TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INCLUSIÓN DE PARÁMETROS DE LA CARGA EN EL MODELAJE SÍSMICO 2D POR DIFERENCIAS FINITAS PARA EL ORIENTE DE VENEZUELA

Presentado Ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar el Título de Ingeniero Geofísico Por el Br. Aray Fuentes, Jesús Rafael

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INCLUSIÓN DE PARÁMETROS DE LA CARGA EN EL MODELAJE SÍSMICO 2D POR DIFERENCIAS FINITAS PARA EL ORIENTE DE VENEZUELA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Juan José Infante TUTORES INDUSTRIALES: Lic. Jesús Sierra Ing. Edgardo Padrón

> Presentado Ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar el Título de Ingeniero Geofísico Por el Br. Aray Fuentes, Jesús Rafael

Caracas, 2001

© Aray Fuentes Jesús 2001. Hecho al Depósito de Ley. Depósito legal lft4872001600107

DEDICATORIA:

A DIOS Y A LA VIRGEN DEL CARMEN

A MI MADRE CARMEN JOSEFINA

A MI PADRE JESUS RAFAEL

A MIS HERMANOS MILSY JOSEFINA Y ANDRIU JESUS

A MI NOVIA JESAIDA JOSEFINA

A TODOS MIS FAMILIARES Y AMIGOS QUE APRECIO Y ESTIMO.

AGRADECIMIENTOS:

Al Ingeniero Asdrúbal Iriza de la Gerencia de Operaciones y Servicios Técnicos Especializados PDVSA Exploración y Producción – Oriente, por el apoyo inicial brindado y por la información general ofrecida para complementar este Trabajo Especial de Grado.

Al Licenciado Jorge Barrera, de la Gerencia Corporativa de Prevención y Control de Pérdidas de PDVSA Corporativa, por el apoyo en las gestiones y trámites necesarios que permitieron mi ingreso en la Industria para la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Al Ingeniero Juan Ramón Jiménez, de la Gerencia de Delineación y Caracterización de PDVSA -INTEVEP, por el asesoramiento en el manejo de las rutinas de programación del Entorno Integrado de Programación Matlab 5.3.

Al Señor Miguel Gonzáles, de la Gerencia de Análisis Exploratorio de PDVSA - INTEVEP, por la ayuda ofrecida en el uso del Programa de Procesamiento Sísmico Promax 98.

Al Dr. Andrey Ortega, de la Gerencia de Análisis Exploratorio de PDVSA - INTEVEP, por las sugerencias ofrecidas para implementar el método de trabajo.

Al Ingeniero Elieser Pérez, de la Gerencia de Delineación y Caracterización de PDVSA - INTEVEP, por los conocimientos ofrecidos sobre el programa ANISO2D, y por apoyo constante en la utilización del Modelo Sísmico 2D donde se implementó el resultado final del método desarrollado.

Al Ingeniero Edgardo Padrón, de la de la Gerencia de Operaciones y Servicios Técnicos Especializados PDVSA Exploración y Producción – Caracas, quién creyó en mi y gestionó el financiamiento de este Trabajo Especial de Grado.

A mis compañeros de trabajo Zoila, Migdalys, Edgar, Mauro, Daniel y Susana, Ingenieros egresados de la Universidad Simón Bolívar, por el apoyo brindado en las etapas iniciales de mi trabajo en PDVSA - INTEVEP, y a mis compañeros Eugenia, Mariano, José y Dagoberto, por su apoyo en las etapas finales de este Trabajo Final de Grado.

A mi Tutor Académico Profesor Juan José Infante, de la Universidad Central de Venezuela, por el apoyo y la colaboración prestada durante la realización de este Trabajo Especial de Grado.

A mi Tutor Industrial en PDVSA - INTEVEP Licenciado Jesús Sierra, no sólo por haber creído en mi al darme la oportunidad de trabajar en la ejecución de este Proyecto, sino también por la asesoría, apoyo y cooperación a lo largo de los nueve meses de elaboración del mismo.

A la Universidad Central de Venezuela, por la educación y por todos aquellos conocimientos aprendidos; no sólo para mi formación como profesional sino también para mi formación integral como persona.

A PDVSA Exploración y Producción por financiar y aportar la información sísmica para llevar a cabo este Trabajo Especial de Grado.

Aray F. Jesús R.

INCLUSIÓN DE PARÁMETROS DE LA CARGA EN EL MODELAJE SÍSMICO 2D POR DIFERENCIAS FINITAS PARA EL ORIENTE DE VENEZUELA

Tutor Académico: Prof. Juan Infante. Tutores Industriales: Lic. Jesús Sierra e Ing. Edgardo Padrón. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2001, Nº pág. 115.

Palabras Claves: Adquisición sísmica, amplitud sísmica, modelaje sísmico, fuentes sísmicas

Resumen.

En las etapas de identificación y evaluación de oportunidades exploratorias el disponer de información sísmica de alta calidad es de importancia en la interpretación tectono-secuencial; sin embargo, en la mayoría de los casos, cuando se adquieren datos sísmicos en el área Oriental de Venezuela esa calidad baja a mala, debido a la presencia de una espesa capa meteorizada y del alóctono que aflora en superficie entre otras condiciones geológicas presentes. Si a lo anterior se le añade la sensibilidad ambiental, surge la necesidad de simular en el computador como sería la repuesta sísmica previo a realizar nuevos levantamientos, a fín de optimizar los parámetros de diseño de la adquisición y lograr así mejorar la calidad de los datos grabados y una disminución del impacto ambiental. Con el objeto de realizar un modelaje sísmico 2D por diferencias finitas que incluya el efecto real de la fuente, se propone un método que permite determinar factores de

amplitud inicial del disparo que tomen en cuenta el tamaño y la profundidad de la fuente, y las condiciones del entorno correspondiente a las capas más cercanas a la superficie. Los datos sísmicos y el modelo sísmico 2D a ser utilizados en este trabajo, fueron realizados previamente y corresponden al área de Capiricual la cual se encuentra ubicada a lo largo del frente de deformación de montañas al norte del estado Anzoátegui.

Para efectos de estimar los factores de amplitud en el punto donde se realiza la explosión, se establece un modelo de tierra en la cercanía de la carga que se supone homogéneo y elástico, sin efectos de absorción y en donde sólo existe un efecto de atenuación geométrica con la distancia. En este modelo se plantea la existencia de una amplitud asociada al campo cercano en el punto de ubicación de la carga, y un conjunto de amplitudes asociadas al campo lejano hasta una distancia máxima dada. Basada en las observaciones del campo lejano se propone estimar la amplitud asociada al campo cercano (factor K). Estos factores de amplitud se estiman para un conjunto de datos sísmicos adquiridos con tres patrones de perforación sobre una Línea de Prueba ubicada en el área de Capiricual, para luego ser introducidos en una sección sintética o modelo a incidencia normal definido sobre un transecto paralelo a la mencionada Línea de Prueba. Se obtienen tres imágenes que presentan un mayor realismo al reflejar una variación lateral de amplitud en función del tipo de patrón usado al adquirir los datos, y de la capacidad de éstos en transmitir una alta cantidad de energía a un entorno con variedad en la dureza de las litologías aflorantes y con gran complejidad geológica como ocurre en el frente de montañas.

INDICE

Contenido:	Página:
Portada	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Índice	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tablas	vii

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES	1
1.1.1. Objetivos y alcance del trabajo	2
1.1.1.1 General	2
1.1.1.2 Específicos	3
1.1.2. Área estudiada	4

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE ONDAS	6
2.1.1. Medios Acústicos y Elásticos	8
2.1.2. Ecuación de la Onda en Medios Elásticos, Isotrópicos y Homogéneos:	
Solución para Ondas Esféricas	9
2.2. EL MODELO DE LA FUENTE DE EXPLOSIVOS (DINAMITA)	12
2.3. COMPORTAMIENTO DE LA AMPLITUD CON LA RADIACIÓN DE	
ONDAS ELÁSTICAS DESDE UNA FUENTE PUNTUAL (EXPLOSIVA)	16
2.3.1. Divergencia Esférica	17
2.3.2. Dispersiones	19

2.3.3. Absorción	19
2.3.4. Transmisión	21
2.4. RELACIÓN ENTRE LA AMPLITUD SÍSMICA Y EL TAMAÑO DE LA	
CARGA	23

3. CAPÍTULO III: MÉTODO PARA ESTIMAR EL FACTOR DE AMPLITUD (K) ASOCIADO AL DISPARO O EXPLOSIÓN EN EL PUNTO DE TIRO EN DATOS DE SÍSMICA DE SUPERFICIE

- 3.1. EXTRACCIÓN DE AMPLITUDES A PARTIR DE LA ONDA DIRECTA 24
- 3.2. ESTABLECIMIENTO DEL MODELO DE AJUSTE LINEAL PARA EL COMPORTAMIENTO DE LA AMPLITUD DE LA ONDA SÍSMICA VERSUS LA DISTANCIA EN LA ZONA CERCANA A LA CARGA.....
 26

4. CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA REGIONAL

4.1. GEOLOGÍA DE SUPERFICIE	34
4.2. MARCO TECTÓNICO REGIONAL	38

5. CAPÍTULO V: APLICACIÓN DEL MÉTODO A DATOS REALES PARA LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE AMPLITUD (K) :

5.1. GENERALIDADES	
5.2. PATRÓN DE PERFORACIÓN 1 (P1): 3 POZOS, 3 METROS DE	
PROFUNDIDAD Y 0.5 Kg. DE CARGA (TOTAL 1.5 Kg.)	
5.2.1. Línea de Prueba	
5.2.1.1. Estimación de K para el patrón de perforación 1 (P1)	
5.3. PATRÓN DE PERFORACIÓN 2 (P2): 1 POZO, 6 METROS DE	
PROFUNDIDAD Y 2 Kg. DE CARGA	

Contenido:

Página:

5.3.1. Línea de Prueba (prioritaria)	54
5.3.1.1. Estimación de K para el patrón de perforación 2 (P2)	54
5.3.2. Intervalo en la Zona Sur de la Línea	60
5.3.2.1. Estimación de K para el patrón de perforación 2 (P2)	60
5.4. PATRÓN DE PERFORACIÓN 3 (P3): 1 POZO, 10 METROS DE	
PROFUNDIDAD Y 2 Kg. DE CARGA	66
5.4.1. Línea de Prueba	66
5.4.1.1. Estimación de K para el patrón de perforación 3 (P3)	66
5.5. CORRELACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA CON LA	
TOPOGRAFÍA Y LA GEOLOGÍA DE LA ZONA	73
5.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS AL APLICAR A	
DATOS REALES EL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE	
AMPLITUD (K)	79
5.6.1. Patrón de Perforación 1	79
5.6.2. Patrón de Perforación 2	80
5.6.2.1. Zona Norte	80
5.6.2.2. Zona Sur	82
5.6.3. Patrón de Perforación 3	83

6.2. MULTIPLICACIÓN DE LOS VALORES DE AMPLIFICACIÓN K	
ESTIMADOS A LAS TRAZAS DE INCIDENCIA NORMAL DE LA	
SECCIÓN SÍSMICA SINTÉTICA	84
6.2.1. Introducción de los Factores K Estimados con el Patrón de Perforación	
2 (P2)	85
6.2.2. Introducción de los Factores K Estimados con los Patrones de	
Perforación 1 y 3 (P1 y P3)	89

6.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS AL MULTIPLICAR	
LOS FACTORES ESTIMADOS DE AMPLITUD (K) A LAS TRAZAS	
DE INCIDENCIA NORMAL DE LA SECCIÓN SÍSMICA SINTÉTICA	92
6.3.1. Patrón de Perforación 1	92
6.3.2. Patrón de Perforación 2	93
6.3.3. Patrón de Perforación 3	94
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	97
APÉNDICE A	100

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Nº:
---------	-----

1. Mapa de ubicación del Área de Estudio	5
2. Oportunidades más destacadas en el Norte de Anzoátegui	5
3. Gráfico de Amplitud de Onda Sísmica en función del Tiempo	7
4. Propagación de un Frente de Onda de Tipo Esférico y Concéntrico	11
5. Explosión de Dinamita (Medio Homogéneo)	13
6. Modelo para la Fuente Explosiva	15
7. Factores que afectan la Amplitud	16
8. Divergencia Esférica: Atenuación por debajo de Amplitud Normalizada	18
9. Gráfico de las amplitudes de Onda Directa contra la distancia	25
10. Gráfico de la energía de la Onda Directa contra la distancia	25
11. Modelo de tierra en la cercanía de la carga	26
12. Atenuación de la Amplitud como función del logaritmo de la distancia	29
13. Disparo sintético 1 (base) con el factor de amplificación 1.0	30
14. Disparo sintético 2 con el factor de amplificación 0.6	31
15. Amplitud de la Onda Directa versus la distancia: Disparo 1 – Factor	
de amplificación 1.0	32
16. Amplitud de la Onda Directa versus la distancia: Disparo 2 – Factor	
de amplificación 0.6	32
17. Ajuste lineal de las amplitudes para el disparo 1 y estimación del factor	
de amplificación A_0 (K)	33
18. Ajuste lineal de las amplitudes para el disparo 2 y estimación del factor	
de amplificación A_0 (K)	33
19. Mapa de ubicación de la Línea Sísmica cercana a la Sección del río	
Capiricual donde se elaboró la Columna Compuesta	36
20. Columna Compuesta de la Sección del río Capiricual	37
21. Marco Tectónico Regional	40
22. Mapa de ubicación de la Línea de Prueba con respecto al resto del	
Levantamiento Sísmico Capiricual 2D	43

Figuras Nº:

23.	Croquis de la Línea de Prueba donde se muestra la línea prioritaria	
	(en verde) y la parte del programa normal del proyecto	44
24.	Arreglo de receptores usados en el levantamiento	45
25.	Arreglo de fuentes utilizado en el levantamiento	46
26.	Diagrama de Disparo Patrón 1 (P1)	47
27.	Estimación de K para el disparo FFID 7, patrón 1	48
28.	Estimación de K para el disparo FFID 63, patrón 1	49
29.	Estimación de K para el disparo FFID 217, patrón 1	50
30.	Factores de amplificación K versus la distancia respecto al origen de la	
	Línea de Prueba para el patrón 1	51
31.	Valores de K estimados a lo largo de la Línea de Prueba (prioritaria)	
	para el patrón 1	53
32.	Diagrama de Disparo Patrón 2 (P2)	54
33.	Estimación de K para el disparo FFID 68, patrón 2	55
34.	Estimación de K para el disparo FFID 136, patrón 2	56
35.	Estimación de K para el disparo FFID 511, patrón 2	57
36.	Factores de amplificación K estimados versus la distancia del origen de la	
	Línea de Prueba (prioritaria) para el patrón 2	58
37.	Estimación de K para el disparo FFID 939, patrón 2	61
38.	Estimación de K para el disparo FFID 956, patrón 2	62
39.	Estimación de K para el disparo FFID 888, patrón 2	63
40.	Factores de amplificación K versus la distancia respecto al inicio de la línea	
	correspondiente al intervalo en la zona sur del levantamiento para el patrón	
	2 Prueba (P1)	64
41.	Valores de K estimados a lo largo de la Línea de Prueba completa	65
42.	Estimación de K para el disparo FFID 6, patrón 3	67
43.	Estimación de K para el disparo FFID 276, patrón 3	68
44.	Estimación de K para el disparo FFID 762, patrón 3	69
45.	Factores de amplificación K versus la distancia respecto al origen de la	
	Línea de Prueba para el patrón 3	70

Figuras Nº:

Página:

46. Valores de K estimados a lo largo de la Línea de Prueba (prioritaria) para el	
patrón 3	72
47. Diagrama de Disparo Patrón Especial	73
48. Correlación de los valores de K estimados para el patrón 1 (P1) con la	
topografía y geología de la zona	75
49. Correlación de los valores de K estimados para el patrón 2 (P2) con la	
topografía y geología de la zona	76
50. Correlación de los valores de K estimados para el patrón 3 (P3) con la	
topografía y geología de la zona	77
51. Disparos 420 y 64 de la Línea Sísmica de Prueba en la Zona Norte	82
52. Sección Sísmica Sintética 2D de Capiricual a Incidencia Normal	85
53. Factores de amplitud (patrón 2), perfil topográfico con escala vertical	
aumentada y Sección Sísmica Sintética – Capiricual – 2D	87
54. Disparos 50 y 150	88
55. Disparos 50 Y 150 con Factores K Introducidos	88
56. Factores de amplitud (patrón 1), perfil topográfico con escala vertical	
aumentada y Sección Sísmica Sintética – Capiricual – 2D	90
57. Factores de amplitud (patrón 3), Perfil topográfico con escala vertical	
aumentada y Sección Sísmica Sintética – Capiricual – 2D	91

LISTA DE TABLAS

Tablas:	
I. Pérdidas de Amplitud por Divergencia Esférica	18
II. Resultados obtenidos con el Método de Estimación Línea Prioritaria	
– Patrón de Perforación 1	52
III. Resultados obtenidos con el Método de Estimación Línea Prioritaria	
– Patrón de Perforación 2	59
IV. Resultados obtenidos con el Método de Estimación Zona Sur	
– Patrón de Perforación 2	64
V. Resultados obtenidos con el Método de Estimación Línea de Prueba	
– Patrón de Perforación 3	72
VI. Formaciones Geológicas aflorantes en Superficie, Litología y Dureza	78

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

En el esquema de Proyectos de Exploración seguido por la Industria Petrolera se llevan a cabo una serie de actividades orientadas a estudiar los sistemas petroleros, de manera de poder evaluar las posibles oportunidades exploratorias a fin de estimar sus potencialidades económicas. En las etapas iniciales de identificación y evaluación de estas oportunidades exploratorias y de prospectos, dentro de un conjunto de técnicas multidisciplinarias, la manipulación y evaluación de una gran cantidad de información sísmica obtenida en varios levantamientos se hace importante en la interpretación tectono-secuencial. Sin embargo, la calidad de los datos sísmicos grabados en la mayoría de los casos y específicamente para el área Oriental de Venezuela, son de mala o baja calidad, esto atribuido a las condiciones geológicas particulares intrínsecas al área (espesa capa meteorizada y presencia del alóctono aflorando en superficie). Estas características de los datos sísmicos y la sensibilidad ambiental de estas áreas, llevan a la necesidad de simular en un computador como sería la respuesta sísmica previa a realizar nuevos levantamientos, con el fin de optimizar los parámetros de los diseños de adquisición. Como consecuencia se desea tener una mejoría en la calidad de los datos grabados, una disminución en el impacto ambiental y una disminución en los costos de los levantamientos. Con el propósito de realizar un modelaje sísmico lo más real posible se usan algoritmos por diferencias finitas que simulan la propagación del campo de ondas completo. Debido a limitaciones en la tecnología actual existen restricciones sobre los factores físicos a modelar, tal como el efecto de la capa meteorizada y la generación de ondas de superficie, el efecto de la fuente (intensidad de la carga, en el caso de explosivos o cañones de aire), la respuesta de los geófonos y el ruido ambiental. Aunado a todos estos factores la poca o ninguna caracterización geológico-espacial de las propiedades de las capas más cercanas a la superficie en las áreas donde se pretende modelar la respuesta sísmica.

Como parte del servicio técnico aportado por el INTEVEP, entre otros, a los Proyectos de Identificación de Prospectos y de Estimación de su Potencialidad Económica (PGP) en áreas de posible oportunidad exploratoria ubicadas en el oriente de Venezuela, en este trabajo se propone una metodología para incorporar el efecto de la carga explosiva en el modelaje sísmico 2D por diferencias finitas a partir de la estimación de la amplitud inicial del disparo o explosión usando datos reales de campo.

1.1.1. Objetivos y alcance del trabajo

1.1.1.1. General:

Introducir de una forma más realista el efecto de la carga explosiva, utilizada en levantamientos sísmicos, en el modelaje 2D por diferencias finitas realizado para el oriente del país; a partir de la implementación de factores de amplitud inicial de los disparos, estimados tomando en cuenta el tamaño y profundidad de la carga y las condiciones de su entorno.

1.1.1.2. Específicos:

- Estimar valores de amplitud de la onda directa como función de la distancia en un grupo de disparos de campo ubicados a largo de una línea sísmica de prueba correspondiente a un levantamiento 2D, adquirido en el oriente del país con cargas explosivas de diversos tamaños y profundidades, donde la información de la capa meteorizada es escasa.
- Obtener las ecuaciones que relacionen la amplitud de la onda directa obtenida a partir de los disparos de campo como una función de la distancia, de modo de describir el comportamiento físico de la amplitud en relación a los patrones de perforación y al entorno de la carga explosiva.
- Estimar factores de amplitud inicial aproximada "K" para los diversos patrones de carga mediante ajuste lineal, en los puntos donde se ubiquen los disparos a lo largo de la línea de prueba a ser utilizada.
- Incorporar los factores de amplitud inicial "K" normalizados en un modelo previamente realizado por diferencias finitas, correspondiente a un transecto sísmico regional definido paralelamente a la línea de prueba, a fin de obtener una sección sísmica sintética a incidencia normal (sección apilada) con variación lateral de amplitud representativa del subsuelo, que incorpore de una manera más realista el efecto conjunto del patrón de perforación o carga usado y de su entorno.

1.1.2. Área estudiada

El área de estudio se encuentra dentro de la región nor-central de la Cuenca Oriental de Venezuela, una franja comprendida por unos 200 Km de largo por 50 Km de ancho, y que abarca la parte septentrional de los estados Guárico y Anzoátegui. Esta región cubre parte de las estribaciones meridionales del frente de montañas de Guárico y Anzoátegui, desde el campo Yucal – Placer al oeste hasta el sistema de fallas de Urica en el este, extendiéndose al sur hasta el paralelo de Valle de La Pascua (Figura 1). La oportunidad exploratoria del área en estudio bajo el nombre de Capiricual, junto con las de Ensenada y Conceptual de Urica – Mundo Nuevo, fue determinada en un proyecto anterior de identificación de oportunidades (PGO) a lo largo del frente de deformación de montañas al norte de Anzoátegui (Figura 2). En el área de Capiricual se realiza un levantamiento sísmico el cual va a ser objeto de estudio detallado en este trabajo, cubriendo un área aproximada de 1266 Km² y abarcando en su gran mayoría la parte rural de los municipios Bolívar, Sotillo y Libertad del estado Anzoátegui, al sur - este de la ciudad de Barcelona. Dentro del área del prospecto se encuentran los poblados de Naricual, Bergatín y Santa Inés como los más importantes, así como parte de la zona conocida como Serranía de Turimiquire la cual es de gran importancia desde el punto de vista ecológico, pues es la región productora de agua más importante de esta zona del país.



Figura 1. Mapa de Ubicación del Área de Estudio

Tomado de PDVSA PROJECT NET(2000)



Figura 2. Oportunidades más destacadas en el Norte de Anzoátegui

Tomado de PDVSA PROJECT NET(2000)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELASTICAS:

Los métodos sísmicos se basan en el fenómeno de propagación de ondas en la tierra. El término *"onda"* se emplea para describir una perturbación que se propaga desde un punto en un medio a otros puntos del mismo sin que en dicho medio, como conjunto, se produzca ningún desplazamiento permanente; esta propagación es posible gracias a las propiedades elásticas de las rocas. En general, cuando a un cuerpo sólido se le aplican fuerzas externas, éstas pueden cambiar el tamaño y forma de dicho cuerpo, al mismo tiempo que se generan fuerzas internas que tratan de resistir esto cambios. Como resultado de este proceso, el cuerpo sólido tiende a regresar a su estado original. Esta propiedad, de resistir cambios de forma y tamaño, y de tender a regresar al estado original una vez removidas las fuerzas externas, se denomina *"elasticidad"*.

La *"teoría de la elasticidad"*, que explica en términos generales el comportamiento físico del método sísmico, es aquella que relaciona las fuerzas aplicadas a una superficie externa de un cuerpo, y los cambios en forma y tamaño resultantes.

Un sólido es *"elásticamente homogéneo"* si los módulos elásticos se mantienen constantes a lo largo de todo el cuerpo, es decir que la homogeneidad es la uniformidad de una propiedad física a través de un material; por lo que la velocidad permanecerá constante de punto a punto.

Un cuerpo elástico cuyas propiedades físicas (incluyendo la velocidad) son las mismas independientemente de la dirección de observación se llama *"isotrópico"*.

La *"teoría de propagación de ondas"* se basa en la solución del problema dinámico, esto es, de la ecuación de la onda en medios elásticos.

Las ondas se clasifican según el tipo de medio donde se propagan y el carácter de la fuente. Se describen generalmente, en términos de su amplitud, indicando la forma en que esta varía con el espacio y en el tiempo. Las *"ondas sísmicas"* son un caso particular de la clase general ondas elásticas; *"las ondas elásticas"* se propagan en medios que tienen dos propiedades: inercia y elasticidad. La elasticidad es necesaria para proporcionar una fuerza que tienda a restaurar una partícula desplazada del medio a su posición primitiva. La inercia es necesaria para que la partícula desplazada transmita su impulso a una partícula adyacente.

"La amplitud", parámetro utilizado para describir el comportamiento de las ondas elásticas, en el caso particular de las ondas sísmicas se define como el módulo del vector que mide el desplazamiento de las partículas afectadas por el tránsito de una onda sísmica (Figura 3).



Figura 3. Gráfico de Amplitud de Onda Sísmica en función del Tiempo. Nótese que cuando la amplitud es cero las partículas no están perturbadas.

2.1.1. Medios Acústicos y Elásticos:

"Las propiedades físicas de los materiales de la Tierra son muy complicadas. Por ejemplo la mineralogía, la litología, la porosidad, el fracturamiento, la densidad y la permeabilidad, entre otras propiedades, pueden variar de un punto a otro de la Tierra. Para llevar a cabo una simulación y procesamiento sísmico, se utiliza un modelo matemático para aproximar la propagación de la onda y sus efectos. Este modelo puede ser acústico, elástico, o más complicado".

"En la mayoría de los trabajos realizados en sísmica que involucran simulación y procesamiento acústicos, el comportamiento elástico es incluido sólo cuando este no puede ser evitado. En términos físicos, un medio acústico es un fluido que puede ser gas o líquido. El sonido y ondas sísmicas son ejemplos de ondas mecánicas, las cuales propagan energía mecánica a través del medio. Solo dos parámetros físicos son requeridos para determinar completamente el material con respecto a la propagación mecánica de la onda: la densidad de la masa (ρ) y la velocidad del sonido (v); existiendo otros parámetros adicionales para un medio real. El medio acústico tolera solo un tipo de onda corpórea: el sonido; las ondas de superfície en el agua existen debido a la presencia de la gravedad, y son fundamentalmente diferentes a las del sonido que podrían propagarse en un ambiente libre de gravedad. Otros nombres para una onda sónica son las ondas longitudinales, las ondas compresionales, o las ondas P. Un medio acústico será homogéneo si v es constante con respecto a *x*, *y*, y *z*".

"Un modelo acústico de la Tierra es muy usado pero limitado, en realidad los efectos elásticos probablemente se encuentren en la información obtenida, incluyendo ondas de corte, ondas convertidas de modo, y amplitudes de reflexión no acústica. La simulación no predecirá esos eventos y el procesamiento acústico los evidenciará de una manera no apropiada. Para asestar correctamente con los efectos elásticos, se debe usar un *modelo elástico*".

"Un material elástico puede ser un sólido como el acero, vidrio o las rocas. Los materiales elásticos pueden ser simples o muy complicados. Los simples necesitan pocos parámetros y los complicados necesitan muchos parámetros, siendo los medios elásticos e isotrópicos los más simples. Como fue mencionado, los materiales acústicos involucran dos parámetros y un tipo de onda, mientras que para el caso isotrópico y elástico existen tres parámetros y dos tipos de onda. Para conveniencia, se usarán solamente la velocidad de la onda P (v_p), la velocidad de la onda S (v_s), y la densidad de masa (ρ) como los tres parámetros; sin embargo, existe una larga historia de elasticidad isotrópica donde existen otros parámetros como la relación de Poisson σ , el Módulo de Young E, el parámetro de Lamé λ , la rigidez μ , etc. Una onda S (de corte, transversal o secundaria) tiene movimiento de la partícula perpendicular a la dirección de propagación".

(LINER, 1999)

2.1.2. <u>Ecuación de la Onda en Medios Elásticos, Isotrópicos y Homogéneos:</u> Solución para Ondas Esféricas

"Este tipo de aproximación se caracteriza por una serie de frentes de onda de tipo esférico, concéntricas, para un medio isotrópico y homogéneo; en el cual las ondas se propagan en forma esférica (Figura 4). La ecuación de onda, en coordenadas esféricas viene expresada de la siguiente manera:"

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r^2 \partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{sen\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(sen\theta \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{sen^2\theta} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \omega} \right\}$$
(2.1)

donde c = tensor de parámetros elásticos y θ , ω son ángulos medidos desde Z y Y respectivamente.

Considerando el caso donde el movimiento es independiente del ángulo, dependiendo solo de la distancia radial se puede simplificar esta ecuación en:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r^2 \partial \phi}{\partial r} \right) \right\}$$
(2.2)

cuya solución es del tipo:

$$\phi = \frac{1}{r}q(r-ct) \tag{2.3}$$

donde q(t) es la función de perturbación.

"La solución representa una onda esférica que se propaga simétricamente desde el origen y es atenuada en proporción a la distancia recorrida *r*. El movimiento de la partícula es paralelo a la dirección de propagación y perpendicular al frente de onda".

"Asumiendo una ecuación de onda de tipo elástica, para la onda de corte que también es generada, se tiene un frente de onda esférico donde el movimiento de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación y paralelo a este frente de onda".

(LAVERGNE, 1989)



Figura 4. Propagación de un Frente de Onda de Tipo Esférico y Concéntrico

"La propagación de una perturbación, originada de alguna forma en un punto particular, a través de un medio, está expresada por el desplazamiento potencial ϕ desde la posición inicial. Esta representación de la forma del paquete de ondas puede ser expresada como una función de la distancia y el tiempo:"

$$\phi(\mathbf{r},\mathbf{t}) = A(r)\phi\left(t - \frac{r}{c}\right)$$
(2.4)

"La forma de la onda ϕ está relacionada con el esfuerzo introducido que causa la perturbación, y A(r) es un factor relacionado a la forma como el medio permite propagar la onda; puesto que el movimiento desde la posición inicial es una característica necesaria del movimiento de la onda, la energía inicial creada por esta onda se esparce con la misma. Para ciertos casos es posible asignar una forma aproximada a la función A(r), en el cuerpo de un líquido homogéneo, por ejemplo, la onda es generada con energía total E_0 que se distribuye sobre

la superficie de una onda esférica (área de superficie $4\pi r^2$). La energía por unidad de área es por lo tanto $E_0/4\pi r^2$, siendo esta densidad de energía proporcional al cuadrado de la amplitud:"

$$\frac{E_0}{4\pi r^2} = k |A(r)|^2$$
(2.5)

$$A(r) = \left(\frac{E_0}{4\pi r^2 k}\right)^{1/2} = \frac{A_0}{r}$$
(2.6)

Para una onda que diverge esféricamente (2.4) se puede escribir como

$$\phi(\mathbf{r},\mathbf{t}) = \frac{A_0}{r} \phi\left(t - \frac{r}{c}\right) \qquad (2.7)$$

y las amplitudes de todos los puntos sobre el paquete de ondas decrecen como el inverso de la distancia desde la fuente.

(WATERS, 1981)

2.2. EL MODELO DE LA FUENTE DE EXPLOSIVOS (DINAMITA)

Según NALSEN (1986) "una de las características más relevantes en el uso de explosivos en huecos, es la variación en la cantidad de energía emitida dependiendo de la litología en el entorno de la explosión. Durante la explosión en hueco, la energía se transforma en deformación elástica y deformación inelástica del área alrededor de la carga (Figura 5), siendo los porcentajes de esta transformación y de la transmisión variantes dependiendo del tipo de roca y el empaquetamiento de la carga". Esta afirmación del autor tiene como base el estudio de fuentes de energía realizado por la Universidad de Minas de Colorado según el cual se observa mayor cantidad de energía

cuando se dispara en lutitas, ya que en ellas la deformación es más elástica y por lo tanto se pierde menos energía en la fricción de las partículas durante la detonación; en comparación con las detonaciones efectuadas en arenas o conglomerados, cuyo porcentaje influye en la deformación elástica y / o inelástica del material en el entorno de la carga, es decir, que si la deformación llega a ser inelástica la transmisión efectiva de la energía será menor por perderse parte de la misma en la ruptura del material. En el caso de la dinamita es conocido que la señal generada varía con la masa de la carga y con el medio en el cual ésta es colocada.



Figura 5. Explosión de Dinamita (Medio Homogéneo)

Tomado de NALSEN (1986)

De acuerdo NALSEN (1986), en relación a la masa de la carga y su efecto, se puede acotar:

- a) La duración del pulso es proporcional a la masa elevada a 1/3.
- b) La amplitud del pulso es proporcional a la masa de la carga elevada a la 2/3.
- c) La energía total producida es directamente proporcional a la masa de la carga.
 Generalmente, energía entre 10 80 Hz es proporcional al cuadrado de la carga.
- d) La relación señal / ruido aumenta con el número de huecos disparados y es menor cuando se dispara un hueco varias veces. Por ejemplo:
 - 8 hoyos, 1 Kg.: 8 Señal + 1 Ruido S / N = 8 / 1 = 8
 - 1 hoyo, 8 Kg.: $(8)^{2/3}$ Señal + 1 Ruido S / N = 4 / 1 = 4
 - 1 hoyo, 1 Kg.: 8 veces: 8 Señal + $\sqrt{8}$ Ruido S / N = 8 / $\sqrt{8} = \sqrt{8}$

De acuerdo con ZIOLKOWSKI (1993) "la respuesta de la tierra al impulso de presión de alta amplitud es no lineal, pero los efectos no lineales están confinados a una región muy cercana a la fuente. El medio alrededor de la fuente puede ser dividido, como fue mencionado anteriormente, en esta zona interna no lineal, en la que el límite elástico del material es superado, y una zona externa lineal en la que se asume que la Ley de Hooke se cumple; el tamaño de la zona inelástica es pequeño comparado con la aún más pequeña longitud la onda compresional". Por lo tanto, la tendencia aceptada para el modelaje de la dinamita, es asumir una fuente esférica de radio a, en un medio elástico, isotrópico, homogéneo e infinito (por ejemplo: SHARPE,1944; O' BRIEN, 1957; ZIOLKOWSKI, 1993), como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Modelo para la Fuente Explosiva

Tomado de ZIOLKOWSKI (1993)

En la parte interior de la esfera cercana a la carga que representa la zona de deformación inelástica del material, las temperaturas y presiones generadas por la explosión son intensas, y la exterior que representa la zona lineal elástica es donde la onda esférica se propaga. En este modelo solo el campo incidente ha sido considerado, el efecto que las dispersiones entre la tierra y la superficie podrían tener en la forma como la fuente se comporta es ignorado. Dentro de la zona elástica lineal, en distancias radiales, existe una simetría alrededor de un origen en el centro de la fuente, y todas las variables del campo dependen solo de la distancia radial r y el tiempo t.

(ZIOLKOWSKI, 1993)

2.3. COMPORTAMIENTO DE LA AMPLITUD CON LA RADIACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS DESDE UNA FUENTE PUNTUAL (EXPLOSIVA)

Son diversos los factores que afectan la amplitud, la fase y la energía de las ondas sísmicas. Muchos de esos factores no involucran el subsuelo de la Tierra (Figura 7). De acuerdo con ZIOLKOWSKI (1993), la amplitud de la onda radiada desde la fuente decrece en la zona inelástica mediante tres procesos: por deformación permanente del material, por conversión del trabajo en calor (absorción), y por divergencia esférica. En alguna distancia de la explosión la amplitud de la onda decrece hasta el punto donde los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material. Más allá de este punto donde la propagación es elástica (campo lejano), los factores que pueden afectar las amplitudes se clasifican dentro de las categorías: divergencia esférica, dispersiones, y otros (transmisión, etc).



Figura 7. Factores que afectan la Amplitud

2.3.1. Divergencia Esférica:

Según SHERIFF(1978) "la densidad de energía de una onda sísmica decrece como esta se desplaza hacia el interior de la Tierra, por ello la divergencia esférica o atenuación geométrica se define como el decrecimiento de la energía por unidad de área del frente de ondas en función de la distancia, durante la propagación (Figura 8). La energía de las ondas, es proporcional al cuadrado de la amplitud; así cuando una onda se propaga en forma esférica desde su origen, la densidad de energía decrece inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que el frente de onda ha viajado, asumiendo medios de velocidad constante. En el caso de la Tierra, en donde la velocidad incrementa con la profundidad, el problema de atenuación es más crítico, ya que la curvatura del rayo causa que la densidad de energía disminuya aun más rápido. La tasa de amplitud cambia para reflexiones múltiples y primarias, pero diferirá un poco debido a que la curvatura depende de las variaciones de la velocidad".

Las perdidas de amplitud debido a divergencia esférica del frente de onda están resumidas en la Tabla I. "Para el caso en el que la onda diverge esféricamente (2.7), las amplitudes de todos los puntos del paquete de onda se atenúan como el inverso de la distancia desde la fuente, por ejemplo la onda directa; en el caso de un esparcimiento de la onda sobre una superfície, la amplitud de la onda disminuye inversamente en proporción a la raíz cuadrada de la distancia, por ejemplo la onda refractada. Debido a que la raíz cuadrada inversa de los números positivos decrece más lentamente que estos mismos números inversos cuando se incrementan, las ondas confinadas a una superfície plana (ondas de superfície por ejemplo) decaen en amplitud más lentamente con respecto a la distancia que recorren aquellas propagadas dentro del cuerpo de un material (ondas de volumen)".



Figura 8. Divergencia Esférica: Atenuación por debajo de Amplitud Normalizada.

Tomado de NALSEN(1986)

LLEGADA (TIPO DE ONDA)	DECAIMIENTO GEOMÉTRICO DE LA AMPLITUD
P directa	1/r
S directa	1/r
Aire	1/r
Rayleigh	$1/\sqrt{r}$ (Onda 2D)
P reflejada	1/r
S reflejada	1/r

TABLA I: PERDIDAS DE AMPLITUD POR DIVERGENCIA ESFÉRICA

Donde r = vt

2.3.2. Dispersiones:

Según LINER (1999) "en medios acústicos solo un tipo de onda es posible: una onda sónica. Por ello las dispersiones de una onda sónica pueden solamente resultar en reflexión y transmisión de ondas sónicas; para un sólido dos tipos de ondas corpóreas tienen la propiedad para esto: P y S. En general, cuando una onda de uno de estos tipos golpea una interfase, esta da un ascenso de ondas dispersas de ambos tipos. Eso es, una onda P golpeando una interfase puede generar reflexiones y transmitir ondas P y S, proceso este denominado conversión de modo".

2.3.3. Absorción:

De acuerdo con LAVERGNE(1989), "si el medio no es perfectamente elástico, lo que frecuentemente es el caso del subsuelo, la onda sísmica experimenta alguna disipación: parte de la energía sísmica es convertida en calor". Por ello, según NALSEN (1986), la absorción se define como "el mecanismo mediante el cual la energía se pierde, convertida irreversiblemente en calor, por la fricción interna en las rocas cuando el frente de onda se propaga a través del subsuelo".

Para SHERIFF (1978) "la perdida de energía en la tierra debido a la absorción puede ser descrita de varias maneras: mediante un factor llamado "Q" (factor de calidad), que es la cantidad de energía medida de una ondícula en el campo cercano comparada con la cantidad de energía disipada en un ciclo; por un coeficiente de absorción el cual es un factor de decaimiento exponencial; y por un decremento logarítmico, una medida del cambio de amplitud entre dos ciclos sucesivos".

Esta pérdida de energía en una onda sísmica, usualmente atribuida a la inelasticidad, es representada de una forma más conveniente por el factor Q adimensional definido mediante:

$$\frac{2\pi}{Q} = -\frac{\Delta E}{E} \tag{2.8}$$

donde $-\Delta E$ es la pérdida de energía por ciclo y E es la máxima energía. Esta ecuación (2.8) puede ser generalizada sin dificultad para ajustarse a valores arbitrariamente pequeños de Q por conversión a la forma diferencial:

$$-\frac{2\pi}{Q} = \frac{dE}{E} \cdot \frac{T}{dt} = \frac{T}{E} \cdot \frac{dE}{dt}$$
(2.9)

donde T es el período de la onda. La ecuación (2.9) puede ser integrada de manera que:

$$E = E_o e^{-\left(\frac{2\pi i}{QT}\right)} \tag{2.10}$$

Usualmente la amplitud *A* es medida, y debido a que la energía es proporcional al cuadrado de la amplitud, la ecuación (2.10) puede ser modificada de la siguiente forma:

$$A = E^{1/2}$$

$$= E_o^{1/2} e^{-\left(\frac{2\pi i}{QT}\right)^{1/2}}$$

$$A = A_o e^{-\left(\frac{\pi i}{QT}\right)}$$

$$= A_o e^{-\left(\frac{\pi x}{Q\lambda}\right)}$$

$$= A_o e^{-\alpha x} \qquad (2.11)$$
donde x es la distancia viajada, λ es la longitud de onda y α es el coeficiente de absorción dado por

$$\alpha = \pi / Q\lambda$$

" La existencia de la absorción o atenuación inelástica aumenta el número de puntos de discusión. El primero concerniente a que si asume el precepto de que la elasticidad de la roca es lineal, es decir la deformación es proporcional al esfuerzo. El segundo concerniente a la precisión de las observaciones empíricas en el hecho de que la velocidad sísmica y el parámetro Q sean independientes de la frecuencia. A pesar de que esto es objeto de investigación, y de que la absorción está relacionada a la frecuencia de las ondas sísmicas como una regla, ya que a mayor frecuencia aumenta la absorción, en la mayoría de las aplicaciones para exploración se asume que la absorción y la velocidad sísmica son esencialmente independientes de la frecuencia".

(DERECKE, 1986)

2.3.4. Transmisión:

Las pérdidas por transmisión son inherentes al proceso de reflexión y refracción. De acuerdo con NALSEN (1986) "cuando una onda P (que se está propagando), incide en un reflector (interfase de contraste acústico), parte de esta onda es reflejada y parte es transmitida a las capas infrayacentes, implicando esto que la onda que continúa hacia abajo pierda energía". Ya, AKI y RICHARDS (1980) han calculado los coeficientes de transmisión en función del ángulo de incidencia. En realidad, el coeficiente de transmisión depende del ángulo de incidencia, de las velocidades de cizallamiento y compresionales, y de las densidades. Si se establece el coeficiente de reflexión de una capa como:

$$R_{12} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \tag{2.12}$$

entonces

$$A_{RE} = A_1 R_{12} = A_1 \left(\frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \right)$$
(2.13)

$$A_{T} = A_{1}(1 - R_{12}) = A_{1}\left(\frac{2\rho_{1}V_{1}}{\rho_{2}V_{2} + \rho_{1}V_{1}}\right)$$
(2.14)

siendo:

 A_1 = Amplitud incidente A_{RE} = Amplitud reflejada A_T = Amplitud transmitida R_{12} = Coeficiente de reflexión entre medios 1 y 2 ρ_2 , ρ_1 =Densidades V_2 , V_1 = Velocidades

Si se supone $A_1 = 1$, entonces la suma de A_{RE} y A_T siempre serán igual a la unidad.

Según NALSEN (1986) " la distribución de las capas y sus espesores afectan la partición de energía. Así, por ejemplo, en el caso de existir muchas capas con espesores mayores que la longitud de onda del pulso emitido, el mecanismo de partición sólo afecta la amplitud en forma directamente proporcional a la magnitud del coeficiente de reflexión. En el caso de espesores

menores a la longitud de onda, se involucra el proceso de interferencia (constructiva, o destructiva) que afecta a la amplitud, la fase y la banda de frecuencia del pulso".

2.4. RELACIÓN ENTRE LA AMPLITUD SÍSMICA Y EL TAMAÑO DE LA CARGA:

"Se ha sugerido, a partir de estudios y observaciones de la relación amplitud y peso de la carga, que la amplitud del movimiento terrestre de la onda refractada es aproximadamente proporcional al peso de la carga, a pesar de que simples consideraciones energéticas habrían conducido a esperar una relación según la cual la amplitud fuese proporcional a la raíz cuadrada de la carga (\sqrt{W}), debido a que la energía es proporcional al cuadrado de la velocidad en la tierra y al peso del explosivo" (GASKEL, 1956). Una posible razón para esto podría ser encontrada si la explosión es imaginada como un radiador de energía equivalente o fuente esférica de radio a (SHARPE,1944; O'BRIEN, 1957; ZIOLKOWSKI, 1993). El tamaño de las fuentes explosivas es muy pequeño comparado con la longitud de onda, y por eso la eficiencia de la radiación será aproximadamente proporcional al tamaño de la carga; siendo este tamaño determinado por la distancia desde el centro de la explosión en la cual la onda de presión generada por la misma cesa, debido a la deformación permanente del medio alrededor de la explosión. Ha sido mostrado experimentalmente en SIXTA (1982), entre otros, "que la energía elástica radiada es proporcional a la masa de la carga del explosivo si el medio en el cual este es colocado es constante; siendo la energía absorbida por este medio también proporcional a la masa de la carga".

3. MÉTODO PARA ESTIMAR EL FACTOR DE AMPLITUD (K) ASOCIADO AL DISPARO O EXPLOSIÓN EN EL PUNTO DE TIRO A PARTIR DE DATOS DE SÍSMICA DE SUPERFICIE

3.1. EXTRACCIÓN DE AMPLITUDES A PARTIR DE LA ONDA DIRECTA

Para iniciar el desarrollo del método a utilizar en la estimación del factor de amplitud (K) asociado a la explosión en el punto de ubicación de la carga, mediante el uso del programa de procesamiento sísmico PROMAX 2D se cargó previamente la información de una línea sísmica para realizar el picado en cada traza de los primeros quiebres correspondientes a la onda directa; y así generar archivos de salida en formato ASCII por disparo con información de tiempo y distancia.

Como paso seguido se procede a la extracción de las amplitudes de la onda directa, y para ello se generó una rutina en Matlab[®] que permite a partir de los valores de tiempo y distancia, obtenidos anteriormente, extraer estas amplitudes de los datos sísmicos mediante dos diferentes formas: una tomando la amplitud en el tiempo donde se realizó el picado, y la otra tomando el promedio al cuadrado de las amplitudes en una ventana de tiempo de diez valores centrada en ese tiempo seleccionado (energía de la ondícula). Ejemplos de las amplitudes extraídas con ambos métodos se muestran en las Figuras 9 y 10, donde se puede observar que el comportamiento de los valores obtenidos es similar.



Figura 9. Gráfico de las amplitudes de la Onda Directa contra la distancia



Figura 10. Gráfico de la energía de la Onda Directa contra la distancia

3.2. ESTABLECIMIENTO DEL MODELO DE AJUSTE LINEAL PARA EL COMPORTAMIENTO DE LA AMPLITUD DE LA ONDA SÍSMICA VERSUS LA DISTANCIA EN LA ZONA CERCANA A LA CARGA

Para efectos de simplificación al momento de estimar el factor de amplitud (K) en el punto donde se realiza la explosión, del conjunto de elementos que afectan la amplitud, sólo se toma en cuenta la divergencia esférica; ya que el modelo de tierra en la cercanía a la carga se supondrá homogéneo y elástico en donde no ocurre absorción, existiendo solo un efecto de atenuación geométrica con la distancia. Como se definió en la Figura 8 de la sección 2.3.1. se plantea que existe una amplitud A_0 asociada al campo cercano en el punto donde se coloca la carga, definido este por el radio r_o; y una amplitud A_r asociada al campo lejano hasta una distancia máxima r_m (ver Figura 11).



Figura 11. Modelo de tierra en la cercanía de la carga

El comportamiento de esta amplitud A_r esta dado como una función del inverso de la distancia r a medida que se avance hacia r_m , NALSEN (1986):

$$A_r = \frac{A_0}{r} \tag{3.1}$$

Con la finalidad de realizar un ajuste lineal a los datos experimentales basado en la expresión (3.1), se expresa la misma de la forma siguiente:

Se toma el módulo al cuadrado de ambos miembros a cada lado de la igualdad

$$\left|A_{r}\right|^{2} = \left|\frac{A_{0}}{r}\right|^{2} \tag{3.2}$$

Luego se aplica el logaritmo en base 10 y se multiplica ambos lados de la igualdad por 10, por lo que se llega a:

$$10\log_{10}(A_r)^2 = 10\log_{10}\left(\frac{A_0}{r}\right)^2$$
(3.3)

$$20\log_{10}(A_r) = 20(\log_{10} A_0 - \log_{10} r)$$
(3.4)

$$20\log_{10}(A_r) = 20\log_{10}A_0 - 20\log_{10}r \tag{3.5}$$

$$A_R = X_0 - 20X \tag{3.6}$$

donde $X = \log_{10} r$, $X_0 = 20 \log_{10} A_0$ y $A_R = 20 \log_{10}(A_r)$; A_r es la amplitud seleccionada y (3.6) representa la ecuación de la línea recta en *X*, ver Figura 8.

Como puede observarse en el término X_0 se encuentra la amplitud A_0 del campo que aproxima la amplitud en el punto donde se coloca la carga. De forma que de la expresión:

$$X_{0} = 20 \log_{10} A_{0}$$

$$X_{0} = 20 \frac{\ln A_{0}}{\ln 10}$$
(3.7)

$$e^{\frac{Xo(\ln 10)}{20}} = e^{\ln Xo}$$

se obtiene una relación que permite estimar A_0 , es decir el factor de amplitud (K) en el punto de ubicación del explosivo:

$$A_0 = e^{\frac{\ln 10}{20}X_0}$$
(3.8)

Al calcularse y graficarse las amplitudes A_R y los logaritmos en base 10 de las distancias (*X*), con los datos experimentales de prueba de amplitud de onda directa y su posición, la tendencia a alinearse permite el ajuste de un polinomio de primer grado mediante el método de regresión de los mínimos cuadrados, y así la estimación con (3.8) de los factores de amplitud (K). Gráficos con ejemplos para dos disparos de campo, correspondientes a las amplitudes A_R contra el logaritmo en base 10 de las distancias (*X*) y su respectivo ajuste lineal se presenta a continuación, puede observarse en la Figura 12 que se presenta a continuación:



Figura 12. Amplitud A_R como función del logaritmo de la distancia (r_o=?, r_m=?): (a) ejemplo con disparo de campo 1, (b) ejemplo con disparo de campo 2.

3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE AMPLITUD (K) CON DATOS SÍSMICOS SINTÉTICOS

Para verificar la efectividad del método establecido para estimar el factor de amplitud (K) en el punto de ubicación de la carga al momento de la explosión, se generaron en primer lugar con el programa ANISO2D (ETGEN,1988), que trabaja por diferencias finitas para simular la propagación del campo de onda completo en medios elásticos e isótropos, dos disparos sintéticos, correspondientes a un modelo de una sola capa homogénea e isotrópica. El disparo 1 ó base fue generado con un factor de amplificación 1.0 para la fuente, dentro de la rutina que define la forma de la fuente dentro del programa ANISO2D. El disparo 2 a su vez fue generado de igual manera con un factor de amplificación 0.6. Los gráficos obtenidos de los dos disparos sintéticos referidos con sus respectivos picados de tiempo de la llegada directa se pueden observar en las figuras 13 y 14.



Figura 13. Disparo sintético 1 (base) con el factor de amplificación 1.0. En azul se muestra el picado de los tiempos sobre la llegada directa.



Figura 14. Disparo sintético 2 con el factor de amplificación 0.6. En azul se muestra el picado de los tiempos sobre la llegada directa.

Posteriormente, se grafican los valores obtenidos de amplitud de ambos disparos sintéticos en función de la distancia (Figuras 15 y 16). Los ajustes realizados para determinar los factores "K" de amplitud (A_0) para ambos disparos sintéticos, pueden ser observados en los gráficos de las figuras 17 y 18. Con la finalidad de verificar la efectividad del método de estimación utilizado para obtener el factor de amplificación usado asociado a la fuente (K = 0.6), se tomó el cociente entre el K obtenido para el disparo 2 y el obtenido para el disparo 1 o base. Este cociente arrojó un valor de K igual a 0.6713. Como se muestra el disparo base fue utilizado para normalizar el cálculo.



Figura 15. Amplitud de la Onda Directa versus la distancia: Disparo 1 - Factor de amplificación 1.0



Figura 16. Amplitud de la Onda Directa versus la distancia: Disparo 2 - Factor de amplificación 0.6



Figura 17. Ajuste lineal de las amplitudes A_R para el disparo 1 y estimación del factor de amplificación A_0 (K)



Figura 18. Ajuste lineal de las amplitudes A_R para el disparo 2 y estimación del factor de amplificación A_0 (K)

CAPÍTULO IV

4. GEOLOGÍA REGIONAL

4.1. GEOLOGÍA DE SUPERFICIE:

Durante el proceso de identificación y evaluación de las áreas de oportunidad exploratoria, P.D.V.S.A. realizó un estudio de geología de superficie en una extensa zona que abarca desde el área de Guanape / Sabana de Uchire, por el oeste, hasta la región de Urica en la Serranía del Interior, por el este; con la finalidad de preparar un mapa georeferenciado detallado, para visualizar las relaciones tectónicas presentes en esa región de la Cordillera de la Costa, la Serranía del Interior y la cuenca molásica. Los dominios tectónicos evidenciados más resaltantes desde el este al oeste, son:

- De acuerdo con VIVAS (1987), "el sistema de la Serranía del Interior para-autóctono, a su vez compuesto por el dominio Bergatín – Guanta; y según Aguasuelos (1991), el subdominio de Pirital. Desde el punto de vista estructural, la Serranía del Interior muestra un conjunto de pliegues y corrimientos de rumbo N60/N80° E, que afectan la cobertura sedimentaria de edad Cretácico Inferior a Mioceno Inferior".
- "El dominio de la Sub-cuenca de Maturín, autóctono, ubicado al sur-sureste de la Serranía del Interior, que corresponde a la antefosa molásica".
- "El dominio septentrional de la Sub-cuenca de Guárico, autóctono, correspondiente a un relleno molásico oligo-mioceno, cuyos espesores aumentan hacia el este".

- "El dominio oriental de la Cordillera de la Costa, tectónicamente separado desde el noroeste hacia el sureste", en:
 - Según BECK(1977), "la Napa Piemontina alóctona, que representa una sucesión de escamas compuestas de flysch Paleoceno – Eoceno, con un subestrato Cretácico".
 - Según PIERSON(1965), "el Complejo Chacual y la faja volcada para-autóctona, reagrupada como Escamas frontales. Las Escamas frontales corresponden a la parte oriental de la zona de la Cordillera de la Costa, a un anticlinal volcado y cizallado por varias escamas. La serie estratigráfica en esta región es muy semejante a la de la Serranía del Interior".

"En una zona alrededor del área de oportunidad exploratoria destacada de Capiricual, la interpretación estructural y tectono – secuencial de líneas sísmicas e información de pozo fue calibrada con la información obtenida en la geología de superficie; adicionalmente se elaboró una columna compuesta de la Sección del río Capiricual levantada por Servigeomin (1998) debido a su cercanía con una líneas sísmicas, ver figuras 19 y 20. Columna geológica similar a la que podría estar presente en el área de oportunidad exploratoria de Capiricual, con la descripción litológica y la edad de cada una de las formaciones que afloran en la sección del río Capiricual".



Figura 19. Mapa de ubicación de la Línea Sísmica cercana a la Sección del río Capiricual donde se elaboró la Columna Compuesta

Tomado de PDVSA PROJECT NET (2000)



Figura 20. Columna Compuesta de la Sección del río Capiricual

Tomado de PDVSA PROJECT NET (2000)

4.2. MARCO TECTÓNICO REGIONAL

"La Cadena Caribe se extiende por más de 1000 Km, desde las estribaciones meridionales de los Andes merideños, al oeste, hasta la parte septentrional de la isla de Trinidad, hacia el este. Esta cadena está compuesta de un apilamiento de napas de origen ígneo- metamórfico, las cuales fueron emplazadas progresivamente sobre el margen pasivo de Suramérica, del oeste hacia el este, desde el Paleoceno. El contacto entre las rocas alóctonas y las autóctonas en el flanco norte de la Cuenca Oriental de Venezuela se realiza a través de la faja volcada, a lo largo de la cual rocas de edad Cretácico Superior – Paleoceno, del Flysch de Guárico, sobrecorren a rocas oligomiocenas pertenecientes a la megasecuencia del "foredeep", conocidas en superficie como formaciones Roblecito, Naricual, Quebradón y Quiamare (secuencias FA + FB). Es a lo largo de esta franja que se define el Corrimiento Frontal de la Cadena Caribe".

"Hacia la Ensenada de Barcelona, la Cadena Caribe se hunde por debajo de los sedimentos neógenos y reaparece en la región de Araya – Paria. La Cadena Caribe parece estar desplazada dextralmente unos 60 Km por la falla de San Sebastián - El Pilar, la cual podría haber comenzado a funcionar como falla dextral a partir del Mioceno Tardío. Por su parte, la Serranía del Interior está compuesta básicamente de rocas cretáceas y terciarias (secuencias MP y FA + FB) pertenecientes, tanto al margen pasivo suraméricano como al foreland terciario, desarrollado durante la evolución posterior a dicha cuenca".

"El límite occidental de la Serranía del Interior está controlado por el sistema de rampas laterales de Urica, denominado Sistema de Fallas de Urica, el cual continúa hacia el sur a través de la rampa frontal de Pirital. De acuerdo con BELLIZIA <u>et al</u>. (1976), hacia el este la serranía desaparece progresivamente por debajo de los sedimentos pliocenos de los grábenes de San Juan

y Bohordal. Inmediatamente al sur de la rampa frontal de Pirital existe una franja de diapiros arcillosos, la cual se extiende por más de 200 Km, desde las cercanías de Musipán, al oeste, hasta las costas meridionales de Trinidad, al este. En algunas áreas puede manifestarse en superficie a manera de volcanes de barro, como en Pedernales, en la extremidad norte del delta del Orinoco. Las deformaciones extensionales asociadas a los grabenes plio – pleistocenos parecen estar relacionadas con la actividad diapírica y actúan como colapsos gravitacionales originados por la removilización de las arcillas involucradas, las cuales han sido correlacionadas con la Formación Carapita, de edad Mioceno Temprano".

"En el área estudiada se han identificado elementos compresivos mayores, varios de ellos son conocidos y han sido cartografiados desde los inicios de la exploración geológica. Entre los elementos compresivos, destacan: el sistema de rampas laterales de Urica y los corrimientos de Mundo Nuevo, Pirital y Tala, ver figura 21. El sinclinal de Clarines, así como los anticlinales de Quiamare, Cerro Pelado y La Ceiba, son rasgos tectónicos mayores que han sido identificados tanto en la superfície como a partir de las interpretaciones de imágenes sísmicas 2D".

" La existencia de zonas triangulares por debajo del Corrimiento Frontal ha sido puesta en evidencia al interpretar diversas secciones sísmicas. La edad de las mismas parece estar asociada al Mioceno Medio (15 – 10 ma) y son más antiguas que las fallas normales de la Ensenada de Barcelona. Hacia la Serranía del Interior también se han interpretado zonas triangulares. Otro rasgo tectónico mayor del área es el graben de Espino, delimitado al norte por la falla normal de Guama – Sabán y al Sur por la falla invertida de Anaco. Dicho graben tiene un ancho máximo de unos 100 Km, con una orientación aproximada noreste- suroeste y podría continuar hacia el norte, por la parte oeste de la Serranía del Interior".



Figura 21. Marco Tectónico Regional

Tomado de PDVSA PROJECT NET (2000)

"En la Ensenada de Barcelona, de acuerdo con BLANCO y GIRALDO (1993), fueron llevados a cabo diversos estudios durante las décadas de los 80 – 90, y demostraron la existencia de fallas normales de ángulo alto de edad Mioceno tardío – Plioceno. Estas fallas podrían interpretarse como colapsos gravitacionales ocurridos posteriormente al levantamiento de la Cadena del Caribe, durante el Mioceno Medio. De esta forma, se puede interpretar la existencia de un graben de orientación noroeste – sureste, limitado al sur, por la falla de la Costa y, al norte, por otras fallas subparalelas buzando al sur, anteriormente interpretadas como continuación del sistema de fallas de Urica. Al este, la falla de la Costa parece desaparecer, por lo que solo se observan las fallas normales inclinadas al sur". (PDVSA PROJECT NET, 2001)

5. APLICACIÓN DEL MÉTODO A DATOS REALES PARA LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE AMPLITUD (K)

5.1. GENERALIDADES:

Para la aplicación del método se utilizaron datos reales adquiridos en una línea de prueba 2D levantada en la zona alrededor del poblado de Capiricual, ubicado dentro de una de las áreas de oportunidad exploratoria al norte del estado Anzoátegui en la región oriental de Venezuela, y que lleva el mismo nombre. El Proyecto Capiricual consiste de un mallado regional que con un total de 348,200 kilómetros de líneas sísmicas cubre un área de 1266 Km² en superficie distribuidos, como fue mencionado anteriormente, en las jurisdicciones de los Municipios Bolívar, Sotillo y Libertad del mencionado estado. El objetivo principal de la adquisición de esta línea de prueba, dentro del Proyecto Capiricual, fue conocer las características de respuesta del terreno, evaluar el comportamiento de los datos como función de la separación fuente - receptor (offset), y confirmar el patrón carga / profundidad y número de pozos a utilizarse por estaca de disparo en la parte norte del proyecto.

La línea de prueba con una longitud total de 20.5 Km, que fue seleccionada dentro de un conjunto de trece (13) líneas sísmicas correspondientes al levantamiento (Figura 22), se caracterizó por estar dividida de norte a sur en dos secciones: la primera en la zona norte y con 14 Km de longitud, se denominó "línea prioritaria", comprendida entre los puntos de tiro (estacas) 1000 a 1560, y la segunda en la zona sur como parte del programa normal del proyecto, comprendida entre los puntos de tiro (estacas) 1561 a 1820 (Figura 23). El tipo de fuente



usado fue dinamita, con carga y profundidad variables (7 patrones de fuentes diferentes) en la parte de prueba, y con patrón único en la zona sur. El arreglo de receptores fue de doce



Figura 23. Croquis de la Línea de Prueba donde se muestra la línea prioritaria (en verde) y la parte del programa normal del proyecto (en rojo)

geófonos regados en la dirección de la línea, distribuidos simétricamente desde las estacas separadas 25 metros entre ellas (Figura 24).



Figura 24. Se muestra el arreglo de receptores usados en el levantamiento

Para el arreglo de fuente en la "línea prioritaria" se perforaron, como fue mencionado, varios patrones: P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7. La distancia entre las 561 estacas de disparo para esta línea fue de 25 metros, colocándose en las estacas impares el patrón 2 (P2) y en las pares el patrón 1 (P1) y el patrón 3 (P3). También se colocaron distribuidos en cinco estacas diferentes a lo largo de la línea los patrones especiales 4 (P4), 5 (P5), 6 (P6) y 7 (P7), ver Figura 25. En total se grabaron 279 disparos con el patrón 1 (P1), 278 disparos con el patrón 2 (P2) y 279 disparos con el patrón 3 (P3). Los primeros 281 disparos (1000 – 1280) se registraron con un tendido fijo de 561 canales vivos (1000 – 1560), los siguientes 280 disparos se realizaron con el tendido fijo en la estaca receptora 1000 y un movimiento (roll) de un canal por disparo, terminando de esta manera el último disparo (1560) con 821 canales vivos (1000 – 1820).

El intervalo en la zona sur de la línea (desde la estaca 1561 en adelante) fue de 50 metros, colocando el patrón 2 (P2) en las estacas impares; esto es cada dos estacas. El formato de grabación fue SEG –D con un muestreo de 2 ms y una longitud de registro de 8 segundos.



Figura 25. Arreglo de fuentes utilizado en el levantamiento

5.2. PATRÓN DE PERFORACIÓN 1 (P1): 3 POZOS, 3 METROS DE PROFUNDIDADY 0.5 Kg. DE CARGA (TOTAL 1.5 Kg.)

5.2.1. Línea de Prueba:

Como parte del programa de pruebas experimentales realizado en los primeros 14 kilómetros del extremo norte de la Línea de Prueba (prioritaria) entre las estacas 1000 a 1560, en las pares perforadas cada 50 metros se utilizó en primer lugar el patrón P1 como puede ser visto en el diagrama de disparo que se presenta a continuación (Figura 26):



Figura 26. Diagrama de Disparo Patrón 1 (P1)

Tomado de Iriza (2001)

De acuerdo con IRIZA(2001), en el Resumen Operacional del Levantamiento Sísmico Capiricual 00G, este patrón de perforación somero generó una pérdida considerable de energía transmitida y excesiva onda superficial.

5.2.1.1. Estimación de K para el patrón de perforación 1 (P1):

Para aplicar el método con este patrón de perforación se seleccionaron veintiocho (28) disparos, con puntos de tiro separados 500 metros en promedio. Despliegues con ejemplos de algunos disparos, tomados de esta parte de la línea, así como los tiempos picados en cada traza de la llegada directa, gráficos de amplitud versus la distancia, logaritmo de la distancia y el respectivo ajuste lineal para estimar "K", se presentan a continuación (Figuras 27, 28,29):



Figura 27. Estimación de K para el disparo FFID 7, patrón 1: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K



Figura 28. Estimación de K para el disparo FFID 63, patrón 1: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K







Figura 29. Estimación de K para el disparo FFID 217, patrón 1: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K

A continuación se presenta un gráfico de los valores de "K" estimados versus la distancia correspondientes a los 28 disparos seleccionados para el patrón de perforación 1 (P1) (Figura 30):



Figura 30. Factores de amplificación K versus la distancia respecto al origen de la Línea de Prueba para el patrón 1

Estos factores "K" y los coeficientes de correlación se presentan en la Tabla II con sus correspondientes puntos de tiro.

ARCHIVO	PUNTO DE TIRO	PUNTO DE TIRO	DISTANCIA	CAMPO LEJANO:	FACTOR K DE	COEFICIENTE DE
FILE (FFID)	ESTACA	EN:		$(r_o - r_m)$	AMPLITUD INICIAL	CORRELACIÓN
7	1000,1		0	25 - 250	2056,5417	0,98809
63	1020,1		500	25 - 250	1721,7545	0,94994
134	1040,1		1000	25 - 250	764,5107	0,92352
183	1060,1		1500	25 - 250	950,5002	0,94019
279	1078,1		1950	25 - 300	1291,5	0,9212
357	1100,1		2500	25 - 250	1230,4075	0,94938
415	1120,1		3000	25 - 250	1067,1935	0,9104
56	1142,1		3550	50 - 250	19,0169	0,94329
143	1160,1		4000	25 - 250	2,9425	0,83111
217	1180,1		4500	25 - 250	3661,3377	0,93391
315	1200,1		5000	25 - 250	2575,2853	0,94269
375	1218,1		5450	25 - 300	1008,269	0,86035
444	1240,1		6000	25 - 250	1137,7588	0,95469
493	1256,1		6400	25 - 350	1371,5455	0,94319
251	1280,1		7000	25 - 250	1087,3921	0,93994
38	1300,1		7500	25 - 250	2630,6721	0,91893
508	1320,1		8000	25 - 250	1153,4979	0,9196
552	1340,1	1331,1	8500	25 - 475	1421,547	0,97074
548	1360,1		9000	25 - 250	1166,2712	0,93689
600	1376,1		9400	25 - 275	699,1659	0,95611
675	1398,1		9950	25 - 250	788,6086	0,95496
761	1420,1		10500	25 - 250	530,1343	0,93816
626	1440,1		11000	25 - 250	248,6162	0,94172
819	1460,1		11500	25 - 250	727,0129	0,89467
846	1480,1		12000	25 - 250	602,0919	0,91929
777	1500,1		12500	25 - 250	3473,9028	0,95662
701	1520,1		13000	25 - 250	1911,0548	0,9433
609	1540,1		13500	25 - 250	1195,6762	0,93565

TABLA II: RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ESTIMACIÓN LINEA PRIORITARIA - PATRÓN DE PERFORACIÓN 1

Con el objeto de obtener factores de amplificación (K) en aquellos puntos de tiro que no fueron seleccionados, se realizó una interpolación por medio de ajuste a un polinomio cúbico. A continuación se presentan dos gráficos (Figura 31) correspondientes a los valores de "K" estimados entre los puntos de tiro seleccionados a lo largo de toda la Línea de Prueba (prioritaria) con el patrón de perforación 1 (P1), así como los respectivos valores de "K" normalizados en función de la distancia.



Figura 31. Valores de K estimados a lo largo de la Línea de Prueba (prioritaria) para el patrón 1: a) sin normalizar, b) normalizados

5.3. PATRÓN DE PERFORACIÓN 2 (P2): 1 POZO, 6 METROS DE PROFUNDIDAD Y2 Kg. DE CARGA

5.3.1. Línea de Prueba (prioritaria):

Para esta sección del extremo norte de la línea correspondiente a las pruebas experimentales realizadas a lo largo de los primeros 14 kilómetros (estacas 1000 a 1560), con una separación de 50 metros entre las estacas impares perforadas con el patrón P2 (Figura 32), fueron tomados veintiocho (28) disparos, con puntos de tiro separados 500 metros en promedio.



Figura 32. Diagrama de Disparo Patrón 2 (P2)

Tomado de Iriza (2001)

De acuerdo con IRIZA(2001), en el Resumen Operacional del Levantamiento Sísmico Capiricual 00G, este patrón de perforación presentó una mejora sustancial en la energía efectiva transmitida.

5.3.1.1. Estimación de K para el patrón de perforación 2 (P2):

En las figuras 33, 34 y 35 se presentan algunos ejemplos gráficos de los resultados obtenidos al aplicar el método de estimación del factor "K" para este patrón de perforación.



d) Figura 33. Estimación de K para el disparo FFID 68, patrón 2: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K



Figura 34. Estimación de K para el disparo FFID 136, patrón 2: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K








Figura 35. Estimación de K para el disparo FFID 511, patrón 2: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K

En la Figura 36 se muestran los factores de amplificación (K) estimados versus la distancia desde el origen de la Línea de Prueba (prioritaria), y en la Tabla III sus respectivos valores para 28 disparos seleccionados.



Figura 36. Factores de amplificación K estimados versus la distancia del origen de la Línea de Prueba (prioritaria) para el patrón 2

ARCHIVO	PUNTO DE TIRO	PUNTO DE TIRO	DISTANCIA	CAMPO LEJANO:	FACTOR K DE	COEFICIENTE DE
		RECUPERADO			AMPLITUD	
FILE (FFID)	ESTACA	EN:		$(r_o - r_m)$	INICIAL	CORRELACION
13	1001,2		25	25 - 250	2412,9230	0,91183
68	1021,2		525	25 - 250	1731,9550	0,95482
136	1041,2		1025	25 - 250	1127,4360	0,94648
189	1061,2		1525	25 - 250	1627,1111	0,85724
297	1083,2		2075	25 - 275	1446,9133	0,92176
361	1101,2		2525	25 - 250	2365,8855	0,92005
420	1121,2		3025	25 - 250	1853,4750	0,91709
64	1143,2		3575	25 - 275	88,7738	0,94328
146	1161,2		4025	25 - 250	1549,9592	0,84573
221	1181,2		4525	25 - 250	2651,8495	0,90977
326	1201,2		5025	25 - 250	1027,0940	0,9399
385	1221,2		5525	25 - 250	615,0498	0,95138
449	1241,2		6025	25 - 250	1640,2065	0,96041
313	1259,2		6475	25 - 275	462,4915	0,88276
243	1281,2		7025	25 - 250	1785,7634	0,91263
40	1301,2		7525	25 - 250	1226,7743	0,87779
511	1321,2		8025	25 - 250	1704,5263	0,95823
507	1341,2	1354,2	8850	25 - 300	641,5021	0,92741
559	1361,2		9025	25 - 250	1428,8272	0,91549
607	1383,2		9575	25 - 275	770,1436	0,95082
679	1399,2		9975	25 - 275	1915,7417	0,92538
765	1421,2		10525	25 - 250	1493,9410	0,95314
860	1441,2		11025	25 - 250	401,3982	0,95324
816	1461,2		11525	25 - 250	643,2832	0,96154
845	1481,2		12025	25 - 250	713,6666	0,94831
775	1501,2		12525	25 - 250	1718,1114	0,94754
699	1521,2		13025	25 - 250	344,5224	0,92624
604	1541,2		13525	25 - 250	2396,5794	0,93626

TABLA III: RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ESTIMACIÓN LINEA PRIORITARIA - PATRÓN DE PERFORACIÓN 2

5.3.2. Intervalo en la Zona Sur de la Línea:

Para esta sección sur de la línea correspondiente al programa normal del proyecto (estacas 1561 a 1820), cuya separación entre fuentes fue de 50 metros (Figura 32), se tomaron para la aplicación del método de estimación catorce (14) disparos desplegados a lo largo de estos 6.5 kilómetros restantes, con puntos de tiro separados de igual forma 500 metros en promedio; en esta sección, como fue mencionado anteriormente, también fueron usadas fuentes de dinamita en las estacas impares con el patrón de perforación 2 (P2).

5.3.2.1. Estimación de K para el patrón de perforación 2 (P2):

Las Figuras 37, 38 y 39 muestran ejemplos de la estimación de "K" con este patrón de disparo. En la Figura 40 se muestra un gráfico con los factores de amplificación (K) versus la distancia, obtenidos a partir de los 14 disparos seleccionados en esta zona del programa normal del proyecto, y en la Tabla IV se muestra un resumen con la información obtenida al aplicar el método de estimación a estos disparos.

Por último se presentan dos gráficos (Figuras 41 y 42) correspondientes a los valores de "K" sin normalizar y normalizados respectivamente, en función de la distancia a lo largo de toda la Línea de Prueba (prioritaria e intervalo en la zona sur del programa normal del proyecto); estos factores fueron estimados e interpolados entre los puntos de tiro seleccionados a lo largo de esta línea.









Figura 37. Estimación de K para el disparo FFID 939, patrón 2: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K







d)

Figura 38. Estimación de K para el disparo FFID 956, patrón 2: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K



Figura 39. Estimación de K para el disparo FFID 888, patrón 2: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K



Figura 40. Factores de amplificación K versus la distancia respecto al inicio de la línea correspondiente al intervalo en la zona sur del levantamiento para el patrón 2

PUNTO DE COEFICIENT						COFFICIENTE
ARCHIVO	PUNTO DE TIRO	TIRO	DISTANCIA	CAMPO LEJANO:	FACTOR K DE	DE
		RECUPERADO				,
FILE (FFID)	ESTACA	EN:		$(\mathbf{r}_{o} - \mathbf{r}_{m})$	AMPLITUD INICIAL	CORRELACION
893	1561,2	1572,2	14300	25 - 250	2156.0086	0,90877
909	1581,2		14525	25 - 250	1806,035	0,95604
921	1601,2		15025	25 - 250	1702,8761	0,93468
939	1621,2		15525	25 - 250	1898,4421	0,90671
956	1641,2		16025	25 - 250	1944,0176	0,94345
975	1661,2		16525	25 - 250	1274,8411	0,94107
1003	1681,2		17025	25 - 250	227,032	0,91171
1014	1701,2		17525	25 - 250	526,5276	0,93049
994	1721,2		18025	25 - 250	941,2653	0,92683
982	1741,2		18575	25 - 250	978,4992	0,91023
959	1761,2		19075	25 - 250	291,5611	0,95352
932	1781,2		19575	25 - 250	544,3636	0,95191
917	1795,2		19925	25 - 250	204,6849	0,96274
888	1819,2		20525	25 - 250	783,1592	0,92305

TABLA IV: RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ESTIMACIÓN ZONA SUR - PATRÓN DE PERFORACIÓN 2



Figura 41. Valores de K estimados a lo largo de la Línea de Prueba completa: a) sin normalizar,b) normalizados

5.4. PATRÓN DE PERFORACIÓN 3 (P3): 1 POZO, 10 METROS DE PROFUNDIDAD Y 2Kg. DE CARGA

5.4.1. Línea de Prueba:

El tercer patrón de perforación usado dentro del programa de pruebas experimentales en los 14 kilómetros correspondientes al extremo norte de la línea, fue implementado al igual que el patrón 1 en las estacas pares colocadas cada 50 metros, como puede ser visto en la Figura 26. Se tomaron para aplicar el método de estimación veintiocho (28) disparos con el mismo promedio de separación usado con los disparos anteriores. Este patrón de perforación presentó también, de acuerdo con IRIZA(2001) en el Resumen Operacional del Levantamiento Sísmico Capiricual 00G, una mejora sustancial en la energía transmitida efectiva transmitida.

5.4.1.1. Estimación de K para el patrón de perforación 3 (P3):

Las Figuras 42, 43 y 44 muestran ejemplos de la estimación de "K" para este patrón. En la Figura 45 se presenta un gráfico de los valores de "K" estimados a partir de la aplicación del método a los disparos que se muestran en la Tabla V.

En la Figura 46 se presentan dos gráficos, correspondientes a los valores de "K" estimados e interpolados entre los puntos de tiro seleccionados a lo largo de toda la Línea de Prueba (prioritaria) con el patrón de perforación 3 (P3), así como los respectivos valores de "K" normalizados.



Figura 42. Estimación de K para el disparo FFID 6, patrón 3: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K



d) Figura 43. Estimación de K para el disparo FFID 276, patrón 3: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K



Figura 44. Estimación de K para el disparo FFID 762, patrón 3: a) disparo y los tiempos picados, b) amplitud vs. distancia, c) amplitud A_R vs. log de la distancia, d) ajuste lineal y estimación de K



Figura 45. Factores de amplificación K versus la distancia respecto al origen de la Línea de Prueba para el patrón 3

ARCHIVO	PUNTO DE TIRO	PUNTO DE TIRO	DISTANCIA	CAMPO LEJANO:	FACTOR K DE	COEFICIENTE DE
incin , o	into	RECUPERADO	DISTANCIA	LLUIL (U.	AMPLITUD	
FILE (FFID)	ESTACA	EN:		$(\mathbf{r}_{o} - \mathbf{r}_{m})$	INICIAL	CORRELACIÓN
6	1000,3		0	25 - 250	1416,4467	0,93419
65	1020,3		500	25 - 250	1888,7245	0,90652
135	1040,3		1000	25 - 250	1413,4345	0,91408
185	1060,3		1500	25 - 250	251,1158	0,87057
276	1078,3		1950	25 - 300	906,2635	0,9117
358	1100,3		2500	25 - 250	1303,1913	0,91258
417	1120,3		3000	25 - 250	257,8914	0,93311
60	1142,3		3550	50 - 250	42,5128	0,92624
144	1160,3		4000	25 - 250	3,3196	0,53005
218	1180,3		4500	25 - 250	3021,7628	0,84475
323	1200,3		5000	25 - 250	2065,7353	0,8388
377	1218,3		5450	25 - 300	1234,6046	0,89906
445	1240,3		6000	25 - 250	403,494	0,92678
494	1256,3		6400	25 - 350	444,8556	0,94592
255	1280,3		7000	25 - 250	1295,5853	0,91134
39	1300,3		7500	25 - 250	2733,9008	0,81447
509	1320,3		8000	25 - 250	2706,0203	0,91282
555	1340,3	1331,3	8500	25 - 475	923,6036	0,9244
554	1360,3		9000	25 - 250	2066,0874	0,90035
602	1376,3		9400	25 - 350	2975,4457	0,93001
677	1398,3		9950	25 - 300	987,3368	0,93481
762	1420,3		10500	25 - 250	1266,5551	0,94402
856	1440,3		11000	25 - 250	1190,6831	0,89244
827	1460,3		11500	25 - 250	1286,7442	0,89676
847	1480,3		12000	25 - 250	993,6146	0,8501
779	1500,3		12500	25 - 250	483,6741	0,90174
702	1520,3		13000	25 - 250	766,402	0,93111
612	1540,3		13500	25 - 250	680,6222	0,90071

TABLA V: RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ESTIMACIÓNLINEA PRIORITARIA - PATRÓN DE PERFORACIÓN 3



Figura 46. Valores de K estimados a lo largo de la Línea de Prueba (prioritaria) para el patrón 3: a) sin normalizar, b) normalizados

Los patrones especiales 4, 5, 6 y 7 (Figura 47), perforados en las estacas a saber: 1001 (P7 en 1000), 1073, 1281, 1423 y 1518, no fueron tomados en cuenta para llevar a cabo la estimación de los factores de amplitud inicial, ya que la condición de solo haber sido utilizados en cinco (5) estacas a lo largo de toda la línea, no permitiría tener el número de muestras suficientes de amplitud, para estimar factores "K" confiables y representativos del entorno de la carga a partir de la interpolación entre estos puntos.



Figura 47. Diagrama de disparo Patrón Especial

Tomado de Iriza (2001)

5.5. CORRELACION DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA CON LA TOPOGRAFÍA Y LA GEOLOGÍA DE LA ZONA

El área correspondiente a la parte norte del proyecto presenta un paisaje de montañas, extendido casi continuamente de este a oeste e interrumpido solamente por algunos paisajes de valles de los ríos Querecual, Capiricual y Neverí. Estas montañas presentan un relieve escarpado (quebrado) con pendientes generales que van desde 8 % hasta 80 %, alcanzando en algunas zonas pendientes de hasta 100 %. Las alturas fluctúan entre 80 y 2080 metros sobre el nivel del mar;

gran parte de la superficie ubicada al sur de la zona de estudio esta cubierta por un paisaje de colinas, que presenta como característica un relieve ondulado a quebrado (IRIZA, 2001). En las figuras 48, 49 y 50 se presentan al Perfil Topográfico levantado a lo largo de la Línea de Prueba en función de las estacas de punto de tiro, con un perfil superpuesto de los valores de "K" normalizados obtenidos con cada uno de los tres patrones respectivamente. Adicionalmente en estos gráficos se anexa, con fines de correlación, la información de geología de superficie, tomada del Mapa de Ubicación de la Línea Sísmica cercana a la Sección del río Capiricual (Figura 19) y la Columna Compuesta (estratigráfica) de la Sección del río Capiricual (Figura 20), ver Tabla VI.



Figura 48. Correlación de los valores de K estimados para el patrón 1 (P1) con la topografía y geología de la zona



Figura 49. Correlación de los valores de K estimados para el patrón 2 (P2) con la topografía y geología de la zona



Figura 50. Correlación de los valores de K estimados para el patrón 3 (P3) con la topografía y geología de la zona

TABLA VI: FORMACIÓNES GEOLÓGICAS AFLORANTES EN SUPERFICIE, LITOLOGÍA Y

DUREZA

FORMACIÓN	ORMACIÓN LITOLOGÍA		CÓDIGO DE COLOR
		DE DUREZA	
San	Calizas de color negro. Limolitas lu	En las calizas, en las	
	titicas y calcáreas, e	intercalaciones de lutitas	
	intercalaciones de lutitas negras	carbonáceas (duras), y en	
Antonio	carbonáceas o calcáreas con	las capas de areniscas	
	concreciones elipsoidales de car	presentes (duras).	
	bonato de calcio. En menor		
	proporcion se presentan areniscas		
	diques de areniscas		
	Lutitas de color negro, fosilíferas no	En las lutitas negras v	
	calcáreas con fractura concoidea	limolitas calcáreas (du	
Vidoño	compacta. Es frecuente en la base y	ras). Se han descrito	
	en el tope linolitas de color gris	lutitas limosas de color	
	oscuro a negro, masivas y calcáreas.	gris verdoso oscuro a	
		marrón duras	
	Alternancia de areniscas, lutitas y	En las areniscas masivas	
	limolitas. Las areniscas son de	presentes (muy duras).	
	color gris, granos finos subangulares		
Caratas	a subredondeados, masivas poco		
	porosas. Las lutitas de color gris		
	calcáreas y limosas		
Los Jahillos	Secuencia cíclica de limolitas,	En las areniscas cuar	
Los sabinos	lutitas y grandes espesores de	cíticas gruesas y macizas	
	areniscas en el tope.	(muy duras).	
Areo	Constituida esencialmente por	En la capas ocasionales de	
	lutitas de color gris no calcáreas.	areniscas cuarcíticas (du	
		ra), y de calizas delgadas	
XX X		(duras).	
Naricual	Constituida por una secuencia	cas masiyas compactas	
	cicilica de lutitas, limolitas,	(duras a muy duras)	
<u> </u>	Securação alternante Intítica que	En las aranisaas calaáraas	
Capiricual	en menor proporción contiene	endurecidas	
	areniscas y conglomerados	chuirectuas.	
Quiamara	Está constituida por arcillas		
Quialliare	limolitas areniseas y conglomore		
	dos continentales		
Aluvión	Sedimentos recientes		
AIUVIOII	Sedimentos recientes		

5.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS AL APLICAR A DATOS REALES EL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE AMPLITUD (K):

5.6.1. Patrón de Perforación 1:

Se observa en algunos datos de amplitud mostrados en la Figura 31, de valores "K" estimados a lo largo de la Línea de Prueba (prioritaria) para el patrón 1 (que de acuerdo al Resumen Operacional generó una pérdida considerable de la energía transmitida y excesiva onda superficial durantes las pruebas), variaciones bruscas en el comportamiento en torno a máximos puntuales con respecto a los valores promedios determinados en la zona norte. Esto podría estar reflejando cambios en la respuesta relacionados a variaciones en la dureza respecto al tipo litología que conforma a cada una de las diversas formaciones aflorantes. El efecto de retardo en los tiempos de llegada de la onda directa, causado por lo irregular o abrupto de la topografía, se evidencia en el comportamiento de los valores de "K" estimados en los puntos 1142,1 y 1160,1 (ubicados respectivamente a 3550 y 4000 metros del origen), siendo otra posible causa en las variaciones al introducir error en la estimación. Los puntos donde se observan cambios a valores altos de amplitud (K) estimada, de acuerdo con la Tabla II y la figura 48 para el patrón de perforación 1, con respecto a la topografía y geología de la zona, se ubican sobre:

- El afloramiento de la Formación Caratas, constituida esencialmente por una alternancia de areniscas masivas muy duras, lutitas de apariencia pastosa, poco calcáreas, limosas y limolitas; puntos de tiro 1180,1 y 1200,1 (a 4500 y 5000 metros respecto del origen).
- El afloramiento de la Formación Los Jabillos, secuencia cíclica de limolitas, capas delgadas de lutitas y grandes espesores de areniscas macizas muy duras; punto de tiro 1300,1 (ubicado a 7500 metros respecto del origen).

 El afloramiento de la Formación Naricual, constituida por una secuencia cíclica de lutitas, limolitas, areniscas duras a muy duras, y carbón; punto de tiro 1500,1 (ubicado a 12500 metros respecto del origen).

5.6.2. Patrón de Perforación 2:

Al observar los datos obtenidos en el gráfico de la Figura 41 de valores "K" estimados a lo largo de la Línea de Prueba completa para el patrón 2 (que presentó una mejor efectividad de transmisión de la energía durante las pruebas según lo expuesto en el referido Resumen Operacional), se hace evidente una diferencia considerable entre los datos estimados para la Línea de Prueba y los datos estimados para la sección correspondiente al Programa Normal del Proyecto; los resultados obtenidos arrojan en la zona montañosa del norte una alta frecuencia de variación en el comportamiento de los valores de "K", y en la zona sur una tendencia más uniforme en el comportamiento de los valores de "K" determinados:

5.6.2.1. Zona Norte:

En la figura 49 se observa al detalle la correlación entre los valores de "K" estimados para el patrón de perforación 2, la topografía y la geología de la zona. Nótese las variaciones laterales muy marcadas en el comportamiento de los valores de "K" entre puntos cuya distancia es relativamente corta, lo que se piensa podría estar relacionado a cambios en la dureza de las litologías dispuestas, en algunos casos, en forma de intercalaciones como ocurre en la Formación San Antonio, en forma de alternancias como en la Formación Caratas, o en forma secuencias cíclicas como es el caso de la Formación Los Jabillos. Otro factor que no se descarta, como ya se mencionó para el patrón 1, es el relacionado a la topografía irregular con cambios abruptos que

inducen a una mala estimación del correspondiente factor de amplitud (K) en algunos de los puntos de tiro seleccionados (punto de tiro 1143,2 ubicado a 3575 metros respecto del origen).

Variaciones laterales considerables en el comportamiento de los valores de "K" estimados en la zona norte, de acuerdo con la Tabla III y la figura 49, se ubican específicamente sobre:

- El afloramiento de la Formación Caratas; en el punto de tiro 1181,2 (ubicado a 4525 metros del origen) se estimó el factor "K" de mayor valor numérico.
- El afloramiento de la Formación Los Jabillos, y sobre el afloramiento de la Formación Areo, constituida esta última esencialmente por lutitas no calcáreas, con capas ocasionales de areniscas cuarcíticas duras.
- El afloramiento de la Formación Naricual.

Es importante destacar que en los afloramientos de las formaciones Caratas, Los Jabillos y Naricual se presenta la mayor relación entre la alta frecuencia de variación de los valores de "K" con la alternancia o secuencia cíclica de diferentes litologías. Sin embargo, si se observan y se comparan dos disparos consecutivos separados 550 metros, ubicados a 3025 y 3575 metros respecto al origen, ambos sobre el afloramiento de la Formación Caratas (Figura 51), en el primero, correspondiente al punto de tiro 1121,2, se realizó un buen estimado del factor "K"; mientras que en el segundo, punto de tiro 1143,2, se produjo una mala y dificultosa estimación del factor "K" (obsérvese como se acentúa el efecto retardo generado por la topografía en los tiempos de llegada de la onda directa).



Figura 51. Disparos 420 y 64 de la Línea Sísmica de Prueba en la Zona Norte

5.6.2.2. Zona Sur:

Se observa, en la misma figura 41, una tendencia más uniforme en el comportamiento de los valores de "K" estimados, respondiendo posiblemente a cambios en las litologías que constituyen las formaciones geológicas presentes en una zona de menor heterogeneidad, para una topografía de pocos cambios abruptos de relieve; de acuerdo con la Tabla IV y la figura 49:

• Se presentan en primer lugar valores altos en los factores de amplitud (K) estimados con datos ubicados sobre el afloramiento Formación Capiricual: secuencia altamente lutítica que en menor proporción contiene areniscas endurecidas y conglomerados.

- Luego se observa un descenso del valor numérico de los factores "K" determinados con la distancia, ubicados sobre el afloramiento de la Formación Quiamare, constituida por una secuencia monótona: dominante en arcillas, proporciones variables de areniscas guijarrosas y algunos conglomerados masivos continentales.
- Se observan finalmente los valores más bajos de amplitud estimados con datos ubicados sobre el aluvión, constituido por sedimentos recientes poco consolidados.

5.6.3. Patrón de Perforación 3:

En la Figura 46 se observan los valores de "K" estimados a lo largo de la Línea de Prueba (prioritaria) para el patrón 3 que presentó, al igual que el anterior, una mejora sustancial en la energía transmitida durante las pruebas realizadas en la zona norte. Se distinguen algunas variaciones drásticas de "K" con respecto a los valores promedios, al igual que las observadas con el patrón 1. Estos cambios podrían estar relacionados, como ya se mencionó para el patrón 1 y el patrón 2, con las variaciones litológicas y / o topografía irregular: puntos de tiros 1142,1 y 1160,1, ubicados a 3550 y 4000 metros del origen, por ejemplo. Los puntos donde se ubican los cambios laterales fuertes se encuentran, de acuerdo con la Tabla V y la Figura 50 de correlación de los valores de "K" estimados para el patrón 3 (P3) con la topografía y geología de la zona, sobre los afloramientos de:

- La Formación Caratas; punto de tiro 1180,3, ubicado a 4500 metros del origen.
- La Formación Los Jabillos; puntos de tiro 1300,3 y 1320,3, ubicados a 7500 y 8000 metros respectivamente del origen.
- La Formación Areo; punto de tiro 1376,3, ubicado a 9400 metros con respecto del origen.

6. INTRODUCCIÓN DE LOS VALORES DE AMPLIFICACIÓN K ESTIMADOS A PARTIR DE DATOS REALES EN EL MODELADO SÍSMICO 2D POR DIFERENCIAS FINITAS

6.1. GENERALIDADES:

Con la finalidad de validar un modelo geológico estructural interpretado en Capiricual, definido en un transecto ubicado sobre la Línea Sísmica a la cual se hizo referencia en la Figura 19 del Capítulo IV, se realizó previamente un modelado sísmico elástico e isotrópico 2D por diferencias finitas utilizando el programa ANISO2D (ETGEN, 1988). Este programa, al generar cada uno de los disparos sintéticos que componen la etapa de adquisición, simula la propagación del campo de onda completo en medios elásticos 2D isótropos o con anisotropía transversal (VTI), empleando el método de diferencias finitas con una aproximación de segundo orden, calculándose esta propagación del frente en cualquier instante de tiempo; las salidas que produce, como ya fue mencionado en el Capítulo III, son sismogramas sintéticos y películas del frente de onda moviéndose en tiempo para cada una de las componentes del desplazamiento (Ux, Uz).

6.2. MULTIPLICACIÓN DE LOS VALORES DE AMPLIFICACIÓN K ESTIMADOS A LAS TRAZAS DE INCIDENCIA NORMAL DE LA SECCIÓN SÍSMICA SINTÉTICA:

El modelo generado previamente con el programa ANISO2D (ETGEN, 1988), correspondiente a la Línea Sísmica paralela a la Línea de Prueba del Proyecto Capiricual 2D, consiste en una sección sísmica sintética a incidencia normal (sección apilada conformada por las trazas cercanas a la fuente), ver Figura 52. La igualdad demostrada en el Anexo A dice que es equivalente a considerar el factor de amplificación directamente en la propagación de la onda dentro del código de diferencias finitas, a solo multiplicar por el valor de "K" el disparo una vez terminada la propagación de la onda considerada. Esto permite introducir el efecto de amplificación de forma más conveniente con sólo multiplicar cada disparo por el correspondiente valor de "K" estimado.



Figura 52. Sección Sísmica Sintética 2D de Capiricual a incidencia normal Tomado de Pérez E., et al. (2000)

6.2.1 Introducción de los Factores K Estimados con el Patrón de Perforación 2 (P2):

Con la finalidad de introducir en cada muestra de las trazas de incidencia normal (que conforman la sección sísmica sintética) el efecto inicial de la carga de explosivos, ya realizados

los disparos que componen la etapa de adquisición, se multiplicaron los factores "K" estimados entre los puntos de tiro 1101 a 1821 (de 2525 a 20575 metros con respecto al origen de la Línea de Prueba) por las trazas correspondientes sobre el modelo. Con respecto a los puntos de tiro 1823 a 1904 se extrapolaron los valores de "K" por no tener información en esta parte del modelo respecto al patrón 2. Es importante mencionar que la sección sísmica sintética fue disparada cada 80 metros, por lo que se debió interpolar cada 20 metros y extraer los factores "K" cada 80 metros de manera de ajustar la data a los requerimientos del modelado. Los datos finales de los que no se tenía información fueron obtenidos, como fue mencionado anteriormente, por extrapolación; mediante la cual se ajustó a los últimos datos estimados de "K" un polinomio de primer grado por la tendencia de estos a alinearse, y se usó el mismo para ser evaluado en función de la distancia en donde no se contaba con información. Debido a lo explicado en la sección 5.6. del Capítulo V, los factores "K" estimados fueron suavizados con un filtro de 5 puntos. Un despliegue gráfico con la sección sísmica sintética a incidencia normal multiplicada por los factores "K" suavizados para el patrón 2, con la curva de estos factores, y la ubicación con respecto a la topografía se presenta en la figura 53.

Con la finalidad de visualizar de una forma más detallada el efecto inicial de la carga de explosivos en los datos sintéticos, se realizaron dos disparos en puntos separados a 8 kilómetros en el modelo: 50 y 150 (posicionados a 18565 y 10565 metros con respecto al origen); caracterizados por encontrarse, de acuerdo a lo que observa en la sección resultante al introducir los factores "K" (Figura 53), se zona con amplitudes atenuadas y en poca atenuación, una zona con en una respectivamente. Multiplicándose, posteriormente, por el respectivo factor de amplificación (K), previa normalización de las muestras de estos disparos con respecto al mayor



Figura 53. Factores de amplitud (patrón 2), perfil topográfico con escala vertical aumentada y Sección Sísmica Sintética – Capiricual 2D

valor. El efecto de amplitud inicial introducido en cada disparo puede ser observado al comparar las Figuras 54 con 55.



Figura 55. Disparos 50 y 150 con factores K introducidos

6.2.2. <u>Introducción de los Factores K Estimados con los Patrones de Perforación 1 y 3</u> (P1 y P3):

Para introducir en cada muestra de las trazas de incidencia normal (que conforman la sección sísmica sintética) el efecto inicial de la carga de explosivos, correspondientes a los patrones P1 y P3 ya realizados los disparos, se tomaron en primer lugar los factores "K" estimados correspondientes a los puntos de tiro 1100 a 1538 (ubicados de 2500 a 13450 metros respecto del origen de la Línea de Prueba), equivalentes a los puntos 998 a 1436 de la Línea Sísmica sobre la que el transecto del modelo fue definido. En segundo lugar, debido a que los factores "K" estimados con los patrones mencionados solo cubrieron 10880 metros de un total de 20000 metros de longitud de la sección sísmica sintética, los 9120 metros correspondientes a los puntos de tiro 1540 a 1902 (equivalentes a los puntos 1438 a 1800 de la Línea Sísmica) fueron sustituidos por valores igual a 1; generándose un archivo con unos y factores "K" suavizados, al igual que en el caso anterior, a objeto de obtener para cada uno de estos patrones de perforación secciones sísmicas sintéticas a incidencia normal. Dos despliegues gráficos con las secciones sísmicas sintéticas a incidencia normal obtenidas, con la respectiva curva de los factores "K" suavizados, y la ubicación con respecto a la topografía se presentan en las figuras 56 y 57.



Figura 56. Factores de amplitud (patrón 1), perfil topográfico con escala vertical aumentada y Sección Sísmica Sintética – Capiricual 2D



Figura 57. Factores de amplitud (patrón 3), perfil topográfico con escala vertical aumentada y Sección Sísmica Sintética – Capiricual 2D

6.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS AL MULTIPLICAR LOS FACTORES ESTIMADOS DE AMPLITUD (K) A LAS TRAZAS DE INCIDENCIA NORMAL DE LA SECCIÓN SÍSMICA SINTÉTICA:

6.3.1. Patrón de Perforación 1:

Al observar la sección sísmica sintética en la Figura 56 con los factores "K" multiplicados a cada traza de incidencia normal, correspondientes a los 10880 metros de un total de 20000 que sólo pudieron ser cubiertos con la información de amplitud disponible, y compararla con la gráfica ubicada en la misma figura de estos factores contra la distancia, se visualiza en general como se distribuye la energía amplificada o atenuada en cada traza; de acuerdo con las condiciones reales iniciales de la carga explosiva resumidas en un factor estimado dentro de la discretización definida a lo largo de la Línea de Prueba.

En este caso, para este patrón de perforación somero de poca penetración de energía, se puede ver como las variaciones registradas en los factores "K" en torno a valores máximos o mínimos puntuales modifican las correspondientes amplitudes en la imagen; por ejemplo, los factores estimados con valores altos sobre las areniscas, lutitas y limolitas de la Formación Caratas, causan un efecto de amplificación o realce en las amplitudes de las respectivas trazas en el modelo, o los factores con bajo valor de amplitud estimados con datos, levantados sobre los afloramientos de lutitas de la Formación Areo y de secuencias cíclicas de lutitas, limolitas, areniscas y carbón de la Formación Naricual respectivamente, generan un efecto de atenuación de las amplitudes en el conjunto de trazas correspondientes en la imagen.
6.3.2. Patrón de Perforación 2:

Al observar la sección sísmica sintética en la Figura 53 con los factores "K" suavizados y multiplicados a cada traza de incidencia normal, se evidencia como la frecuencia de variación lateral de amplitud, registrada en la estimación entre puntos cuya distancia es relativamente corta en la zona norte, se distribuye en cada una de esas trazas al atenuar o amplificar los valores de cada muestra. Como estos factores "K" fueron estimados con datos cuyo patrón de perforación transmitió de una forma efectiva energía al entorno litológico, se puede detallar en la sección sintética, comparándose al mismo tiempo con la gráfica ubicada en la misma figura de los factores suavizados previamente de amplitud contra la distancia, como estas condiciones iniciales de la carga varían la imagen del modelo en proporción con cada afloramiento geológico presente en cada punto de discretización definido a lo largo de la Línea de Prueba.

Se pueden ver como en este caso con el patrón 2, por ejemplo, los factores estimados con valores altos sobre las secuencias cíclicas de lutitas, limolitas, areniscas y carbón de la Formación Naricual causan un efecto de amplificación o realce en las amplitudes de ese conjunto de trazas en la imagen previamente obtenida; o como factores con bajo valor de amplitud estimados con datos levantados sobre los aluviones no consolidados en la zona sur, generan un efecto de atenuación y disminución en la resolución en el conjunto de trazas correspondientes en la imagen (esto puede observarse con detalle al comparar los disparos 50 y 150 en la Figura 54 con los correspondientes con factores "K" introducidos en la Figura 55).

6.3.3. Patrón de Perforación 3:

Al observar la sección sísmica sintética en la figura 57 con los factores "K" multiplicados a cada traza de incidencia normal (previamente suavizados), correspondientes a la misma zona en el norte que solo pudo ser cubierta con la información de amplitud disponible, y comparar con la gráfica ubicada en la misma figura de estos factores contra la distancia, se visualiza en general como se distribuye la energía en cada traza en función de las variaciones de amplitud registradas en torno a puntos máximos o mínimos específicos; lo que sería una respuesta a las condiciones reales iniciales de la carga explosiva y de su entorno litológico en un área compleja, resumida en un factor estimado con datos cuyo patrón de perforación generó también transmisión efectiva de energía.

A pesar de que se hubiesen esperado variaciones laterales frecuentes en los factores de amplitud estimados a lo largo de la línea de prueba, y no focalizadas en torno a puntos en específico con este patrón de perforación, como respuesta a los constantes cambios presentes en el área, se puede detallar como factores estimados con valores altos sobre las areniscas, lutitas y limolitas de la Formación Caratas, causan un efecto realce en las amplitudes de las respectivas trazas del modelo, y como valores bajos estimados sobre las secuencias cíclicas de lutitas, limolitas, areniscas y carbón de la Formación Naricual causan un efecto de atenuación en las amplitudes de ese conjunto de trazas de incidencia normal correspondientes.

CONCLUSIONES:

- Se desarrolló una metodología para introducir, a través de un parámetro (K), el efecto conjunto de la carga y de su entorno en el modelado por diferencias finitas en áreas estructuralmente complejas.
- La metodología desarrollada se aplicó con éxito sobre datos provenientes del área de Capiricual, sobre lo cual se concluye:
 - Existe una variación espacial esperada de los valores estimados de amplitud "K", que depende proporcionalmente de la capacidad del patrón de perforación usado en transmitir efectivamente energía en el medio, y de las alternancias litológicas que cambian constantemente con el tipo de roca aflorante en la zona.
 - Se evidencia en la zona norte un efecto de retardo en los tiempos de llegada de la onda directa, efecto producto de una topografía muy irregular o abrupta y que se cree, introduce errores en el método de estimación de "K".
 - Se obtienen tres secciones sísmicas sintéticas de incidencia normal en las que se observan variaciones de amplitud lateral que reflejan en forma mas realista la influencia de la fuente de energía sísmica y del entorno de la misma, sobre los datos modelados.

RECOMENDACIONES

- Extender la metodología para toda el área de Capiricual y generar mapas del parámetro "K" usando el resto del levantamiento sísmico existente, con la finalidad de poder hacer modelado sísmico para cualquier transecto geológico y así apoyar más efectivamente en los estudios que se llevan a cabo en la región, tanto para optimizar la adquisición como en la interpretación de datos sísmicos.
- Caracterizar la información sísmica en función de las condiciones geológicas y topográficas del área, y de la capacidad de transmitir energía en el medio de los patrones de carga.
- Investigar el efecto de acoplamiento carga-geófonos-litología para las diversas formaciones aflorantes en el área, como una manera de entender el deterioro de la imagen sísmica en la zona de Capiricual y en general para el oriente del país.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS:

AKI, K. y P. G. RICHARDS (1980) <u>Quantitative Seismology: Theory and Method.</u> W. H. Freeman & Co., 1 y 2.

CÓDIGO GEOLÓGICO(2001) Página web de PDVSA-INTEVEP http://www.pdv.com/lexico

DERECKE, P. (1986) <u>Refraction Seismics: The Lateral Resolution of Structure and Seismic</u> <u>Velocity</u>; 269 p.

- **ETGEN, J.** (1988) <u>Finite Difference Elastic Anisotropic Wave Propagation</u>. Standford Exploration Project SEP, (56): 23 46.
- GASKELL, T. F. (1956) <u>The relation between size of charge and amplitud of</u> refracted wave. Geophys. Prosp., 4 (2): 185 - 194.
- IRIZA, A. (2001) <u>Levantamiento Sísmico Capiricual 00G (Resumen Operacional)</u>. Gerencia de Operaciones y Servicios Técnicos Especializados Levantamientos Geofísicos, PDVSA Exploración y Producción, Informe Técnico, Inédito.
- KAUFMAN, A. A. y A. L. LEVSHIN (2000) Acoustic and Elastic Wave Fields in Geophysics; 511 p.
- LAVERGNE, M. (1989) <u>Seismic Methods. Wave Equations (homogeneous, isotropic,</u> elastic medium), 140 p.

LINER, C. L. (1999) Elements of 3D Seismology; 281 p.

MUJICA, D., A. ORTEGA, E. PÉREZ y J. SIERRA (2000) Modelado Sísmico 2-D por Diferencias Finitas para la generación de Secciones Apiladas en el área de Capiricual, OSAT 4137-0032, Public. Esp., 6 p.

NALSEN, M. O. y R. PRIETO (1986) <u>Adquisición de datos sísmicos de reflexión</u> <u>en el frente de montaña del Estado Monagas, Venezuela</u>. Depto. Geof., Univ. Central de Venezuela, Trabajo Especial de Reválida, Inédito.

- O'BRIEN, P. N. S. (1957) The relationship between seismic amplitude and weight of charge, Geophys. Prosp., 5 (3): 349-352.
- PDVSA PROJECT NET (2001) Página web de PDVSA Intranet: http://162.122.13.71/pgo /norte_anzo/index.xm
- SHARPE, J. A. (1944) <u>The effect of charge size on reflection records</u>, Geophysics, (9): 131–142.

SHERIFF, R. E. (1978) <u>A First Course in Geophysical Exploration and Interpretation;</u> 313 p.

SIXTA, D. P. (1982) Comparison and analysis of downgoing waveforms from land seismic sources. M. Sc. Thesis, Colorado School of Mines.

WATERS, K. H. (1981) <u>Basic Physical Principles: Waves in Elastic Solids, Reflection</u> <u>Seismology a Tool for Energy Resource Exploration</u>; 453 p.

ZIOLKOWSKI, A. M. (1993) Determination of the signature of a dynamite source using source scaling, Part I: Theory: Geophysics, (58): 1174 – 1182.

ZIOLKOWSKI, A. M., y K. BOKHORST (1993) Determination of the signature of a dynamite source using source scaling, Part 2: Experiment: Geophysics, (58):1183-1194.

INVARIANZA DEL OPERADOR DIFERENCIAL DE LA ECUACIÓN DE ONDA A LA INTRODUCCIÓN DE UN FACTOR DE AMPLIFICACIÓN EN LA SOLUCIÓN

Dada la ecuación de onda no homogénea, donde el término fuente es un pulso representado por la función δ de Dirac:

$$\mathbf{f}(\boldsymbol{\psi}) = 4\pi\boldsymbol{\delta} \tag{A.1}$$

por definición
$$\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = \begin{cases} 1 & \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 & \mathbf{y} & \mathbf{t} = \mathbf{t}_0 \\ 0 & \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 & \mathbf{y} & \mathbf{t} \neq \mathbf{t}_0 \end{cases}$$

£ es el operador diferencial: $\mathbf{f} = \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$, y ψ es una solución de la ecuación de

onda (A.1), entonces se requiere demostrar que:

$$\mathbf{f}(A_0 \boldsymbol{\psi}) = A_0 \mathbf{f}(\boldsymbol{\psi}) \tag{A.2}$$

donde A_0 es una constante diferente de cero, que no depende de las coordenadas espaciales y del tiempo t

Así si se trabaja el lado izquierdo de la ecuación (A.2) obtenemos:

$$\pounds(A_0\psi) = \nabla^2(A_0\psi) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(A_0\psi)}{\partial t^2}$$
(A.3)

$$\pounds(A_0\psi) = A_0 \nabla^2 \psi - \frac{A_0}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$
(A.4)

$$=A_0 \mathfrak{t}(\psi) \tag{A.5}$$

por lo tanto queda demostrado:

$$\mathbf{\pounds}(A_0\psi) = A_0\mathbf{\pounds}(\psi) \tag{A.6}$$