E-14	4	08 25,157000	076 47,488997
-74	55,53	0,0740	1,995E-10	0,0002	3,65E-14	5,12E-14	4	08 25,167000	076 47,517997
-77	55,16	0,0735	1,413E-10	0,0001	1,85E-14	1,30E-14	4	08 25,172000	076 47,543997
-75	55,32	0,0738	1,778E-10	0,0002	2,92E-14	3,25E-14	4	08 25,179000	076 47,573998
-75	55,16	0,0735	1,778E-10	0,0002	2,94E-14	3,27E-14	4	08 25,184000	076 47,600995
-78	55,00	0,0733	1,259E-10	0,0001	1,48E-14	8,26E-15	4	08 25,193000	076 47,629995
-78	55,71	0,0743	1,259E-10	0,0001	1,44E-14	8,06E-15	4	08 25,196000	076 47,656996
-77	55,16	0,0735	1,413E-10	0,0001	1,85E-14	1,30E-14	4	08 25,201000	076 47,687995
-78	57,04	0,0761	1,259E-10	0,0001	1,37E-14	7,71E-15	4	08 25,207000	076 47,713995
-74	55,47	0,0740	1,995E-10	0,0002	3,66E-14	5,13E-14	4	08 25,211999	076 47,743996
-78	55,80	0,0744	1,259E-10	0,0001	1,44E-14	8,04E-15	4	08 25,215999	076 47,770997
-75	55,76	0,0743	1,778E-10	0,0002	2,87E-14	3,20E-14	4	08 25,224000	076 47,800995
-74	55,72	0,0743	1,995E-10	0,0002	3,62E-14	5,09E-14	4	08 25,230000	076 47,826995
-79	56,71	0,0756	1,122E-10	0,0001	1,10E-14	4,92E-15	4	08 25,235000	076 47,856996
-77	55,92	0,0746	1,413E-10	0,0001	1,80E-14	1,27E-14	4	08 25,239999	076 47,884995
-80	56,51	0,0753	1,000E-10	0,0001	8,83E-15	3,12E-15	4	08 25,249000	076 47,915998
-77	57,30	0,0764	1,413E-10	0,0001	1,71E-14	1,21E-14	4	08 25,254000	076 47,942995
-76	56,52	0,0754	1,585E-10	0,0002	2,22E-14	1,97E-14	4	08 25,260000	076 47,973998
-78	56,79	0,0757	1,259E-10	0,0001	1,38E-14	7,77E-15	4	08 25,262000	076 48,001996
-76	55,51	0,0740	1,585E-10	0,0002	2,30E-14	2,04E-14	4	08 25,265999	076 48,033997
-78	56,27	0,0750	1,259E-10	0,0001	1,41E-14	7,91E-15	4	08 25,267999	076 48,060994
-79	57,49	0,0767	1,122E-10	0,0001	1,07E-14	4,79E-15	4	08 25,271000	076 48,092995
-75	56,44	0,0753	1,778E-10	0,0002	2,80E-14	3,13E-14	4	08 25,278000	076 48,118994
-74	56,51	0,0753	1,995E-10	0,0002	3,51E-14	4,95E-14	4	08 25,287000	076 48,148996
-79	56,10	0,0748	1,122E-10	0,0001	1,13E-14	5,02E-15	1	08 25,294999	076 48,173994

Tabla 5. Valores de las variables geofísicas y además de E₁ y E₂ para las arenas gruesas y fondos rocosos

-77	53,83	0,0718	1,413E-10	0,0001	1,95E-14	1,37E-14	5	08 27.143999	077 10.270997
-71	54,00	0,0720	2,818E-10	0,0003	7,73E-14	2,15E-13	5	08 27.146000	077 10.304997
-75	53,44	0,0713	1,778E-10	0,0002	3,14E-14	3,48E-14	5	08 27.151000	077 10.340996
-76	54,13	0,0722	1,585E-10	0,0002	2,43E-14	2,14E-14	5	08 27.153000	077 10.377996
-77	53,71	0,0716	1,413E-10	0,0001	1,96E-14	1,37E-14	5	08 27.155000	077 10.412997
-75	54,09	0,0721	1,778E-10	0,0002	3,06E-14	3,40E-14	5	08 27.157000	077 10.446997
-76	54,52	0,0727	1,585E-10	0,0002	2,39E-14	2,11E-14	5	08 27.158000	077 10.485996
-78	53,89	0,0719	1,259E-10	0,0001	1,55E-14	8,59E-15	5	08 27.156000	077 10.518994
-76	53,97	0,0720	1,585E-10	0,0002	2,45E-14	2,15E-14	5	08 27.157000	077 10.556996
-75	54,45	0,0726	1,778E-10	0,0002	3,02E-14	3,35E-14	5	08 27.158999	077 10.589994
-78	54,71	0,0729	1,259E-10	0,0001	1,50E-14	8,35E-15	5	08 27.158000	077 10.622996
-74	54,42	0,0726	1,995E-10	0,0002	3,81E-14	5,32E-14	5	08 27.153000	077 10.661995
-74	53,82	0,0718	1,995E-10	0,0002	3,90E-14	5,44E-14	5	08 27.149000	077 10.694997
-74	54,39	0,0725	1,995E-10	0,0002	3,81E-14	5,33E-14	5	08 27.145000	077 10.728997
-74	54,41	0,0725	1,995E-10	0,0002	3,81E-14	5,32E-14	5	08 27.140999	077 10.766995
-73	54,16	0,0722	2,239E-10	0,0002	4,84E-14	8,51E-14	5	08 27.139999	077 10.799997
-74	54,41	0,0725	1,995E-10	0,0002	3,81E-14	5,32E-14	5	08 27.136999	077 10.837995
-72	53,96	0,0719	2,512E-10	0,0003	6,15E-14	1,36E-13	5	08 27.136999	077 10.870997
-76	54,67	0,0729	1,585E-10	0,0002	2,38E-14	2,10E-14	5	08 27.136999	077 10.908995
-79	54,52	0,0727	1,122E-10	0,0001	1,20E-14	5,30E-15	5	08 27.135999	077 10.942994
-74	54,51	0,0727	1,995E-10	0,0002	3,80E-14	5,31E-14	5	08 27.133999	077 10.981997
-72	52,39	0,0699	2,512E-10	0,0003	6,55E-14	1,44E-13	5	08 27.132000	077 11.014996
-72	52,23	0,0696	2,512E-10	0,0003	6,59E-14	1,45E-13	5	08 27.127000	077 11.048995
-72	52,36	0,0698	2,512E-10	0,0003	6,55E-14	1,44E-13	5	08 27.124000	077 11.085995
-73	52,30	0,0697	2,239E-10	0,0002	5,22E-14	9,10E-14	5	08 27.121000	077 11.118994
-74	51,77	0,0690	1,995E-10	0,0002	4,24E-14	5,86E-14	5	08 27.120000	077 11.155994
-72	52,36	0,0698	2,512E-10	0,0003	6,55E-14	1,44E-13	5	08 27.116999	077 11.188996
-74	52,16	0,0695	1,995E-10	0,0002	4,17E-14	5,77E-14	2	08 27.110999	077 11.225996
-72	52,39	0,0699	2,512E-10	0,0003	6,55E-14	1,44E-13	2	08 27.105000	077 11.257997
-74	52,16	0,0695	1,995E-10	0,0002	4,17E-14	5,77E-14	2	08 27.101000	077 11.295995
-74	52,16	0,0695	1,995E-10	0,0002	4,17E-14	5,77E-14	2	08 27.097000	077 11.328996
-74	52,16	0,0695	1,995E-10	0,0002	4,17E-14	5,77E-14	2	08 27.092000	077 11.361995
-74	52,16	0,0695	1,995E-10	0,0002	4,17E-14	5,77E-14	2	08 27.088999	077 11.399996
-69	34,44	0,0459	3,548E-10	0,0004	3,25E-13	1,29E-12	2	08 27.084999	077 11.432995
-66	34,65	0,0462	5,012E-10	0,0005	6,40E-13	5,07E-12	2	08 27.079999	077 11.471994
-65	34,56	0,0461	5,623E-10	0,0006	8,11E-13	8,08E-12	2	08 27.076000	077 11.504996
-67	34,26	0,0457	4,467E-10	0,0004	5,22E-13	3,27E-12	1	08 27.070000	077 11.536996
-64	34,57	0,0461	6,310E-10	0,0006	1,02E-12	1,28E-11	1	08 27.064999	077 11.574994
-65	34,66	0,0462	5,623E-10	0,0006	8,06E-13	8,04E-12	2	08 27.037999	077 11.636996
-66	35,03	0,0467	5,012E-10	0,0005	6,25E-13	4,97E-12	5	08 26.952000	077 03.427995
-67	34,82	0,0464	4,467E-10	0,0004	5,03E-13	3,17E-12	5	08 26.950999	077 03.459996
-65	34,74	0,0463	5,623E-10	0,0006	8,02E-13	8,00E-12	5	08 26.949000	077 03.487995
-70	35,00	0,0467	3,162E-10	0,0003	2,49E-13	7,89E-13	5	08 26.949000	077 03.519995
-65	34,67	0,0462	5,623E-10	0,0006	8,05E-13	8,03E-12	5	08 26.949000	077 03.546996
-69	34,73	0,0463	3,548E-10	0,0004	3,19E-13	1,27E-12	5	08 26.949000	077 03.577995
-67	35,23	0,0470	4,467E-10	0,0004	4,90E-13	3,10E-12	5	08 26.942000	077 03.605994
-68	35,08	0,0468	3,981E-10	0,0004	3,93E-13	1,97E-12	5	08 26.937000	077 03.635995
-66	35,28	0,0470	5,012E-10	0,0005	6,15E-13	4,90E-12	5	08 26.937000	077 03.663994

Tabla 6. Valores de las variables geofísicas y además de E_1 y E_2 para los lodos y arenas finas



Figura 64. Localización geográfica de los dos registros de cobertura sedimentaria de limos, tomados de la tabla 12, a escala 1:50000 (foto tomada de Google Earth)

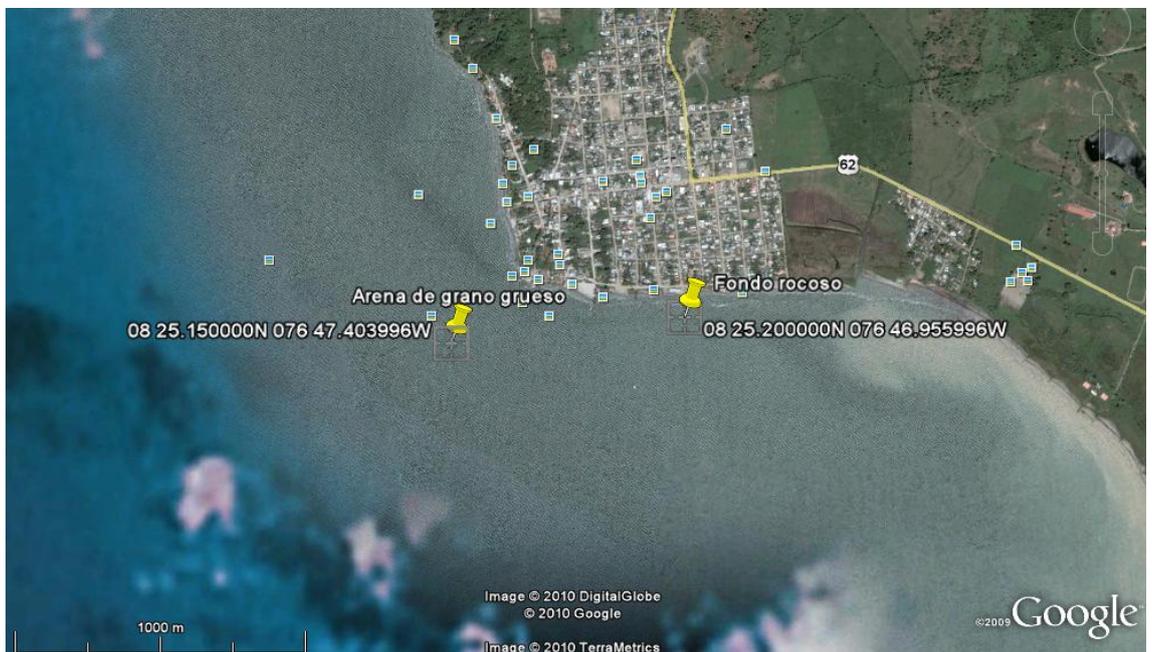


Figura 65. Localización geográfica de los dos registros de cobertura sedimentaria de arena gruesa y fondo rocoso, tomado de la tabla 13 a escala 1:1000 (foto tomada de Google Earth)



Figura 66. Localización geográfica de los dos registros de cobertura sedimentaria de arena fina y lodo sacados de la tabla 14 a escala 1:10000 (foto sacada de Google Earth)