

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ALGORITMOS DE BÚSQUEDA NO LINEAL PARA DISEÑAR ARREGLOS DIRECCIONALES DE GEÓFONOS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof, Cavada Ogando José Manuel

COTUTOR ACADÉMICO: Javier Díaz

TUTOR INDUSTRIAL: Rafael Banchs

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al título de Ingeniero Geofísico  
por la Br, Carolina del Valle SILVA

Caracas, Abril 2001

© Silva Carolina Del Valle, 2001  
Hecho el Depósito de Ley.  
Depósito Legal Ift487200162089

**Silva Carolina del Valle.**

## **ALGORITMOS DE BÚSQUEDA NO LINEAL PARA DISEÑAR ARREGLOS DIRECCIONALES DE GEÓFONOS**

**Tutor Académico: Prof Cavada Ogando José Manuel. Cotutor Académico:  
Ing. Javier Díaz. Tutor Industrial: Ing. Rafael Banchs. Tesis. Caracas,  
U.C.V: Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería de Geología,  
Geofísica y Minas.**

**Palabras Claves:** Arreglos adaptativos, *Beamforming*, algoritmos no lineales.

**Resumen.** El principal objetivo del presente trabajo es la aplicación de la técnica del *Beamforming*, desarrollada recientemente por Intevep, en el diseño de arreglos direccionales de geófonos o arreglos adaptativos, que permiten preservar las señales incidentes en una dirección dada y cancelar o atenuar la interferencia incidente en una dirección distinta; para lo cual primero se procedió a estudiar la efectividad de la técnica por medio de la aplicación del algoritmo de búsqueda local LMS, en un modelo más complejo, que el previamente concebidos para su desarrollo.

A continuación, sobre este modelo más complejo, se evaluó la aplicabilidad de la técnica, utilizando 3 técnicas de optimización global como lo son, la técnica del temple simulado, (SA); la implementación del *Beamforming*, por medio de la aplicación de un algoritmo genético (AG); el método de propagación hacia atrás, desarrollado al igual que el SA, utilizando las herramientas de redes neuronales. Luego se selecciono la técnica que arrojo los mejores resultados, para evaluar la efectividad del *Beamforming* en la eliminación de frentes de ondas según un ángulo de interés y la recuperación de un evento dado, en 2 modelos simplificados del Lago de Maracaibo, que representan a algunos sectores con problemas de ruido y atenuación, debido a la presencia de capas de lodo y arcillas blandas.

Este trabajo se hizo buscando explorar, una de las alternativas que en la actualidad presentan nuevas soluciones, enfocadas a minimizar los efectos de las fuentes de ruido e interferencias en la adquisición de datos sísmicos.

Con este estudio se verifico la efectividad y robustez del algoritmo LMS, en la cancelación adaptativa de señales no deseadas. Se demostró que los métodos de búsqueda global aplicados son eficientes para trabajar con un alto número de variables, que la manipulación de datos sísmico implica, y que a diferencia del algoritmo LMS, no necesitan partir de una buena condición inicial, pero en contrapartida, resultaron ser más lentos y menos consistentes. De los 3 métodos de búsqueda global implementados, se encontró que el método de propagación hacia atrás arrojó los mejores resultados.

## **AGRADECIMIENTOS**

*“Lo mejor para la tristeza”, contestó Merlín, empezando a soplar y resoplar, “es aprender algo”. Es lo único que no falla nunca. Puedes envejecer y sentir toda tu anatomía temblorosa; puedes permanecer durante horas por la noche escuchando el desorden de tus venas; puedes echar de menos a tu único amor; puedes ver al mundo a tu alrededor desvastado por locos perversos; o saber que tu honor es pisoteado por las cloacas de inteligencias inferiores. Entonces solo hay una cosa posible: aprender.”*

A Dios, ese algo misterioso que no se si un día comprenda, pero que nos ha regalado todo un universo lleno de preguntas y la facultad de aprender.

A la hermosísima U.C.V, por todas las oportunidades de aprender que me brindo y deseo nos siga brindando.

A todos mis profesores, por su valiosa enseñanza.

A José Manuel Salazar, por su apoyo incondicional , valiosa y sincera amistad. Dicen que nadie es indispensable, pues yo pienso que personas como tu, si lo son.

A Elías Andara, por tu siempre oportuno consejo y hermosa amistad.

A mi tutor académico, profesor Cavada, por su solidaridad en los momentos más difíciles de mi carrera.

A mi cotutor académico Javier Pérez, por presentarme y aceptarme en la continuación de este tema tan interesante.

A mi tutor industrial Rafael Banchs, por tu cordialidad, apoyo y objetividad durante el desarrollo de este trabajo.

A todos los tesisistas y pasantes de Intevep que conocí durante este período, por ese montón de empujoncitos y tics, que me fueron tan útiles.

A los chicos de Intesa, Rafael Vásquez y Henry Osorio, por su paciencia y estar siempre dispuestos a enseñar y ayudar.

A Jesús Sierra por tus observaciones y consejos sobre los modelos del Lago de Maracaibo.

A la sra Carlota García por ser tan gentil, atenta y eficiente en su trabajo.

A todos los empleados de este mágico pasillo de geofísica, por su ayuda y consejos que me permitieron avanzar en mi trabajo y que tuve la gran fortuna de conocer.

A la Sra, Morela y al flaquito (Eduardo) de la biblioteca de Geología, Minas y Geofísica por todo el apoyo que nos brindan.

A todos aquellos que por mi imperfecta memoria racional del momento, no aparecen, pero que mi perfecto corazón irracional, sé que los aprecia y recordara.

*“Si la gente que no se comprende, al menos comprendiera que no se comprende, entonces se comprendería mejor que cuando, sin comprenderse, ni siquiera comprenden que no se comprenden los unos a los otros.”*

# ÍNDICE GENERAL

<u>PORTADA</u> .....	1
<u>RESUMEN</u> .....	3
<u>ÍNDICE GENERAL</u> .....	7
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u> .....	11
<u>DEDICATORIA</u> .....	16
<u>CAPITULO 1</u> .....	17
<u>INTRODUCCIÓN</u> .....	17
<u>1.1.- ADQUISICIÓN SÍSMICA Y NUEVAS ALTERNATIVAS.</u> .....	17
<u>1.2.- ANTECEDENTES.</u> .....	19
<u>1.2.1.- Aplicación de filtros adaptativos y Beamforming desarrollado en Schlumberger.</u> .....	19
<u>1.2.2.- Metodología del Beamforming desarrollada en PDVSA_Intevep.</u> .....	21
<u>1.3.- OBJETIVOS.</u> .....	22
<u>CAPITULO 2</u> .....	23
<u>CAMPO ELÁSTICO</u> .....	23
<u>2.1- INTRODUCCIÓN.</u> .....	23
<u>2.2.- MEDIO ELÁSTICO.</u> .....	24
<u>2.3- TENSOR ELÁSTICO.</u> .....	26
<u>2.4.- ANISO 2D.</u> .....	29

<u>CAPITULO 3</u> .....	38
<u>PROCESO ADAPTATIVO</u> .....	38
<u>3.1.-INTRODUCCIÓN</u> .....	38
<u>3.2.- ARREGLO DE GEÓFONOS</u> .....	39
<u>3.3.- ARREGLO ADAPTATIVO</u> .....	40
<u>3.4.- FILTRO ADAPTATIVO</u> .....	43
<u>CAPITULO 4</u> .....	44
<u>ALGORITMO DE BÚSQUEDA LOCAL IMPLEMENTADO, INTRODUCCIÓN</u> <u>Y DESCRIPCIÓN</u> .....	44
<u>4.1.- ¿ QUE ES BEAMFORMING ?</u> .....	44
<u>4.2.- BEAMFORMING CON UNA SEÑAL PILOTO</u> .....	45
<u>4.3.- ALGORITMO LMS</u> .....	49
<u>CAPITULO 5</u> .....	51
<u>ALGORITMOS DE BÚSQUEDA GLOBAL IMPLEMENTADOS,</u> <u>INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN</u> .....	51
<u>5.1.- REDES NEURONALES</u> .....	52
<u>5.1.1- Neurofisiología, conceptos básicos</u> .....	52
<u>5.1.2.- Elemento de procesamiento, PE</u> .....	54
<u>5.1.3.- Propagación hacia atrás (backpropagation)</u> .....	55
<u>5.2.- TEMPLE O RECOCIDO SIMULADO (SIMULATED ANNEALING)</u> .....	57
<u>5.2.1.- Introducción</u> .....	57
<u>5.2.3.- Temple o recocido simulado (SA)</u> .....	59
<u>5.3.- ALGORITMO GENÉTICO (AG)</u> .....	62
<u>5.3.1.- Introducción</u> .....	62
<u>5.3.2.- Programa Evolutivo</u> .....	63



<u>CAPITULO 6</u> .....	68
<u>LAGO DE MARACAIBO</u> .....	68
<u>6.1.- INTRODUCCIÓN</u> .....	68
<u>6.2.- FUENTES DE RUIDO EN EL LAGO DE MARACAIBO</u> .....	70
<u>CAPITULO 7</u> .....	77
<u>APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DEL BEAMFORMING</u> .....	77
<u>7.1.- REALIZACIÓN DE MODELOS MÁS COMPLEJOS</u> .....	77
<u>7.1.1.- Modelo simple con capa meteorizada</u> .....	77
<u>7.1.2.- Modelos simplificados del Lago de Maracaibo con</u> .....	81
<u>7.2.- IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE BÚSQUEDA GLOBAL</u> .....	86
<u>7.3.- FUNCIÓN OBJETIVO</u> .....	94
<u>CAPITULO 8</u> .....	96
<u>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</u> .....	96
<u>8.1.- ELIMINACIÓN DE FRENTES DE ONDAS SEGÚN ÁNGULOS DE INTERÉS, APLICANDO EL ALGORITMO, LMS</u> .....	96
<u>8.1.1.- Generación de datos sintéticos</u> .....	96
<u>8.1.2.- Resultados obtenidos y su análisis</u> .....	100
<u>8.2.- ELIMINACIÓN DE FRENTES DE ONDAS APLICANDO ALGORITMO DE BÚSQUEDA GLOBAL, EN UN MODELO SIMPLE CON UNA CAPA DE BAJA VELOCIDAD, RESULTADOS</u> .....	102
<u>8.3.- ELIMINACIÓN DE FRENTES DE ONDAS SEGÚN ÁNGULOS DE INTERÉS, EN DOS MODELOS SIMPLIFICADOS QUE REPRESENTA ALGUNOS SECTORES DEL LAGO DE MARACAIBO CON PRESENCIA DE CAPAS DE LODO, ARCILLAS BLANDAS Y/O GAS</u> .....	115
<u>8.3.1.- Generación de datos sintéticos</u> .....	115
<u>8.3.2.- Resultados</u> .....	118

<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u> .....	131
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</u> .....	134
<u>APÉNDICE A</u> .....	137

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

FIG 1.1	Esquema del sistema concebido, según la aplicación del método del <i>Beamforming</i> desarrollado por Schlumberger.	20
FIG 1.2	MODELO 1. Modelo utilizado para evaluar el funcionamiento de la técnica del Beamforming, según la aplicación implementada por Intevep.	21
FIG 2.1	Representación gráfica de la respuesta típica en función del alargamiento de una barra de aluminio sometida a una tensión.	24
FIG 2.2	Muestra los archivos de entrada y salida de la versión ANISO2D utilizada.	30
FIG 2.3	Ejemplo de una posible distribución de nodos, receptores y fuentes.	30
FIG 2.4	Tipos de ondículas.	31
FIG 2.5	Ondícula tipo Ricker 1 utilizada.	31
FIG 2.6	Modelos de los tipos de fuentes disponibles para el programa ANISO2D.	31
FIG 2.7	EJEMPLO N°1, ilustra las condiciones y conceptos bajo los cuales se crea el archivo de datos para la generación de los modelos.	35
FIG 2.8	EJEMPLO de modelos generados con el programa Gmodel.	37
FIG 3.1	Esquema de un proceso adaptativo.	39
FIG 3.2	Esquema de un modelo simple de cancelación lobular, desarrollado por Howells_Applebaum.	41

FIG 4.1	Esquema del patrón de directividad de un arreglo de antenas lineal.	46
FIG 4.2	Proceso aplicado a una señal piloto y a la interferencia que arriba en una dirección distinta.	47
FIG 5.1	Estructura básica de una célula nerviosa típica, perteneciente al sistema nervioso central.	52
FIG 5.2	Esquema de circuitos neuronales.	53
FIG 5.3	Estructura general de un elemento de procesamiento de una red neuronal.	54
FIG 5.4	Arquitectura general de una red de propagación hacia atrás.	56
FIG 5.5	Esquema del algoritmo de minimización del Temple Simulado.	61
FIG 5.6	Diagrama de flujo de un algoritmo genético convencional.	67
FIG 6.1	Columna estratigráfica del Lago de Maracaibo.	69
FIG 6.2	Mapa de espesor del lodo en del Lago de Maracaibo.	73
FIG 6.3	Mapa de profundidad del lodo del Lago de Maracaibo.	73
FIG 6.4	Mapa de profundidad del Lago de Maracaibo.	74
FIG 6.5	Mapa de la ubicación de los lugares donde se estimaron los valores de profundidad de las capas de arcillas blandas.	74
FIG 6.6	Perfil obtenido a través de pruebas de pilotaje (Malavé, 1998).	75

FIG 6.7	Perfil obtenido a través de pruebas de pilotaje (Malavé, 1998).	75
FIG 6.8	Perfil obtenido a través de pruebas de pilotaje (Malavé, 1998).	75
FIG 6.9	Modelo del fondo del Lago de Maracaibo.	76
FIG 6.10	Data sísmica correspondiente al área de Cabimas, donde se observa pérdida de continuidad.	76
FIG 6.11	Datos adquiridos al sur de Bachaquero, donde se observa pérdida de continuidad.	76
FIG 7.1a	Modelo simple con una capa de baja velocidad.	78
FIG 7.1b	Modelo simple con capa de baja velocidad (reflector horizontal)	79
FIG 7.2a	MODELO 2 diseñado del Lago de Maracaibo (a escala).	82
FIG 7.2b	MODELO 2A. Representación detallada del MODELO 2.	82
FIG 7.3a	MODELO 3 diseñado del Lago de Maracaibo (a escala).	83
FIG 7.3b	MODELO3A. Representación detallada del MODELO 3.	83
FIG 8.1	Modelo simple completo con capa de baja velocidad (M1).	98
FIG 8.2	Secciones sísmicas sintéticas, correspondientes a M1.	98
FIG 8.3	Modelo simple con capa de baja velocidad (M1h), sin el reflector buzante.	99
FIG 8.4	Secciones sísmicas correspondientes a M1h.	99

FIG 8.5 Sección deseada.	.....100
FIG 8.6 Sección original, sección filtrada y curva de error obtenida en la aplicación del algoritmo LMS.	.....101
FIG 8.7 Sección original y sección filtrada (1) obtenida en la aplicación del algoritmo LMS.	.....104
FIG 8.8 Secciones filtradas (2), (3) y (4) aplicando el algoritmo LMS.	.....105
FIG 8.9 Secciones filtradas (5), (6) y (7) obtenidas aplicando el algoritmo LMS.	.....106
FIG 8.10 Sección original y secciones filtradas obtenidas aplicando la técnica con algoritmo genético.	.....110
FIG 8.11 Conjunto de datos tomados para el entrenamiento de la red neuronal.	...112
FIG 8.12 Red neuronal utilizada para 8.11.	.....112
FIG 8.13 Curva de error de entrenamiento.	.....113
FIG 8.14 Sección original, sección filtrada y error relativo obtenido aplicando la técnica de BPN.	.....114
FIG 8.15 Secciones sísmicas el Lago de Maracaibo zona de transición disparo en agua.	116
FIG 8.16 Secciones sísmicas del Lago de Maracaibo, disparo en tierra.	116
FIG 8.17 Secciones sísmicas del Lago de maracaibo, modelo ubicado completamente dentro del lago.	117

FIG 8.18 Sección sísmica del modelo del Lago de Maracaibo ubicado completamente dentro del lago y el sector escogido.	119
FIG 8.19 Sección sísmica original y sección filtrada obtenida aplicando BPN.	120
FIG 8.20 Sección sísmica del Lago de Maracaibo zona de transición disparo en tierra y sección sísmica recortada.	121
FIG 8.21 Construcción de una pseudo_sección deseada.	122
FIG 8.22 Segundo grupo de datos seleccionados para entrenar la red neuronal.	124
FIG 8.23 Curva de error de entrenamiento obtenida de 8.22.	125
FIG 8.24 Señal de referencia, señal filtrada y error relativo encontrado de	126
FIG 8.25 Segunda pseudo_sección construida.	127
FIG 8.26 Conjunto de datos de entrenamiento y de prueba seleccionados.	128
FIG 8.27 Curva de error de entrenamiento.	129
FIG 8.28 Señal de referencia, señal filtrada y error relativo.	130

### ***Dedicatoria***

A mi madre, Jesusita Silva.  
Por tu infinito amor, ternura y valor.  
Te amo madre.



# ***CAPITULO 1***

## ***INTRODUCCIÓN***

### ***1.1.- Adquisición sísmica y nuevas alternativas.***

El método más utilizado en la actualidad para realizar la adquisición de los datos sísmicos es el método de reflexión, debido a que ha resultado ser el más eficiente y de fácil interpretación. Sin embargo, a pesar de todos los avances instrumentales, la mayor dificultad que se presenta en la adquisición de datos sísmicos, es la presencia de fuentes de ruido e interferencias (señales no deseadas), en áreas litológicas y/o estructuralmente complejas, o en áreas en las cuales la logística utilizada en el ámbito instrumental y ambiental para asegurar la calidad de los datos no es la más adecuada. Esto disminuye el control sobre los datos adquiridos para el procesamiento y en mayor grado, obstaculiza la interpretación de los mismos.

Para minimizar los efectos de estas fuentes de ruido e interferencias en la adquisición sísmica, se han estado desarrollando y mejorando no sólo el aspecto instrumental y logístico, sino que además se ha hecho énfasis en la optimización de la forma de adquirir los datos, lo que ha estimulado el surgimiento de distintos tipos de tendidos, arreglos de fuentes y arreglos de geófonos, siendo estos últimos una de las alternativas que en la actualidad sugieren nuevas soluciones.

Los arreglos de geófonos son utilizados principalmente para minimizar el ruido coherente y/o de interferencia y reforzar el frente de ondas que proviene de los

reflectores de interés. Al variar la configuración espacial del arreglo se puede variar el patrón de directividad de recepción, que generalmente se diseña para colocar el lóbulo principal de recepción mirando hacia abajo, mejorando la relación señal ruido.

No obstante, una limitación muy importante que se presenta al utilizar los arreglos de geófonos tradicionales, se refiere a que el patrón de directividad es controlado sólo por la configuración espacial del arreglo, con lo que se obtiene un patrón de directividad estático, inflexible, que puede ser cambiado únicamente modificando la configuración espacial.

Al mirar los arreglos de receptores aplicados en otros campos de la ingeniería se observa que estos dependen de dos factores, la configuración espacial y la manera de sumar las señales, siendo esto último lo que otorga flexibilidad al arreglo, es decir se pueden obtener diferentes patrones de directividad para una misma configuración espacial, estos arreglos se conocen como arreglos adaptativos.

Una de las técnicas, proveniente del campo de las telecomunicaciones, que permite aprovechar las ventajas de estos arreglos adaptativos en el campo de la geofísica, es la técnica del *Beamforming*. Los fundamentos que permiten su utilización en la adquisición y procesamiento de datos sísmicos, están siendo desarrollados recientemente por *Schlumberger e Intevep*.

## 1.2.- Antecedentes.

### 1.2.1.- Aplicación de filtros adaptativos y Beamforming desarrollado en Schlumberger.

Dos clases de métodos de procesamiento adaptativo de señales para atenuar ruidos coherentes en datos sísmicos están siendo desarrollados en *Schlumberger*.

El primer método llamado **ACONA** ( *adaptive coherent noise attenuation* ) puede ser clasificado como una cancelación adaptativa multicanal de interferencias, aplicable a datos simples y multicomponente, usando arreglos lineales o areales, donde el filtraje es realizado por bancos de filtros multicanal. En contraste con la teoría de la cancelación de interferencia adaptativa, la señal de referencia libre de ruido no es útil, lo que ha inducido a desarrollar varias técnicas de procesamiento para general canales de referencia de ruido coherente. Estas técnicas son en realidad métodos de atenuación de ruido coherente, que buscan separar en los datos la componente de la señal y el ruido.

En la versión del método para componente simple, el *moveout* y la coherencia espacio\_temporal son usados como criterio para diferenciar entre la señal y el ruido.

En la versión multicomponente se usa la polarización como un criterio adicional para la diferenciación.

En la FIGURA N° 1.1,  $G_i$  representa el grupo de sensores que registran las señales  $g_{kj}(n)$ ,  $k=1,...,k$  y  $j=1,2,...$ , el índice  $n=1,2,...,N$  registra el tiempo discreto con un intervalo simple  $\Delta t$ . Al realizar el registro de las señales uno de los sensores se designa como primario  $D(t)$ , el cual recibe la señal distorsionada,  $S(t)$ .

Lo que se busca es incrementar la relación señal/ruido, atenuando la interferencia usando un proceso adaptativo que usa canales de interferencia de referencia  $X_r(t)=F[g_{kj}(n)]$ , siendo  $F$  un operador conocido que se define dependiendo de la aplicación particular, y  $r=1,2, \dots, R$  el número de canales de referencia.

El principal objetivo de este método es atenuar el ruido coherente dispersivo, no estacionario y *aliasin* en la presencia de perturbaciones de fase y amplitud.

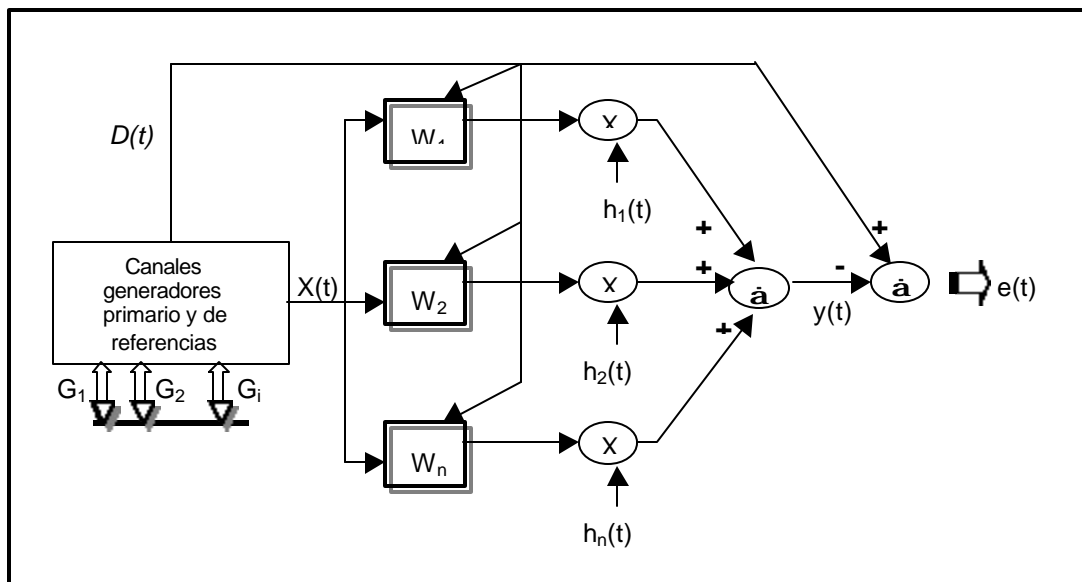


FIGURA N° 1.1, muestra el esquema del sistema concebido, según la aplicación del método desarrollado por Schlumberger.

El segundo método llamado **LACONA** (*adaptive beamforming with linear generalized constraints*), es una implementación del *beamforming* adaptivo linealmente restringido por un banco de filtros adaptivos multicanal. El objetivo de este diseño es preservar la señal incidente en un rango de direcciones mientras se suprimen las interferencias incidentes en otras direcciones. Es aplicable a registros de datos tanto con arreglos lineales como areales y los receptores pueden estar iguales o desigualmente espaciados.

Este método puede ser visto como un filtro adaptativo  $f_k$ , que es adaptado “destruictivamente” en aquellas partes del espacio  $f_k$  que contiene ruido y es “constructivo” en las regiones del espacio  $f_k$  que contiene la señal a preservar, tal que una señal sísmica arbitraria pero con un contenido espectral previamente definido en el dominio  $f_k$  es pasada mientras que el ruido coherente y las componentes de interferencia que son temporal y espacialmente no estacionarias son filtradas adaptivamente.

La metodología se fundamenta en un diseño de restricción generalizado, que considera la incorporación de una respuesta estacionaria prediseñada en el *beamforming*, esta respuesta estacionaria es la respuesta del *beamforming* ante la presencia espacial y temporal de ruido blanco, tal que se fuerza la respuesta del *beamforming* en las regiones seleccionadas en el espacio  $f_k$  para ser controladas por

esta respuesta estacionaria, lo que permitirá la preservación y robustez de la señal ante la perturbación.

### 1.2.2.- Metodología del Beamforming desarrollada en PDVSA\_Intevep.

Actualmente sólo se conocen dos metodologías de la técnica del *Beamforming* aplicada en la adquisición de datos sísmicos, una desarrollada por Schlumberger y la otra desarrollada por Intevep, que fue probada en un modelo bastante simple e ideal cuyas propiedades distan mucho de las encontradas en la realidad, este modelo se muestra en la FIGURA N° 1.2, MODELO 1.

La técnica desarrollada por PDVSA\_Intevep se basa en la aplicación del algoritmo LMS, con el cual se puede realizar la suma ponderada de las señales recibidas por cada elemento, en un arreglo de geófonos con una configuración espacial definida, dando como resultado la preservación de las señales provenientes en una dirección de interés y la eliminación o atenuación de las señales no deseadas que arriban en una dirección o direcciones distintas.

Con base en esto se hace estrictamente necesario, en el caso de la metodología desarrollada por Intevep, evaluar que tan efectiva es la técnica del *Beamforming* en modelos más complejos, más cercanos a la realidad, como responde ante variaciones en la relación señal/ruido y como responde a señales de entrada diferentes.

Por otra parte, si la técnica muestra ser eficiente y/o según las deficiencias encontradas se buscó en el primer caso, optimizar su funcionamiento y en el segundo se evaluaron técnicas más avanzadas y/o específicas.

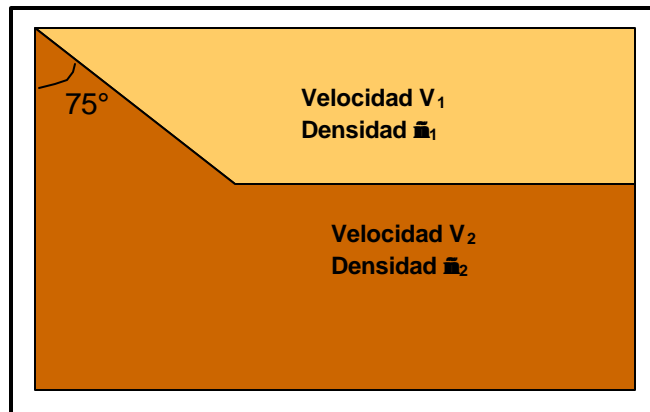


FIGURA N° 1.2. MODELO 1, Modelo utilizado para evaluar el funcionamiento de la técnica del *Beamforming*, según la aplicación implementada por Intevep (Segovia, 2000).

### **1.3.- Objetivos.**

En este trabajo de grado se fijaron como objetivos principales:

1. Aplicar las técnicas de diseño de arreglos direccionales de geófonos recientemente desarrollados en Intevep a modelos geológicos más representativos de la realidad.
2. Evaluar técnicas más avanzadas y/o específicas, como lo son los métodos de optimización global, para el diseño y aplicación de arreglos direccionales de geófonos.
3. Convertir los algoritmos y subrutinas desarrolladas a una plataforma de programación estándar (C, Fortran, o equivalente).
4. Elaboración de un informe técnico.

## ***CAPITULO 2***

### ***CAMPO ELÁSTICO***

En este capítulo se hace una breve descripción de las características, clasificación y relaciones básicas que rigen un medio elástico, siendo parte de estos fundamentos los que sirvieron de base en el desarrollo e implementación de las técnicas no convencionales de procesamiento realizados en este trabajo, también se hace la descripción de la estructura y funcionamiento del algoritmo diseñado para la construcción de los distintos modelos, así como una breve descripción del fundamento teórico y funcionamiento del programa de simulación utilizado para la generación de los datos sintéticos correspondientes.

#### ***2.1- Introducción.***

La caracterización de un material o medio se realiza según las propiedades elásticas del mismo a lo largo de ciertas orientaciones espaciales con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, de la cual no dependen estas propiedades ya que son intrínsecas al medio.

Sólo en el tramo o-a, FIGURA N° 2.1, la pendiente es constante tal que se puede expresar la fuerza en función del alargamiento como,  $F = -K \cdot X$ .

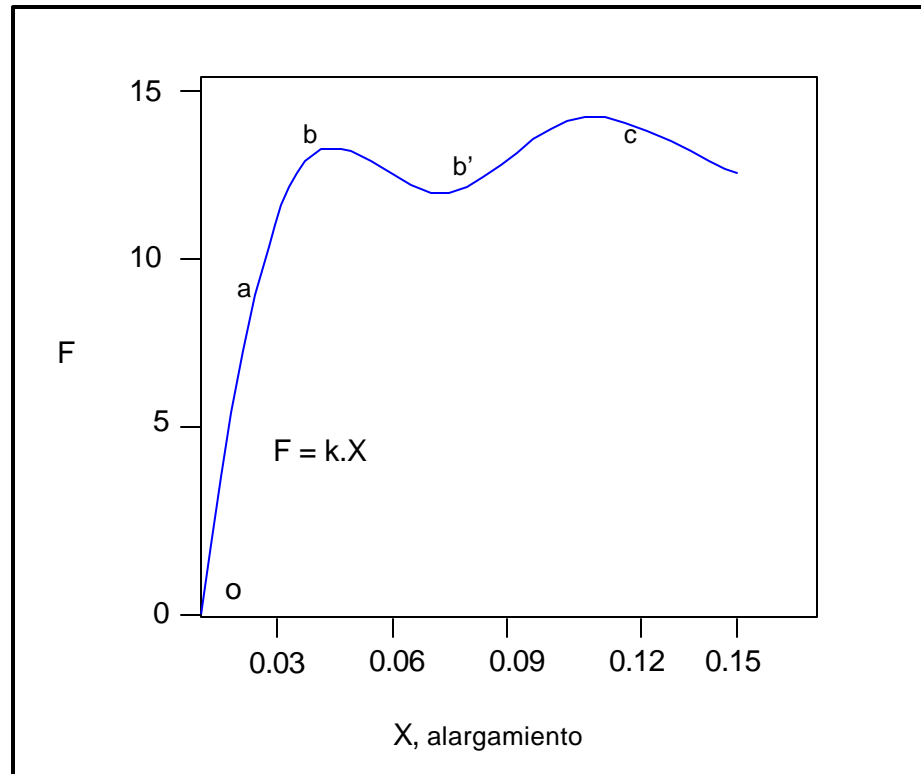


FIGURA N° 2.1, representación grafica de la respuesta típica en función del alargamiento de una barra de aluminio sometida a una tensión, al serle aplicada una fuerza  $F$ .

## 2.2.- Medio elástico.

A un cuerpo con el comportamiento mostrado en el tramo **o-a** de la FIGURA N° 2.1 se le llama elástico, es decir, recupera su forma al cesar la fuerza  $F$ , a partir del punto **b** el cuerpo ya no recupera su forma original, es decir, el cuerpo sometido a una tensión sufre un cambio, una deformación.

La *deformación* es una medida del cambio de dimensiones o forma del cuerpo producida por una fuerza externa, que se expresa en unidades adimensionales.

La *tensión*, es la intensidad de la fuerza que actúa en un cuerpo, en términos de la fuerza por unidad de área.

Luego, "Todo material para el cual su campo de deformación, al ser rotado una cantidad finita por la acción de un operador vectorial lineal de rotación rígida (rotación



de un cuerpo rígido) es idéntico al generado por la aplicación de un campo de esfuerzo”, se dice posee *simetría material*, (Noguera, 1995).

Es decir, este operador expresa sólo el efecto cinemático de rotar el campo de desplazamiento, sin modificar su magnitud y simultáneamente esta rotación es igual en modulo a la obtenida mediante la aplicación de un campo de esfuerzos, según la Ley de Hooke generalizada.

La *simetría reflexional* respecto a un plano normal  $X_i$ , hace que la fuerza tangencial requerida para un cizallamiento simple en la dirección de  $X_i$ , donde  $X_i$  es una constante, sea igual en magnitud, pero opuesta en dirección a la requerida para producir una cizalla en la dirección negativa de  $X_i$  en el mismo plano, (Noguera, 1995).

El conjunto de tensores, tensor de rotación y tensor de reflexión que definen las propiedades de la simetría de un material, se denominan Grupo de Simetría Material.

Para un material *isotrópico*, el grupo de simetría incluye todas las rotaciones respecto a todos los ejes posibles y las reflexiones en un plano, a esto corresponden todos los tensores ortogonales o Grupo Ortogonal Total en  $R^3$ .

Un material es *hemitrópico*, si su grupo de simetría consta de todas las rotaciones pero no incluye las reflexiones.

Los materiales *anisotrópicos* presentan menor simetría material que un material isotrópico, denominado Grupo Ortogonal Total,

Para un material *transversalmente isotrópico* respecto a un eje dado, el grupo de simetría incluye todas las rotaciones en torno a este eje específico.

Un material *ortotrópico*, presenta simetría reflexional con respecto a cada uno de los tres planos mutuamente perpendiculares entre sí, (Noguera, 1995).

## 2.3- Tensor elástico.

Un esquema que explique el proceso de propagación ondulatorio en un medio continuo se fundamenta esencialmente en la forma funcional en que es expresada la relación esfuerzo/deformación (E/T).

Si esta relación está en función de la duración temporal del proceso mecánico, se tiene que las propiedades del medio se expresan como fenómenos de viscosidad, fluencia, etc.

Si la relación (E/T) depende de la magnitud de E o T, sé esta ante un proceso de plasticidad, (Noguera, 1995).

Por otra parte, si se consideran sólo los procesos elásticos dentro del campo de la elasticidad clásica, *i.e* la relación (E/T), según pequeñas variaciones del tensor deformación, las propiedades del tensor elástico para un medio ortotrópico son:

- $\overline{\overline{C}}$ , relaciona dos tensores simétricos, el tensor esfuerzo,  $\overline{\overline{E}}$ , y el tensor deformación,  $\overline{\overline{T}}$ , mediante la Ley de Hooke Generalizada:  
$$\overline{\overline{T}} = \overline{\overline{C}} : \overline{\overline{E}}$$
- $T_{ij} = C_{ijkl}E_{kl}$ ,  $\forall i, j, k, l = 1, 2, 3$  (escribiendo la expresión en notación indicial).
- El tensor elástico es una propiedad del medio e independiente de los tensores  $\overline{\overline{T}}$  y  $\overline{\overline{E}}$ .
- $\overline{\overline{C}}$  es un tensor de cuarto orden, compuesto por 81 componentes, que puede ser representado mediante un sistema de coordenadas cartesianas, mediante una matriz 9\*9.

Dada la anisotropía elástica en un punto que pertenece a un medio, los coeficientes  $C_{ijkl}$  que representan esta propiedad elástica dependen de las direcciones de este medio, tal que los parámetros (coeficientes) toman diferentes valores para las diferentes direcciones de los ejes cartesianos. Luego el total de grados de libertad que

permiten ordenar independientemente la matriz  $\overline{\overline{C}}$ , considerando que  $\overline{\overline{T}}$  y  $\overline{\overline{E}}$  son tensores simétricos de segundo orden es de 36 componentes independientes.

Estableciendo que la condición termodinámica bajo la cual ocurre la deformación, es adiabática e isotérmica, por la primera Ley de la Termodinámica, se tiene que la variación interna,  $U$ , de un sólido deformable es:

$$U = Q \pm V$$

$Q$  : cantidad de calor absorbido.

$V$  : cantidad de trabajo realizado por el sólido.

En caso de un sólido elástico,  $U = Q + T_{ij}E_{ij}$ . Si el proceso de deformación es muy rápido, el sólido no gana ni pierde calor, lo que implica que  $Q \approx 0$  y  $U = V = T_{ij}$ , donde  $V$  es la energía potencial.

La energía potencial elástica acumulada dentro de un sólido deformable, sometido a tracciones y en consecuencia a deformaciones, está dada por :

$$V = \frac{1}{2} C_{ijkl} E_{ijkl} \text{ o } V = \frac{1}{2} T_{ij} E_{ij}$$

Operando se obtiene que la nueva condición sobre los coeficientes elásticos implica una reducción de 36 a 21 elementos, es decir un tensor elástico y adiabático consta de 21 constantes elásticas.

También se puede demostrar que un cuerpo con :

- Un sólo plano de simetría, posee 13 constantes elásticas independientes.
- Dos planos de simetría, perpendiculares entre sí, tiene 9 constantes independientes.
- Tres planos de simetría, perpendiculares entre sí, *cuerpo ortotrópico*, posee sólo 3 constantes independientes.

Existen varias razones por las cuales una roca presenta anisotropía, rocas que presentan un ordenamiento espacial o dirección preferencial de cristales, granos, microfracturas, planos de laminación, y/o fracturas más pequeñas que la longitud de onda.

Las rocas que presentan anisotropía son generalmente lutitas y rocas sedimentarias debido a la orientación preferencial de grano, estratificaciones finas de lutitas y arenas, y fracturamientos. Los carbonatos presentan anisotropía cuando están fracturados.

El comportamiento anisotrópico de la roca, como se indicó, depende de los coeficientes elásticos, luego la anisotropía sísmica puede ser clasificada, en 4 grupos, medio isótropo, medio ortotrópico, medio transversalmente isótropo, y medio con anisotropía ortorrómbica.

El medio en cual se generaron los distintos modelos utilizados en este trabajo, es un medio isótropo, posee dos constantes elásticas independientes que expresadas en función de los parámetros de Lamé son:

$$C_{33} = \bar{e} + 2*\bar{i} = \hat{E} + \frac{4}{3} \bar{i}$$

$$C_{44} = \bar{i}$$

Donde la expresión del tensor elástico se reduce a:

$$= C = \begin{bmatrix} C_{33} & C_{33} - 2*C_{44} & C_{33} - 2*C_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{33} & C_{33} - 2*C_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix}$$

## 2.4.- ANISO 2D.

Para la generación de los datos sintéticos de los distintos modelos bidimensionales con un máximo de hasta 7 capas, se uso el programa ANISO2D, codificado en Fortran 77, desarrollado por John T. Etgen.

La herramienta ANISO2D es un programa de diferencias finitas que permite simular la propagación del campo de onda completo en medios elásticos 2D isótropos ó con anisotropía transversal (VTI).

El *método de diferencias finitas*, usa operadores equidistantes centrados de diferenciación espacial entre puntos de un “*grid*” (rejilla), para representar los esfuerzos y desplazamientos (deformaciones) en este “*grid*”.

El campo de ondas, ya sea para medios sólidos y/o líquidos es calculado con la misma ecuación, y los límites entre capas se establecen por cambios en las constantes elásticas calculadas para cada punto del “*grid*”. No hay que definir condiciones de contorno y la única condición de superficie libre esta incorporada hacia el tope del modelo.

El método de diferencias finitas utilizado está basado en un “*grid*” espaciado y en el operador de derivada convolucional exacto (Mora P, 1986), que resuelve la ecuación de onda elástica. isotrópica en 2D para ondas P y Sv, pero adaptado para desplazamientos en tiempo en lugar de esfuerzo.

El modelo de amplitud del campo de onda para el proceso 2D esta definido para una línea de fuentes.

Por otra parte, este algoritmo requiere que el intervalo de muestreo sea  $\leq 0.5\text{mseg}$ , para no crear conflicto en las ecuaciones y que los receptores se ubiquen a una profundidad  $>2$  puntos del “*grid*” para evitar problemas de contorno, FIGURA N° .2.3.

También se requiere que se cumplan las condiciones de:

$$\frac{V_{\min}}{f_{\max} \times d_x} \geq 2.8 \quad y \quad \frac{V_{\max} \times dt}{d_x} \leq \frac{1}{2}$$

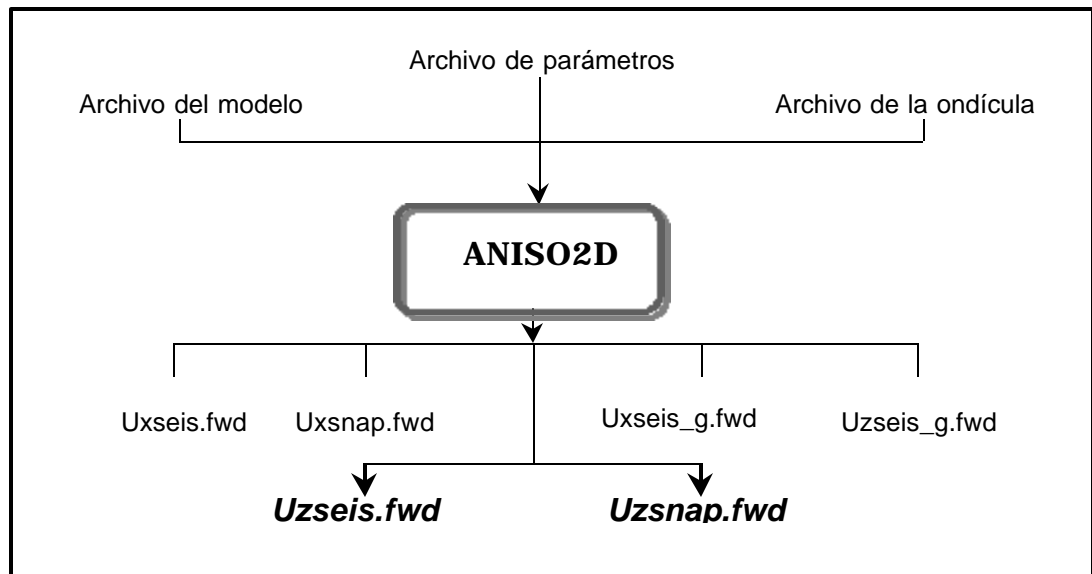


FIGURA N° 2.2.-Muestra los archivos de entrada y salida de la versión del programa ANISO2D utilizado.

Para generar **el modelo**, ANISO2D requiere de 3 archivos de entrada, un archivo1.out que contiene las características de la ondícula; un archivo2.out o “archivo del modelo” que puede ser elaborado en Fortran o cualquier otro programa estándar, y que contiene los valores de las constantes elásticas y de densidad para cada nodo del “grid”, y un tercer archivo que contiene los parámetros de adquisición.

La dimensión de los modelos se establece con nx (distancia horizontal), nz (profundidad) y nt (tiempo de muestreo en ms).

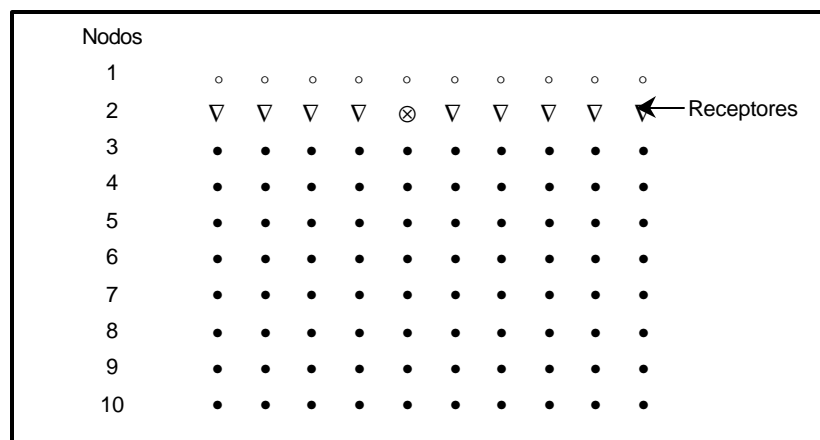


FIGURA N° 2.3.-Ejemplo de una posible distribución de nodos •, receptores ▽ y fuente ⊗.

**El archivo de ondícula:** es un archivo binario que contiene los valores en tiempo de la amplitud (forma de onda) del *shot* que se utiliza en la simulación. Se genera con rutinas auxiliares de SEPLib (*Stanford Exploration Project Library*). Los tres tipos de ondículas que usualmente se utiliza se denominan como Ricker0, Ricker1 y Ricker2, FIGURA N° 2.4.

El archivo que contiene el tipo de ondícula se identificó como *wavelet.out* y se trabajo con una ondícula tipo Ricker1, FIGURA N° 2.5.

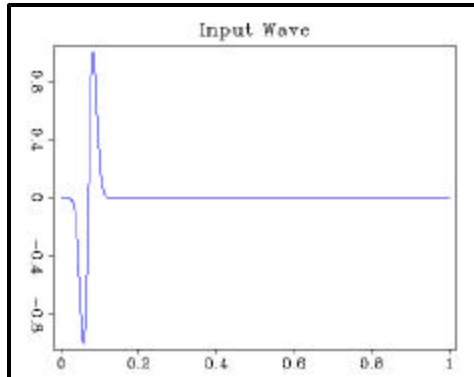


FIGURA N° 2.5.-Ondícula tipo Ricker1 utilizada.

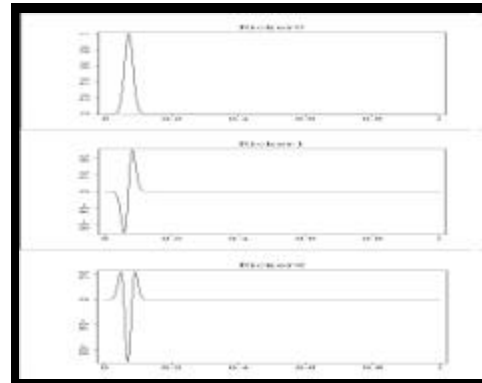


FIGURA N° 2.4.-Tipos de ondículas  
Tomado de Modelaje Sísmico y  
Simulación Numérica.  
PDVSA\_Intevep.

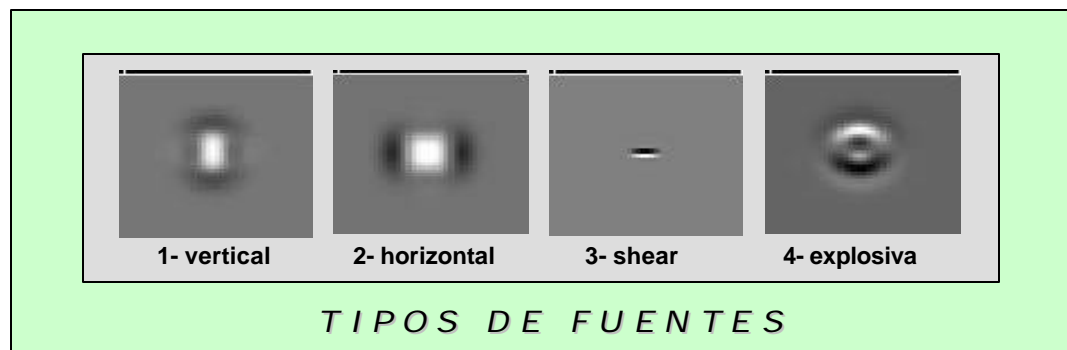


FIGURA N° 2.6.-Modelos de tipos de fuentes disponibles para el programa ANISO 2D  
tomado de Modelaje Sísmico y Simulación Numérica. PDVSA\_Intevep, 1999.

**Archivo de parámetros:** es un archivo tipo texto en el que se especifican valores de ciertas variables físicas y de control computacional.

```
$parms
dt=0.0005,      <----dt=paso en tiempo
nt=2000,        <----nt=No.de muestras en tiempo
ntsource=1200,  <----ntsource=duración del shot
ngroup=200,     <----ngroup=No.de detectores
nx=200,         <----nx=No.de pixels en x
nz=200,         <----nz=No.de pixels en z
dz=10.,        <----dz=paso espacial en z
dx=10.,        <----dx=paso espacial en x
nsrc=1,         <----nsrc=no.de shots
src_1=100,      <----src_1=posición del primer shot
src_inc=1,      <----src_inc=incremento entre shots
src_depth=20,   <----src_depth=profundidad de la fuente
src_type=4,     <----src_type=tipo de fuente
surf_type=0,    <----surf_type=tope del modelo abs/reflec
group_1=1,      <----group_1=posición del primer grupo
geo_depth=5,    <----geo_depth=profundidad de detectores
snap_i=100,     <----snap_i=intervalo entre snapshots
vpmax=3000,     <----vpmax=Vp máxima del modelo
$end
```

**El archivo de modelo:** es un arreglo bidimensional que contiene los valores de densidad ( $\rho$ ).y tensor elástico ( $C_{ij}$ ) para cada punto de la malla discreta sobre la cual se desarrollan las diferencias finitas. Un medio isótropo de N capas se define especificando los valores de  $\{C_{ij}\}$  en cada punto, calculados a partir de valores de  $\rho$  y  $V_p$  conocidos.

El archivo es de tipo binario y se produce generalmente a partir de un programa en lenguaje de alto nivel, como Fortran o C., en el que los valores de  $C_{ij}$  en cada punto definen una geometría de capas simple. Para el caso de modelos complejos se puede utilizar el programa ps2mod para generar el archivo de modelo.(tomado de Modelaje Sísmico y Simulación Numérica. PDVSA\_Intevep, 1999).



**El archivo que contiene el modelo:**, en este trabajo se generó un programa elaborado en Fortran 77 denominado **Gmodel.f**, que asigna los respectivos parámetros elásticos a cada nodo, según las condiciones establecidas en un archivo de entrada "**archivo.dat**"<sup>1</sup> a este algoritmo.

Gmodel.f es un programa elaborado en Fortran 77 que considera capas de diversas configuraciones espaciales de reflectores de 2 dimensiones. Este programa está compuesto de dos bloques.

**Un bloque** en el cual se realiza la lectura secuencial del archivo de datos, que contiene los parámetros de entrada al programa. En este **archivo de datos**, el usuario asigna los valores que en el arreglo bidimensional del modelo, van a delimitar la geometría y configuración espacial de los reflectores a general, la estructura de este archivo de datos es:

IDENTIFICACIÓN DEL ARCHIVO = nombre asignado al archivo.

NX = tamaño del arreglo bidimensional en la dirección X, o el número de nodos en la dirección X, que tomara el simulador ANISO 2D, para la generación de los datos sintéticos.

NZ = tamaño del arreglo en la dirección Z, o número de nodos en profundidad que tomara el programa ANISO 2D.

NI = número de interfases que contiene el modelo, para más detalle ver el EJEMPLO N°1, FIGURA N° 2.7.

factorce = factor que en el programa se aplica sobre algunos de los coeficientes elásticos, en los casos que aquí son de interés, modifica al elemento  $C_{44}$  perteneciente al tensor elástico definido para un medio isótropo.

A continuación se asignan los conjuntos, de pares de nodos que van a general los perfiles necesarios que permitirán, separar los medios que presentan distintas propiedades elásticas.

Cada conjunto de datos de pares de nodos, para evitar confusión, se recomienda sea identificado, por ejemplo la identificación usada en todos los modelos fue como, “Perfil Nro 1”, “Perfil Nro2” etc.

El conjunto de datos de los perfiles fue diseñado para ser leído de la siguiente forma:

- 1ro La identificación, “Perfil Nro 1”.
- 2do Número de quiebres de la interfaz correspondiente, sumándole 1 (esto es debido al diseño del bloque de lectura).
- 3ro Se colocan los pares de coordenadas (X;Z), que van a determinar la geometría del perfil.

Finalmente se asignan los pares de valores de densidades y velocidades correspondientes a cada medio, esto se hace:

- 1ro Es leído el título que indica que se van asignar las velocidades y densidades, lo que se hace para evitar confusión con el resto de los datos.
- 2do Se asigna primero el valor de velocidad seguido del valor de densidad en cada par.

El archivo de datos, en la medida que es leído se le da salida por pantalla, esto se hace como control de calidad, para verificar que no hay errores de lectura o escritura en el archivo de datos de entrada, que es el núcleo alrededor del cual se ejecuta el algoritmo.

En **el segundo bloque** se procede a calcular las componentes del tensor elástico y asignarlas con las correspondientes densidades a cada nodo de la malla discreta definida.

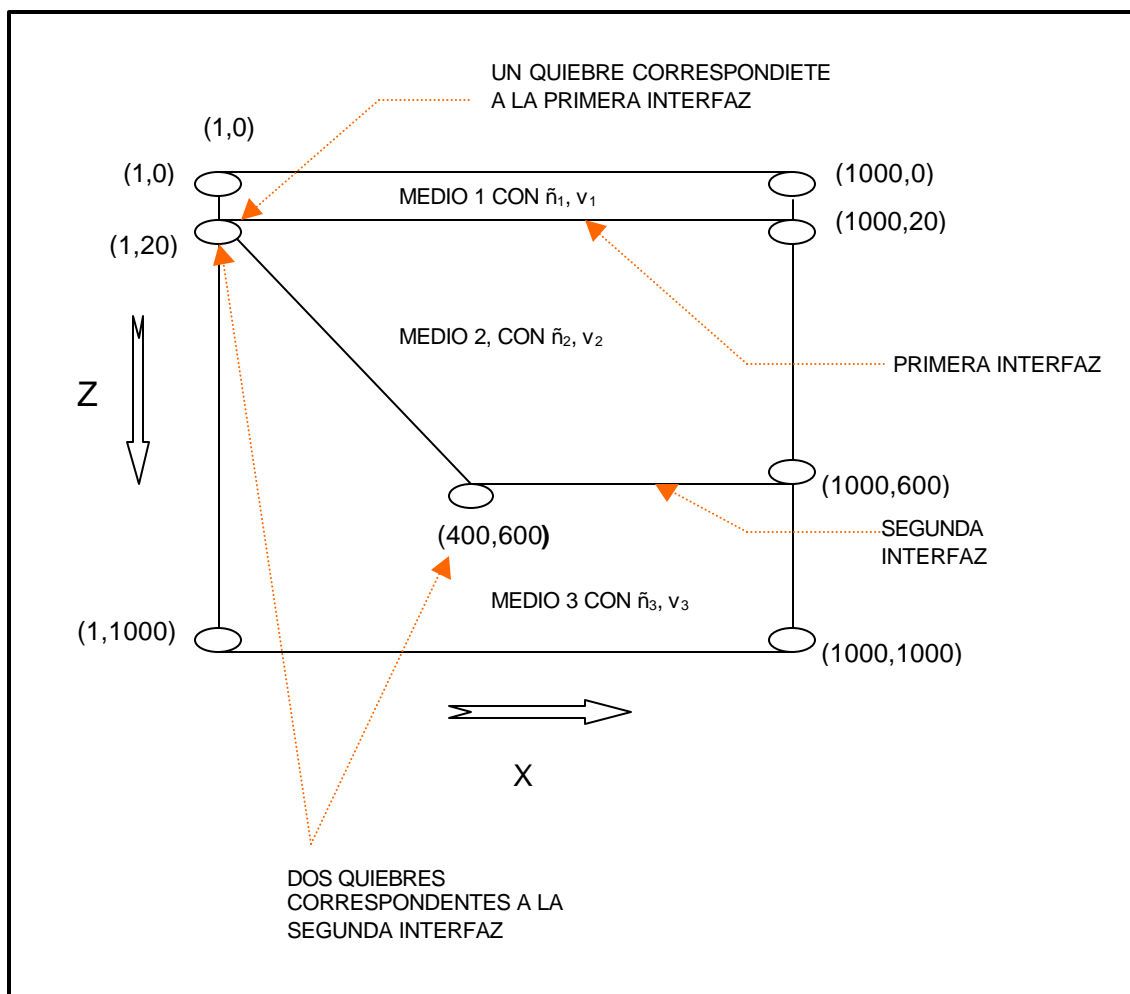


FIGURA N° 2.7.-EJEMPLO N°1, ilustra las condiciones y conceptos bajo los cuales se crea el archivo de datos para la generación de los modelos.

**El archivo de *movie*:** es una secuencia temporal de imágenes que muestra la evolución en tiempo del campo de onda propagándose sobre el modelo introducido en la simulación. Se visualiza con rutinas especiales de SEPLib (Stanford Exploration Project Library)

La visualización y verificación de la correcta generación del modelo se hace mediante una subrutina elaborada por Michelena de PDVSA\_Intevep, que corre bajo el sistema operativo UNIX y esta identificada como **modev.m**.

La salida de la ejecución del ANISO2D, contempla 6 archivos, FIGURA N° 2.2, siendo los de interés los archivos:

***Uzseis.fwd*** contiene la información de las trazas de componente vertical.

***Uzsnap.fwd*** presenta una animación de la propagación del campo de ondas componente vertical.

A continuación se muestran algunos ejemplos de los modelos que fueron generados y ejemplos de otros que pueden ser generados por el algoritmo Gmodel.

El primer modelo emula un corte transversal del subsuelo, compuesta de tres capas, en el cual la tercera capa esta compuesta de un reflector buzante y un reflector horizontal.

El segundo modelo representa una variación en los espesores del primero.

El tercer modelo representa una zona del subsuelo compuesta de tres capas con una falla normal.

El cuarto emula una zona con capas con distintos buzamiento y la presencia de un domo.

El quinto y sexto representan a los dos modelos simplificados que se diseñaron del Lago de Maracaibo, los cuales se explican con detalle en el capítulo 7.

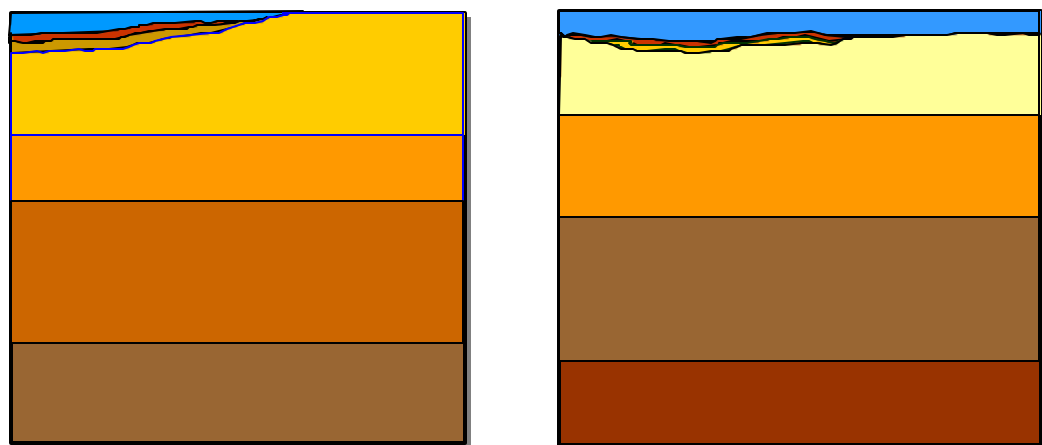
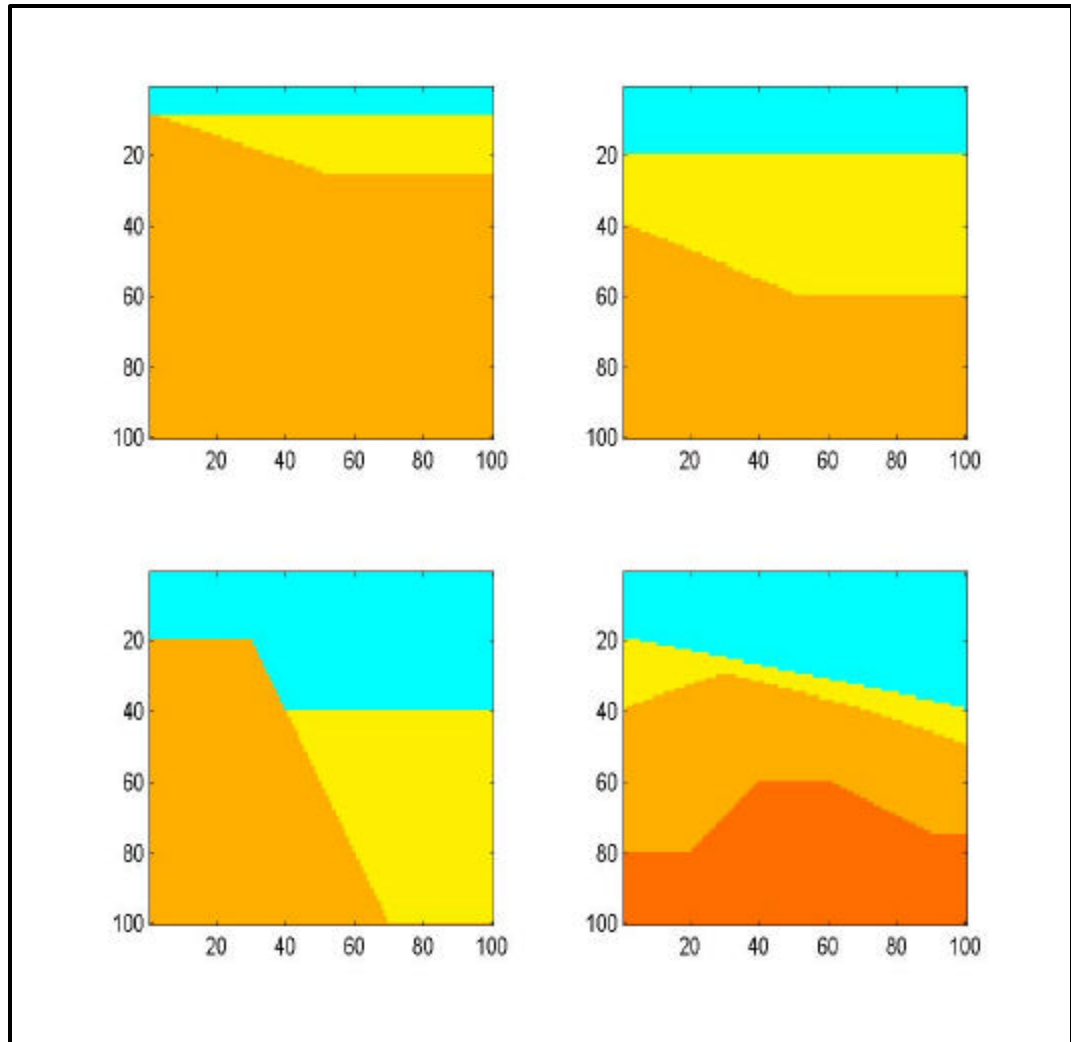


FIGURA N° 2.8.- Ejemplos de modelos generados con el programa Gmodel.

## ***CAPITULO 3***

### ***Proceso adaptativo***

En este capítulo se hace una breve exposición de lo que es un arreglo de geófonos y se presenta una introducción de lo que significa un proceso adaptativo, un arreglo adaptativo y su estructura básica, un filtro adaptativo, sus componentes, utilidad y aplicabilidad. El conocimiento previo de los conceptos aquí expuestos, es fundamental para la comprensión de los métodos utilizados a lo largo de este estudio.

#### ***3.1.-Introducción.***

En un sistema de procesamiento convencional de señales, la extracción de información de una señal de entrada, se realiza a través de un filtro que opera en un modelo abierto o sin realimentación, en el cual la misma función de procesamiento es llevada al siguiente intervalo de tiempo a pesar del peso que la función produce en el resultado correcto del próximo intervalo de tiempo, esto obedece a que la técnica de procesamiento convencional asume que “la degradación de la señal es conocida y cuantitativamente invariante en el tiempo”.

El proceso adaptivo, por otra parte opera dentro de un modelo cerrado o de realimentación, donde una señal de entrada  $s(n)$  es filtrada o pesada con un filtro programable, que tiene una salida  $(n)$ , la cual es luego comparada con la condición o señal de interés  $y(n)$ , para obtener un error  $e(n)$ , que es usado para actualizar el

proceso de pesado de parámetros en un ciclo iterativo que permite al proceso adaptivo dar una salida cada vez más cerca de la señal deseada, tal como se muestra en la FIGURA N° 3.1.

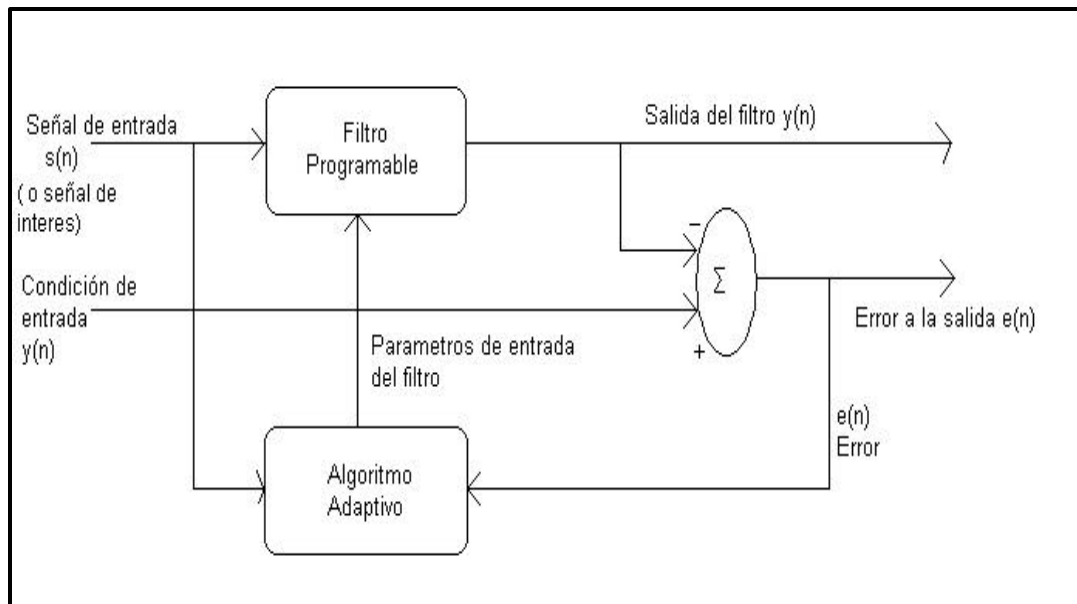


FIGURA N° 3.1, esquema de un proceso adaptivo.

### 3.2.- Arreglo de geófonos.

Un arreglo de geófonos es la conexión de un grupo de receptores cuyas señales son sumadas electrónicamente. Los receptores en un arreglo son colocados en una cierta configuración espacial cuya finalidad es atenuar el ruido y/o señales particulares no deseadas y/o reforzar las de interés. *Los arreglos de fuentes* se realizan con el mismo objetivo consistiendo en la disposición espacial de las fuentes en una configuración dada. Los arreglos pueden ser sólo de receptores, fuentes o una combinación de ellos.

Cuando se diseña un arreglo de geófonos se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Consideraciones de diseño.
- Número de elementos receptores, cables.
- Tipos de ruidos.
- Topografía.

Los tipos de arreglos más utilizados son, el horizontal, el vertical, uniforme o lineal, arreglos pesados y arreglos areales. El arreglo es uniforme o lineal, cuando los elementos son colocados a lo largo de una línea sísmica uniformemente espaciados.

La respuesta es generalmente representada por una gráfica en coordenadas polares que muestra el patrón de directividad del arreglo, siendo el radio la respuesta en amplitud, suponiendo todos los geófonos conectados en una sola posición.

Si se colocan un número distinto de receptores en cada punto, se está ante un arreglo pesado. Otra forma de realizar un arreglo pesado sin variar el número de receptores en cada posición es realizando una suma ponderada, con el objetivo de asignarle un peso distinto a la señal de cada receptor.

En la adquisición de datos sísmicos el objetivo de los arreglos de geófonos es colocar el lóbulo principal de recepción mirando hacia abajo, según una configuración espacial que determina el patrón de directividad, el cual en muchos caso no produce los resultados esperados por no cumplirse las condiciones óptimas. Actualmente se están desarrollando y aplicando nuevas técnicas en las cuales el patrón de directividad depende no sólo de la configuración espacial sino también del tipo de suma ponderada de las señales de cada receptor.

### ***3.3.- Arreglo adaptativo.***

Desde hace tiempo se vienen aplicando técnicas adaptativas a los problemas de procesamiento de señales en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y también en el dominio espacial. Para aplicar esta última se necesita disponer de un arreglo de dos o más elementos sensores independientes, espacialmente separados, siendo esta separación la que permite realizar la recepción de las señales en un rango de sensibilidad dado, que se puede variar direccionalmente.

Dependiendo de la aplicación estos elementos sensores pueden ser diseñados para la recepción de ondas electromagnéticas (dipolos), receptores de señales acústicas (hidrófonos), señales sísmicas (geófonos), etc.

Luego los arreglos adaptativos son esencialmente, procesadores multicanales adaptativos de señales, y una antena adaptativa o sistema en forma radial adaptativo, consisten de un conjunto de elementos sensores dispuestos espacialmente, conectados a un procesador de señal, simple o multicanal.



Estos arreglos pueden ser usados para eliminar la interferencia o señales que no son de interés, en una dirección dada, por una “cancelación adaptativa” o “cero adaptativo”, con lo que se busca mejorar la relación señal/ruido. Siendo esta la aplicación que se implementó, a lo largo de este trabajo, utilizando  $n$  arreglos adaptativos de receptores de señales sísmicas.

Al nivel de procesamiento aplicando algoritmos adaptativos, estos arreglos de receptores, pueden por sí mismo ajustarse, dirigirse automáticamente para dejar fuera las señales de interferencia, a lo largo de las direcciones de arribo de las diferentes señales, también es posible determinar la dirección de arribo de las señales en presencia de interferencias, y separar las señales débiles de las fuertes, tanto para las diferentes señales como ángulos de arribo.

Una de las técnicas de procesamiento adaptativo más simples y efectivas, es la cancelación de ruido adaptativo lobular inventada por Howells, 1950 y desarrollada por Howells\_Applebaum, FIGURA N° 3.2.

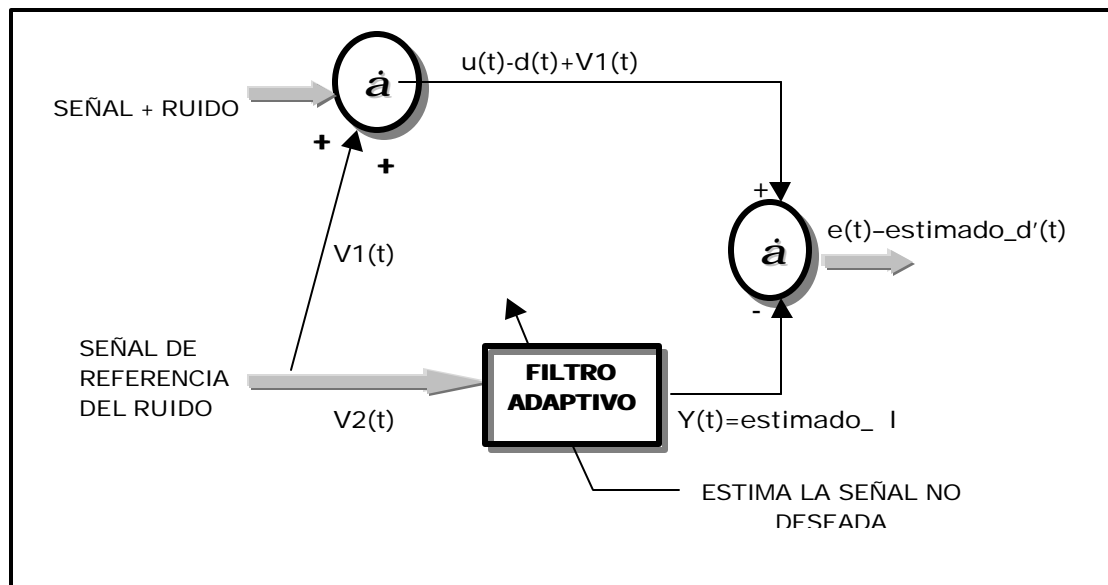


FIGURA N° 3.2, esquema del modelo simple de cancelación lobular desarrollado por Howells\_Applebaum.

Como se muestra en la figura N° 3.2, la entrada primaria  $u(t)$  contiene la señal más el ruido, un filtro adaptativo es usado para estimar el ruido de  $u(t)$  y esta estimación  $y(t)$  se resta del canal primario, tal que la salida del cancelador de ruido es  $e(t)$ .

Los dos elementos sensores son unidireccionales (igual sensibilidad en todas direcciones), ambos primario y de referencia reciben la señal y la interferencia, y como existe una separación local, sus salidas no son idénticas, pero están relacionadas en función del tiempo.

El filtro adaptativo contiene una componente de interferencia, cuyas componentes, por medio de la aplicación de un algoritmo adaptativo se van haciendo similares a la componente de interferencia del primario, luego la señal de salida es igual a la componente de la señal primaria menos la componente de la señal de referencia filtrada, eliminando así a la salida la señal de interferencia (Widrow, 1997).

Sobre este modelo simple se fundamenta la implementación que se hizo de la técnica del *Beamforming*, pero aplicando la idea de “señal piloto” descrita en el capítulo 4, sección 4.2, utilizando algoritmos de búsqueda local y global, y asumiendo tal como lo indica la estructura del modelo que se conocen las características y dirección de arribo de la señal, ya que el principal objetivo era probar que se podía implementar la idea del *Beamforming* desarrollada especialmente para aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones, en el área de la geofísica, específicamente en la etapa de adquisición

Este trabajo es el segundo estudio realizado por PDVSA\_Intevep en este sentido, en el primer trabajo desarrollado, (Segovia, 2000), se aplicó esta técnica usando un algoritmo de búsqueda local en un modelo simple, lo cual se reseña brevemente en los antecedentes. En este trabajo se aplicó esta técnica usando el algoritmo de búsqueda local ya probado, en modelos más complejos y también se implementó la idea utilizando algoritmos de búsqueda global.

En el caso de la aplicación de esta idea en el área de la geofísica, se conoce que en general, la suma total de la señal de salida que se espera es incierta, puesto que la convergencia de la función de transferencia del filtro o filtros de ajuste es impredecible por la falta, en detalle, del conocimiento previo de las características y dirección de arribo de las señales tanto de interferencia como las señales de interés.

### **3.4.- Filtro adaptativo.**

Para ejemplificar la utilidad y aplicabilidad de este tipo de filtro, se expone la siguiente situación:

En una sala de conferencia se tiene un expositor y al público asistente, externos a estos, y en una dirección dada, un “martillo neumático contamina el discurso”. Una forma de solucionar esto es colocar otro micrófono cerca del martillo neumático, y mediante un filtro adaptativo, estimar el ruido que se suma a la señal, para luego restarlo y obtener así la señal de interés, en este caso la voz del orador.

Uno de los filtros que permite estimar una señal a partir de otra, conociendo la correlación cruzada entre ellas de antemano, se conoce como filtro Weiner, el cual es un filtro de respuesta impulsiva infinita (FIR) estático en el que sus coeficientes no varían con el tiempo, por lo que funciona solo para procesos estacionarios.

Pero en muchos procesos como el que se expuso en el ejemplo, o como en el caso que concierne a este trabajo, adquisición de señales sísmicas, se necesita un filtro que se adapte a procesos no estacionarios o filtro adaptativo, ya que en el mundo real por lo general los procesos no son estacionarios.

Un filtro adaptativo es un filtro cuyos coeficientes son actualizados por un algoritmo, para optimizar su respuesta según un criterio o criterios preestablecidos.

En general, estos filtros consisten de 2 partes, un filtro que es diseñado para lograr la función deseada sobre la señal de entrada y un algoritmo adaptativo que ajuste los coeficientes del filtro, hasta lograr ubicar el resultado de salida en el rango deseado.

Estos filtros son usados en diversas aplicaciones que requieren operaciones en tiempo real como por ejemplo, predicción adaptativa, ecualización de canales, cancelación de eco y cancelación de ruido (Alcarraz, 2000).

## ***CAPITULO 4***

### ***Algoritmo de búsqueda local implementado, introducción y descripción.***

La técnica alrededor de la cual se desarrollaron todos los algoritmos, pruebas y modificaciones de los distintos métodos aplicados en este trabajo, es la técnica del *Beamforming*. A continuación se presenta una explicación básica de la misma, así como la descripción del algoritmo LMS, que sirvió como base para la primera aplicación.

#### ***4.1.- ¿ Que es Beamforming ?***

El *Beamforming* es una técnica que se aplica en el procesamiento de señales condicionadas en el dominio espacial, para lo cual se utiliza un algoritmo que realiza la suma ponderada de la señal recibida por cada elemento dispuesto en un arreglo con una configuración espacial particular. Esta suma ponderada de las señales permite obtener una señal o señales de interés en una dirección o direcciones particulares y minimiza o elimina las restantes que se encuentran en direcciones distintas a las de interés, (Segovia, 2000).

Al aplicarlo en la adquisición de datos sísmicos, se pretenden reforzar los frentes de onda que provienen de los horizontes o estructuras de interés y atenuar los que no se desean muestrear o son generados por fuentes de ruido.

La aplicación de esta técnica requiere del conocimiento o estimación de la dirección de llegada de la señal escogida, es decir del ángulo de llegada del frente de ondas.

El procesamiento que se aplica para realizar la suma ponderada de las señales en un arreglo adaptativo o direccional de banda ancha, como ocurre en el caso de las señales sísmicas es:

$$Y_i(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) * S_i(t)$$

$Y_i(t)$  : señal resultante a la salida del arreglo, que es igual a la suma de las señales convolucionadas con los filtros (F.I.R).

$W_i(t)$  : es el F.I.R aplicado al receptor (  $i$  ).

$S_i(t)$  : la salida del receptor.

$n$  : número de receptores en el arreglo.

#### **4.2.- *Beamforming con una señal piloto.***

De lo expuesto anteriormente, se puede observar que la cancelación adaptativa de interferencia es usada para formar ceros en un patrón directivo. B.Widrow, L.S.Griffiths, B.B.Applebaum y P.E.Mantey desarrollaron un tipo de *Beamforming* basado en un algoritmo de “señal piloto”, la diferencia con el ya descrito, es que no presenta progresivamente pérdida de sensibilidad, y por lo tanto de direccionamiento ante señales fuertes, como resultado del proceso adaptativo. Este *Beamforming* adaptativo con una señal piloto radia hacia una dirección específica, “ve la dirección”, y usa la adaptatividad para soportar esta radiación, mientras simultáneamente forma el corte para anular el arribo de interferencia exterior que ve en esa dirección

En la medida que el sistema va adaptando, una señal piloto simula la señal recibida en una dirección dada elegida por el operador del sistema, esta señal piloto es la respuesta deseada del proceso adaptativo ligado al arreglo de los elementos sensores.

Usando la señal piloto, el *Beamforming* adaptativo es llevado de tal modo que el patrón de directividad presenta un lóbulo principal en la dirección especificada, al igual que los cortes correspondientes a las señales de interferencia incidentes en

direcciones de arriba que difieren de la dirección de interés. De esta forma se adapta el arreglo para formar el lóbulo principal en una dirección dada, el ancho de banda es determinado por la señal piloto. La ejecución de este proceso esta condicionado a través del error promedio por mínimos cuadrados, (Widrow, 1997).

A continuación se presentan dos ejemplos muy sencillos, tomados del Widrow, 1997, con los que se busca ilustrar, tanto grafica como analíticamente el funcionamiento del *Beamforming* con una señal piloto.

EJEMPLO N°1, se tiene un arreglo convencional lineal de antenas recibiendo, el arreglo consiste de 7 elementos isótropos, espaciados  $\lambda/2$ , en línea recta, donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia central  $\omega_0$ . Las señales recibidas son sumadas para producir una señal de salida del arreglo, el patrón de directividad presenta una respuesta relativamente sensible en varias direcciones, lo cual se puede ver al graficarlo en un plano en un rango para el ángulo que va de  $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ , para la frecuencia  $\omega_0$ , FIGURA N° 4.1.

Este patrón es simétrico alrededor de  $\theta=0^\circ$  y  $\theta=90^\circ$ , y el lóbulo principal esta centrado hacia  $\theta=0^\circ$ . La cancelación de mayor amplitud se localiza entre  $0^\circ < \theta < 24^\circ$ .

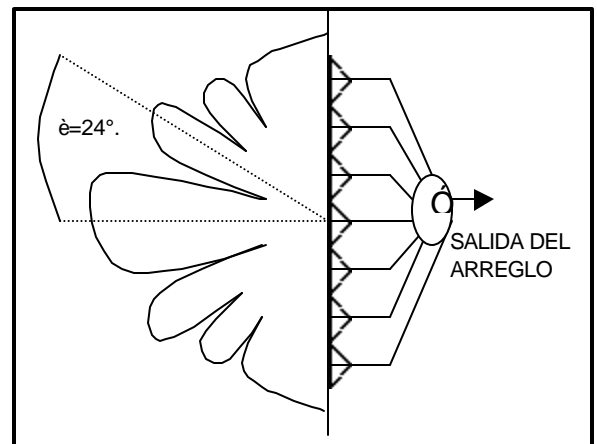


FIGURA N° 4.1, esquema del patrón de directividad de un arreglo de antenas lineal

EJEMPLO N°2, ilustra la generación y cálculo de un conjunto de pesos, cuya aplicación permite que una señal en una dirección dada sea aceptada, mientras que otras en direcciones diferentes son rechazadas. Suponiendo que una señal de referencia o señal piloto  $p_k = \text{Sen}k\hat{u}_0$  arriba en una dirección dada  $\hat{e}=0^\circ$ , FIGURA N° 4.2, y que el ruido incidente  $\zeta_k = N\text{Sen}k\hat{u}_0$  arriba hacia  $\hat{e}=\pi/6$ , y asumiendo que la señal piloto y el ruido están a la misma frecuencia,  $\hat{u}_0$  y que en algún punto del espacio ocurre que tienen la misma fase. Luego se dispone de 2 elementos receptores omnidireccionales idénticos, separados  $\hat{e}_0/2$ , la señal recibida por cada uno es alimentada a 2 pesos variables, diferenciados por  $1/4$  de tiempo de retardo de la oda,  $\delta T/2\hat{u}_0$ , las 4 señales son luego sumadas a la salida del arreglo.

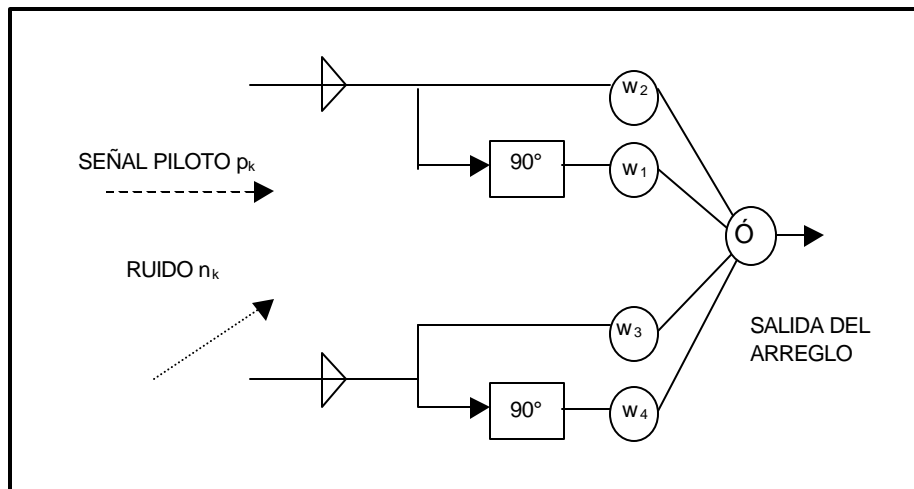


FIGURA N° 4.2, proceso aplicado a una señal piloto y a la interferencia o ruido que arriban en una dirección distinta.

La meta en este tipo de problemas es obtener un conjunto de pesos que permitan pasar  $p_k$  y rechazar  $\zeta_k$ . Para cualquier conjunto de pesos distintos de cero la salida es de la forma  $A\text{sen}(k\hat{u}_0 + \hat{O})$ , y existen un número de soluciones que hará que la salida sea  $p_k$ .

Pero la salida del arreglo debe ser independiente de la amplitud y la fase del ruido si lo que se busca es rechazar este, así la salida del arreglo de la señal piloto es,  $P[(\hat{u}_1 + \hat{u}_3)\text{Sen}k\hat{u}_0 + (\hat{u}_2 + \hat{u}_4)\text{Sen}k\hat{u}_0]$ , la salida deseada es  $P \text{ Sen}k\hat{u}_0$ , es decir la misma señal piloto, para que esto ocurra es necesario que:

$$\hat{u}_1 + \hat{u}_3 = 1$$

$$\hat{u}_2 + \hat{u}_4 = 0$$

La expresión de salida del ruido es  $N[\hat{u}_1\text{Sen}(\hat{u}_0 - \delta/4) + \hat{u}_2\text{Sen}(k\hat{u}_0 - \delta/4) + \hat{u}_3\text{Sen}(k\hat{u}_0 + \delta/4) + \hat{u}_4\text{Sen}(k\hat{u}_0 - \delta/4)]$ , para que esta respuesta sea igual a cero es necesario que:

$$\hat{u}_1 + \hat{u}_4 = 0$$

$$\hat{u}_2 + \hat{u}_3 = 1$$

El conjunto de pesos que satisfacen los requerimiento de la señal y el ruido son encontrados resolviendo los 2 sistemas de ecuaciones, en este caso la solución es  $\hat{u}_1=1/2$ ,  $\hat{u}_2=1/2$ ,  $\hat{u}_3=1/2$  y  $\hat{u}_4=-1/2$ .



### 4.3.- Algoritmo LMS.

Muy aplicado por su simplicidad y facilidad de cómputo, ya que no requiere estimaciones finales de gradiente o repetición de datos, el algoritmo de la *mínima\_media\_cuadrática* (*least mean squares*), utiliza una estimación especial de gradiente que es válida para combinaciones lineales adaptativas.

Este algoritmo puede ser aplicado de dos formas, con múltiples entradas o de forma serial, es decir de entrada simple. En ambos casos se genera una salida combinada  $y_k$ , como una combinación lineal de entradas simples.

La estimación del gradiente se basa en la diferencia entre puntos estimados en la representación superficial.

En el caso del algoritmo LMS, para cada iteración del proceso adaptativo se tendrá un gradiente estimado:

$$\nabla_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial w_0} \left( \frac{e_k^2}{w_0} \right) \\ \frac{\partial}{\partial w_1} \left( \frac{e_k^2}{w_1} \right) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial w_k} \left( \frac{e_k^2}{w_k} \right) \end{bmatrix} = 2 * e_k * \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial w_0} \left( \frac{e_k}{w_0} \right) \\ \frac{\partial}{\partial w_1} \left( \frac{e_k}{w_1} \right) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial w_k} \left( \frac{e_k}{w_k} \right) \end{bmatrix} = -2 * e_k * x_k$$

$\frac{\partial}{\partial w_k} \left( \frac{e_k^2}{w_k} \right)$ : derivada del error ( $e_k$ ) respecto a los pesos, el cual proviene de

la comparación de la señal deseada ( $d_k$ ) con la señal resultante del proceso adaptativo ( $x_k^T w_k$ ) es decir,  $e_k = d_k - x_k^T w_k$ .

Con esta estimación simple de gradiente se obtiene:

$$W_{k+1} = W_k - \nabla_k = W_k + 2e_k X_k$$

$W_{k+1}$  : vector de pesos, próxima iteración.

$W_k$  : vector de pesos actuales.

$\mathbf{h}$  : ganancia constante que regula la velocidad y estabilidad de adaptación.

$X_i$  : vector de muestras de entrada.

$e_k$  : error calculado.

Finalmente, el desarrollo del algoritmo LMS utilizado en el trabajo previo realizado por Intevp (Segovia 2000) y en el presente trabajo el cual es una continuidad, se expresa como:

$$Y_i = X_i^T * W_i$$

$$e_i = d_i - \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$W_{(i+1)} = W_i + 2\mathbf{h}e_i.X_i$$

# ***CAPITULO 5***

## ***Algoritmos de búsqueda global implementados, introducción y descripción.***

En el diseño de un sistema únicamente ciertas combinaciones de valores característicos son posibles; esto significa que las posibles soluciones están restringidas a una subregión **A** o posible región determinada por sus características esenciales. La función objetivo, que es la que establece los fundamentos y condiciones de la solución o soluciones a encontrar, puede ser multimodal, *i.e.*, puede tener distintos mínimos locales en esta subregión. El enfoque de la optimización global es encontrar una solución en **A**, para la cual la función objetivo presente su valor más pequeño, el mínimo global. La optimización global se enfoca en la determinación no de algún mínimo local, sino del menor mínimo local en la subregión **A**, en contraste con la optimización local, para la cual el acercarse a un mínimo local es deseable, y no existe un criterio general que indique que el mínimo global o menor mínimo local ha sido encontrado.

En este trabajo se aplicaron tres técnicas de búsqueda global provenientes del área de la computación emergente conocido como, Sistemas Evolutivos.

La primera técnica que se ensayo es una aplicación del Temple o Recocido Simulado (*Simulate Annealing*) desarrollado por W L.Goffe, G.D.Ferrier.y J.Rogers, este método surge de la emulación del proceso físico de templado de metales.

La segunda técnica consiste en la aplicación de un algoritmo genético de búsqueda global desarrollado por D.L.Carroll, modificado y adaptado en Intevap para el procesamiento de señales sísmicas.

La tercera técnica, desarrollado por R.Banchs, consiste en la aplicación del método del *Beamforming* usando las herramientas de la programación con redes neuronales, específicamente la técnica conocida como *backpropagation* (propagación hacia atrás).

Aquí se presenta una breve introducción de los fundamentos y características más básicos del contexto de los sistemas evolutivos en el cual se encuentran enmarcadas estas tres técnicas.

## **5.1.- Redes neuronales.**

### *5.1.1- Neurofisiología, conceptos básicos.*

En muchas aplicaciones se desea que un computador resuelva problemas complejos de reconocimiento, dos de ellas son la etapa de adquisición y procesamiento de datos sísmicos. Dado que los sistemas de cómputo convencional han resultado ineficientes ante este tipo de problemas se han ido aplicando ciertas características de la fisiología del cerebro para crear nuevos métodos de procesamiento; estas técnicas han recibido el nombre de sistemas neuronales artificiales (**ANS**) o redes neuronales.

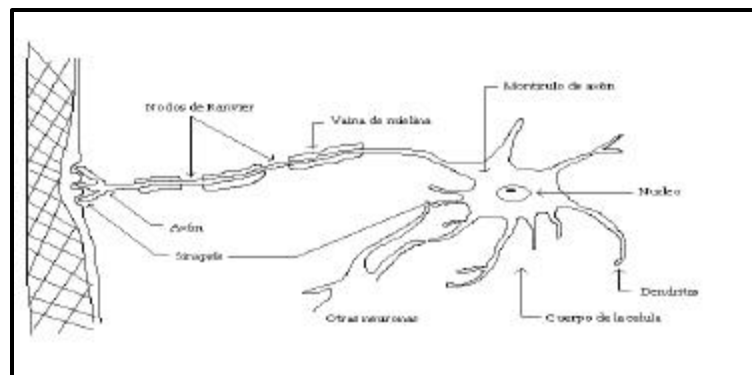


FIGURA N° 5.1, estructura básica de una célula nerviosa típica perteneciente al sistema nervioso central.

En la FIGURA N° 5.1 se muestran los principales componentes de una célula nerviosa, en donde se observa que las conexiones que llegan de otras neuronas se producen en distintos lugares de la célula, lo cual se conoce como sinapsis, que es la unión existente entre dos neuronas, los impulsos nerviosos que pasan a través de estas pueden producir cambios locales en el potencial del cuerpo celular de la neurona receptora, estos potenciales son denominados *potenciales graduados o de entrada* y pueden ser excitatorios o inhibitorios, es decir que aumentan o disminuyen la despolarización de la célula, los potenciales de entrada se suman en el montículo de axón y si la despolarización es suficiente se genera un potencial de acción. La transmisión de este *potencial de acción* a lo largo del axón se produce por una serie de despolarizaciones que tienen lugar en los nodos de Ranvier, tal que al despolarizarse uno se desencadena la despolarización del siguiente nodo, lo que indica que este potencial viaja en forma discontinua de un nodo a otro.

Luego el fundamento en una abstracción muy básica del sistema nervioso central parece ser que cada neurona envía impulsos a muchas otras, *divergencia*, y los recibe de muchas otras mas, *convergencia*, y la forma en que lo hacen se ha tomado como base en la mayoría de los modelos de redes neuronales.

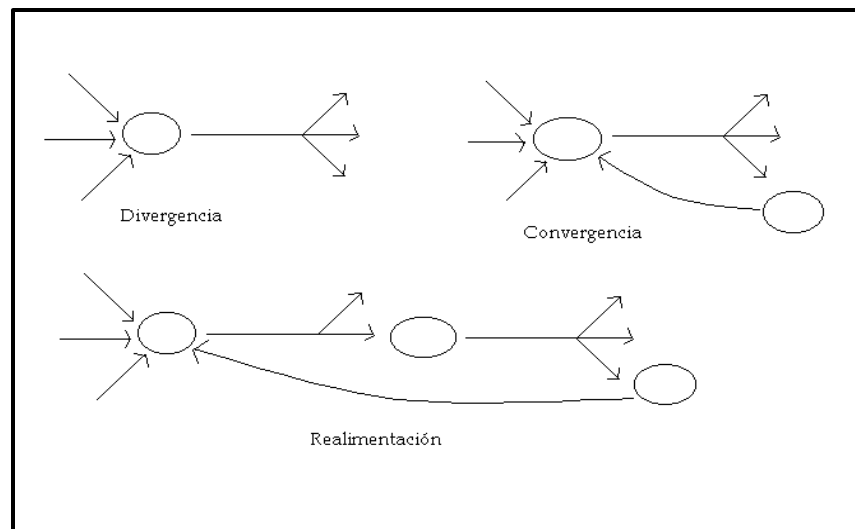


FIGURA N° 5.2, esquemas de circuitos neuronales del sistema nervioso central.

### 5.1.2.- Elemento de procesamiento, PE.

La estructura general idealizada que simula a una neurona se conoce como elemento de procesamiento (PE), mostrado esquemáticamente en la FIGURA N° 5.3.

Al igual que una neurona verdadera un PE tiene muchas entradas y una salida que puede ir a muchos PE en la red

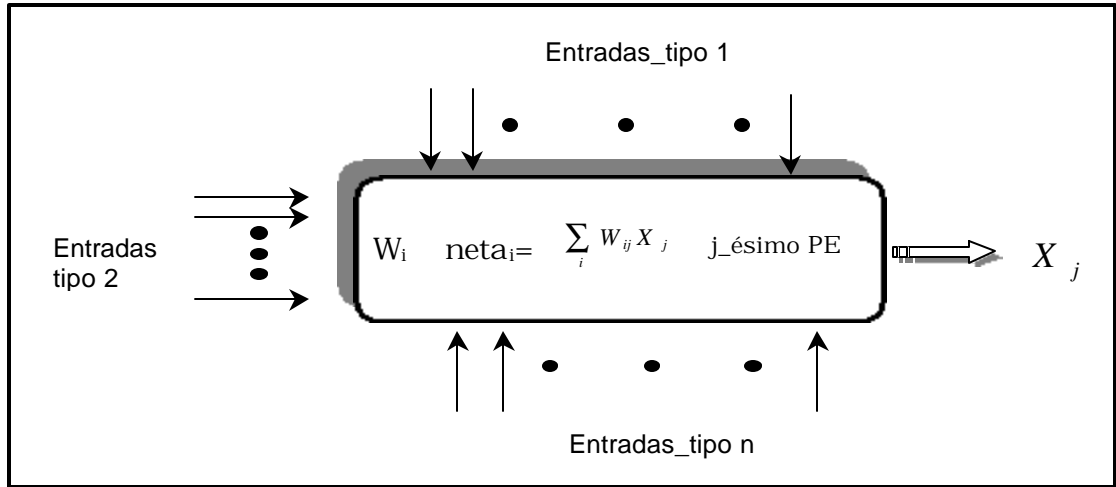


FIGURA N° 5.3, estructura general de un elemento de procesamiento de una red neuronal.

Las flechas representan las conexiones de entrada con otros elementos de procesamiento y cada una esta asociada con un peso o unidad de conexión,  $X_i$  es la salida generada para el  $i$ -ésimo nodo o PE procedente del  $j$ -ésimo PE o  $X_j$ , esta salida simula la frecuencia de disparo de una neurona y los pesos, la intensidad de conexión sináptica entre neuronas. Estas conexiones se colocan de varios tipos, tipo 1, tipo 2,..., tipo  $n$ , ya que pueden tener diferentes efectos, excitatorios, pesos positivos, inhibitorios, pesos negativos y otros tipos de conexiones especiales como ganancia, amortiguamiento y disparo fortuito.

Cada PE determina un valor de entrada neto, **neta<sub>i</sub>**, según todas las conexiones de entrada, que en ausencia de conexiones especiales es, los valores de entrada ponderados mediante sus pesos correspondientes:

$$neta_i = \sum_j X_j W_{ij} \quad (5.3.1)$$

La entrada neta se transforma en el **valor de activación**  $a_i(t)$ , en esta expresión la activación actual depende del valor anterior de la activación, pero en la mayoría de los casos esta y la entrada neta son iguales.

$$a_i(t) = F_i(a_i(t-1), neta_i) \quad (5.3.2)$$

Luego de calculada  $a_i(t)$ , se determina la función de salida  $X_i$ :

$$X_i = f_i(a_i) \quad (5.3.3)$$

Finalmente como los modelos de redes ANS son sistemas dinámicos que evolucionan a lo largo del tiempo, se tiene que,  $\dot{X}_i = g_i(X_i, neta_i)$  (5.3.4), es una ecuación diferencial general para la salida del  $i$ -ésimo PE, luego como  $neta_i$  depende de la salida de la  $j$ -ésima unidad, se tiene un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas.

En el caso de los pesos,  $\dot{W}_{ij} = G_i(W_{ij}, X_i, X_j, \dots)$  (5.3.5),  $G_i$  representa la **Ley de Aprendizaje**, la cual consiste en encontrar los pesos que codifican el conocimiento que se desea aprenda el sistema.

En la mayoría de los sistemas reales, el mayor problema consiste en determinar una solución cerrada para el sistema de ecuaciones, lo que en la actualidad se ha resuelto parcialmente aplicando técnicas numéricas que permitan aproximaciones razonables.

### 5.1.3.- Propagación hacia atrás (backpropagation).

Un método que resulto útil en problemas que requieren del reconocimiento de tramas complejas y la realización de funciones de correspondencia no triviales, es el método de propagación hacia atrás (BPN), que se ilustra en la FIGURA N° 5.4.

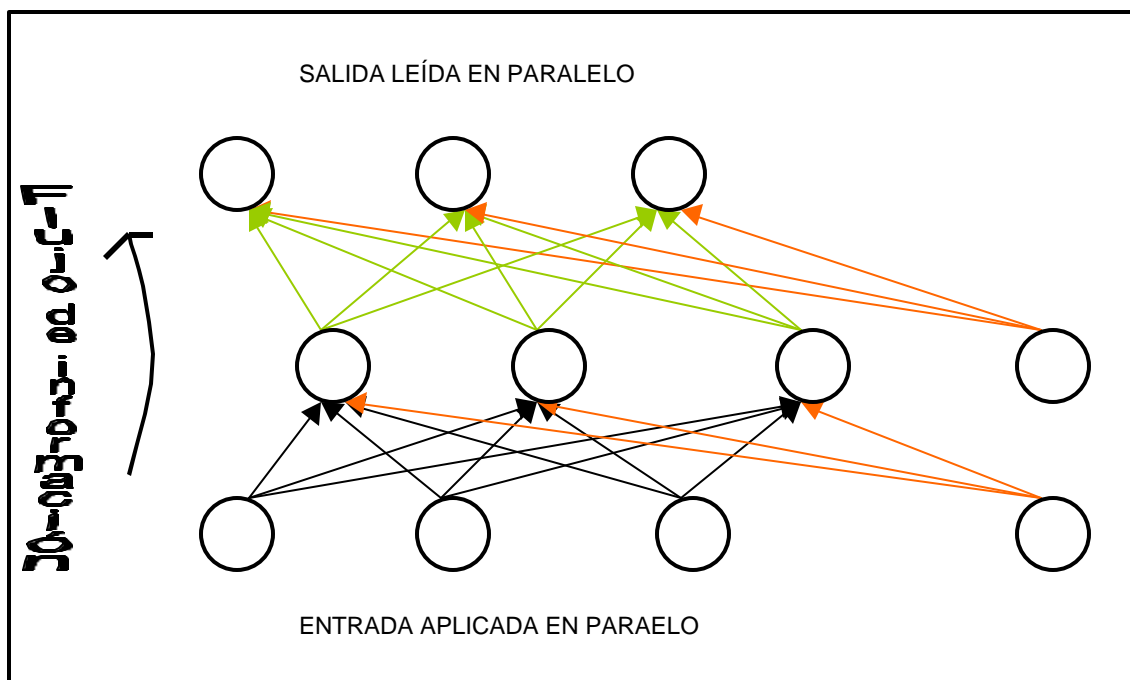


FIGURA N° 5.4, arquitectura general de una red de propagación hacia atrás.

La complejidad matemática no es lo que guía el reconocimiento de tramas complejas en entornos ruidosos, ya que la búsqueda algorítmica en un espacio pequeño puede ser muy lenta, lo que indica que en estos casos es la búsqueda secuencial del computador, el ciclo tomar/ejecutar de Von Neumann, lo que es determinante en el tiempo de ejecución. Debido a esto surgieron procesamiento que son capaces de examinar todo o gran parte de los elementos implicados en el proceso, en paralelo, estos sistemas son capaces de “adaptarse” a sí mismos para aprender la relación entre **n** conjunto de elementos dados, concentrándose luego en las características de una entrada arbitraria que se asemejen a las otras ya vistas, lo que los hace capaces de ignorar el ruido, de esta manera funciona uno de estos sistemas, la BPN.

Esta red aprende un conjunto predefinido de pares de entradas y salidas dadas como ejemplo, empleando un ciclo de propagación\_adaptación de dos fases, donde primero se aplica una trama de entrada como estímulo para la primera capa de unidades de la red, esta se propaga a través de todas las capas superiores hasta generar una salida que se compara con la salida deseada. Luego estas señales de



errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia los nodos de las capas intermedias que contribuyen directamente a la salida.

Las unidades en las capas intermedias reciben es una fracción de la señal total del error, según la contribución relativa que haya aportado la unidad a la salida anterior y según esta fracción se actualizan los pesos de cada unidad, tal que la red converja.

Este proceso permite que en la medida en que se entrena la red, las unidades de las capas intermedias se organicen a sí mismas, tal que aprendan a reconocer distintas características del espacio total de entrada, así que después del entrenamiento, cuando se les presente una trama arbitraria de entrada ruidosa o incompleta, las unidades de capas ocultas responderán, con una salida activa si la nueva entrada contiene una salida que se asemeje a la característica aprendida y tienen tendencia a inhibir sus salidas, si la trama de entrada no contiene la característica aprendida.

A medida que las señales se propagan a través de las diferentes capas, la trama de actividad que se presenta en las capas superiores, se puede ver como una trama de características que son reconocibles por las unidades de las capas subsiguientes. La trama que se genera a la salida, se puede ver como un mapa de características que ofrecen una indicación de la presencia o ausencia de muchas combinaciones distintas de características dentro de la entrada (Freeman, 1997).

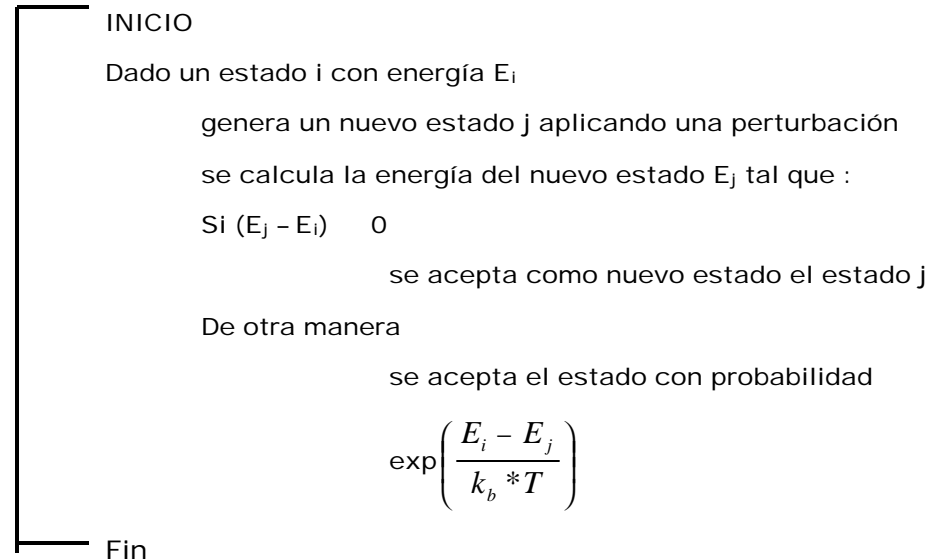
## **5.2.- Temple o recocido simulado (*simulated annealing*).**

### *5.2.1.- Introducción.*

Un metal a una alta temperatura ( $T^\circ$ ) posee un estado de energía mayor que el que tendría a bajas temperatura. Si este metal fuera silicio y se desea que la estructura cristalina forme una red perfecta y regular a temperatura ambiente, se debe enfriar a un ritmo adecuado, dado que un enfriamiento muy rápido o muy lento generaría, imperfecciones, una sustancia vítrea o una estructura cristalina irregular, poseyendo cualesquier de estas tres configuraciones una energía mayor a la que

posee una red perfecta. Para que esto no ocurra se necesita un proceso de templado, para hallar el *mínimo global de energía*, es decir a cada  $T^\circ$  le corresponde un tiempo que permite que el material alcance el equilibrio. El templado representa el equilibrio entre un enfriamiento muy rápido y otro muy lento.

### 5.2.2.- El algoritmo Metrópolis.



$T$  : Emula la temperatura.

$k_B$  : Es la constante de Boltzmann.

El algoritmo Metrópolis, emula el proceso del templado de un sólido, arranca de una alta temperatura y va disminuyendo muy lentamente hasta alcanzar un estado base, es decir:

Al bajar la temperatura lo suficientemente lento se puede alcanzar el equilibrio térmico (caracterizado por la distribución de Boltzmann) en cada temperatura, lo que se logra con la generación de varias transiciones en cada temperatura, la distribución de probabilidad en el estado  $i$  con energía  $E_i$  a una temperatura  $T$  se expresa como:

$$P_T\{X = i\} = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right), \quad Z(T) = \sum_i \exp\left(\frac{-E_i}{k_B T}\right)$$

$X$ : Es la variable estocástica que denota el estado actual del sólido.

$Z(T)$ : Es la función de partición.

### 5.2.3.- Temple o recocido simulado (SA).

En el **TEMPLE SIMULADO** la analogía es:

- Las soluciones corresponden a estados del sistema físico.
- El costo de la solución corresponde a la energía del estado.
- Se define un parámetro de control que emula la temperatura.

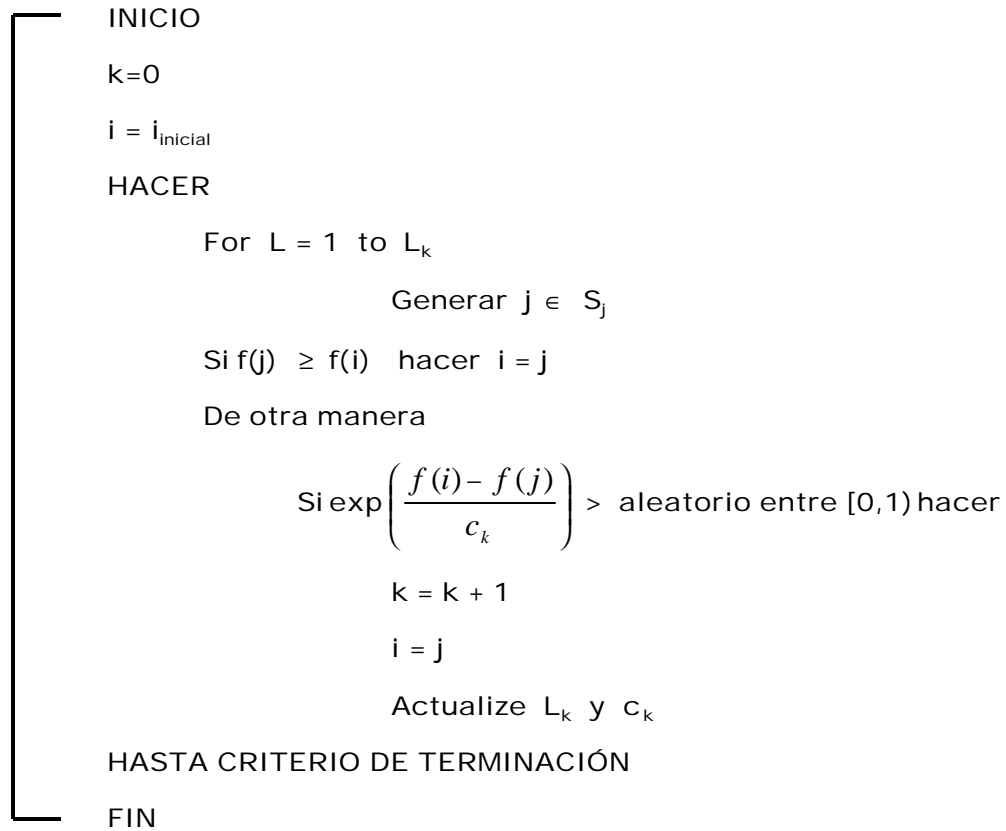
En generar el temple simulado se puede señalar como una iteración de algoritmos Metrópolis, tal que la probabilidad de aceptación se expresa como :

$$P_c\{aceptación\} = \begin{cases} 1 & \text{si } f(j) \leq f(i) \\ \exp\left(\frac{f(i) - f(j)}{c}\right) & \text{si } f(j) > f(i) \end{cases}$$

$C \circ R^+$  es el parámetro de control y una *transición* consiste de:

1. La aplicación de un mecanismo de generación.
2. La aplicación de un mecanismo de aceptación, teniéndose en cuenta que inicialmente que para valores grandes de  $c$  se acepta cualquier estado y en la medida que el parámetro de control tiende a cero se va restringiendo el número de estados aceptados.

A continuación se presenta un esquema general que involucra los pasos 1 y 2, la velocidad de convergencia esta controlada principalmente por  $L$  y  $c$ :



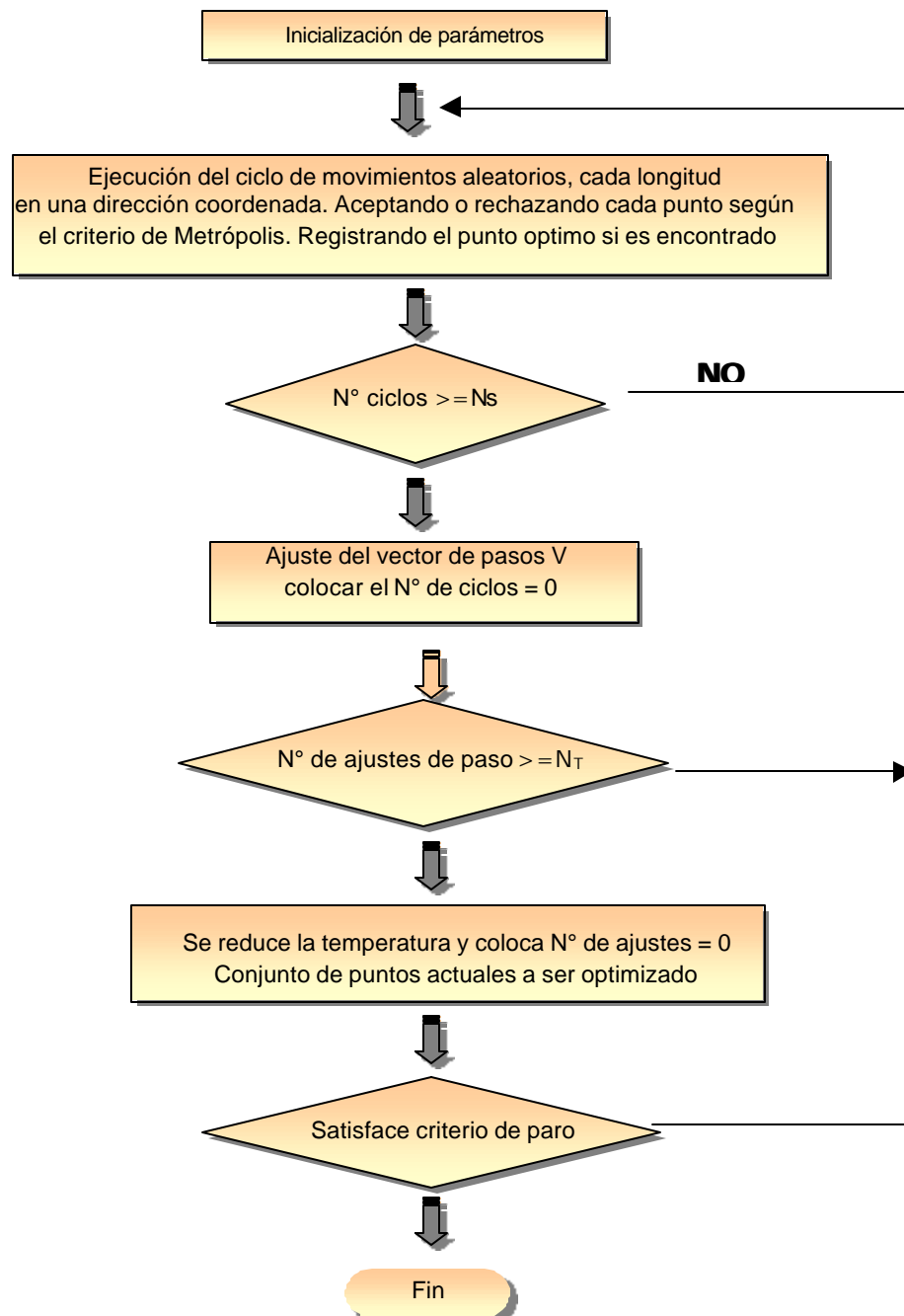


FIGURA N° 5.5, esquema del algoritmo de minimización del Temple Simulado (*simulate annealing*)

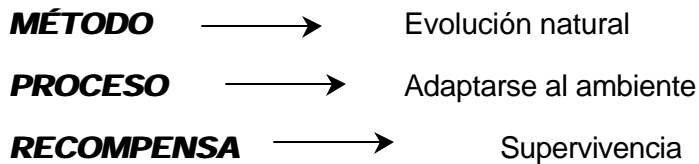
### **5.3.- Algoritmo Genético (AG).**

#### **5.3.1.- Introducción.**

El nombre proviene de que los modelos buscan emular el proceso de evolución natural, y se pueden señalar como una familia de procedimientos de búsqueda adaptativos.

Los métodos tradicionales de búsqueda son, basados en el cálculo, enumerativos, estocásticos, o una combinación entre estas tres opciones. Su principal limitación es una alta dependencia sobre el dominio del problema y cuando existe alta dimensionalidad del espacio de estados, se hacen ineficientes.

Esto generó la necesidad de nuevas alternativas de búsqueda, observándose que los seres vivos han desarrollado una estrategia muy exitosa para enfrentar el complejo problema de búsqueda en especies sobrevivientes.



El proceso de adaptación no se hace cambiando una sola estructura, se mantiene una población de estructuras a partir de las cuales se generan nuevas estructuras usando unos operadores llamados operadores genéticos. Cada una de estas estructuras es asociada con una aptitud, cuyo valor, aplicando mecanismos de competencia, permiten determinar cuales estructuras formarán las siguientes generaciones. La resolución de problemas puede ser considerada como un proceso de búsqueda en un espacio de estados o espacio de configuraciones, donde las soluciones pueden ser, conjunto de parámetros, trayectoria entre estados, estrategias, reglas, acciones, etc. Los problemas reales involucran espacios de estados asociados con muy alta dimensionalidad y estructuras complejas.

Diversos investigadores se dieron cuenta que este proceso podría ser muy poderoso en la resolución de problemas complejos, entre los mas importantes se encuentran:

Rechemberg (1973)	Estrategias Evolutivas
Fogel (1966)	Programación Evolutiva
Glover (1977)	Técnicas de Búsqueda Dispersivas
Holland (1975)	Algoritmos Genéticos
Kozan (1991)	Programación Genética

### 5.3.2.- Programa Evolutivo.

Son procesos estocásticos iterativos ejecutados sobre una población de estructuras, representando soluciones potenciales a un problema.

“En cada ciclo del proceso (generación) se evalúan las estructuras en la población actual en cuanto a su efectividad como soluciones del problema, y según los resultados obtenidos se implementa una estrategia reproductiva que genera una nueva población, en la cual se le dan mas importancia a las estructuras previas” (Moreno, 2000).

Los condiciones a imitar en un programa evolutivo son:

- Codificación\_descodificación de estructuras (cromosomas): Soluciones potenciales.
- Población de estructuras: Banco genético.
- Mecanismos de selección con su función de actitud correspondiente: Ambiente.
- Proceso de reproducción: Mutación y reproducción sexual.

La anatomía básica de un programa evolutivo se compone de:

- 1.- Representación (del problema).
- 2.- Población inicial (problema y/o dinámica evolutiva).
- 3.- Función de actitud (función de adaptación).
- 4.- Mecanismos de selección (dinámica evolutiva).
- 5.- Operadores evolutivos (dinámica evolutiva).
- 6.- Parámetros de control (dinámica evolutiva).

**1.- Representación (del problema).**

La representación de las posibles soluciones dependen del problema, en la actualidad se emplean cada vez más estructuras de datos iguales a las utilizadas en el dominio del problema ó similares.

La forma más común de estas estructuras de datos es la de una cadena de símbolos que pertenecen a un alfabeto finito de la menor cardinalidad posible, de longitud fija. La más antigua y estudiada es la binaria (cadena de bits), desde un punto de vista más formal, se señalan como algoritmos genéticos en la programación evolutiva a aquellos que emplean exclusivamente esta representación. Entre otros modos de representación se tienen, N\_tuplas de números reales, listas de símbolos de longitud variable, listas de listas, etc.

**2.- Población inicial.**

En general se trabaja sobre una población fija de **n** individuos que es inicializada aleatoriamente. Se generan **n** estructuras de datos aleatoriamente, representativas de las potenciales soluciones de partida.

**3.- Función de actitud (función de adaptación).**

Es una función que aplicada sobre un individuo (cromosoma) produce como resultado uno o más valores que miden la calidad del individuo como solución del problema.

Determina la conexión entre el programa y el problema a resolver; esta emula el ambiente y los valores que se generan se traducen en probabilidades.



4.- Mecanismos de selección.

Permite escoger los individuos sobre los cuales se aplicarán los operadores evolutivos, dándosele más peso a los individuos más aptos, sin obviar a los menos aptos.

Entre estos mecanismos el más común es “el de selección por rueda de ruleta”, otro muy usado es la “renormalización” de la función de adaptación.

5.- Operadores evolutivos.

Con ellos se emula el proceso de reproducción de los individuos. Se aplican a los cromosomas para modificar su información genética y existen dos clases:

Unarios (mutación) se crea un nuevo individuo realizando un cambio pequeño.

De orden superior (cruce) se crean nuevos individuos combinando partes de 2 ó más cromosomas, emulan la reproducción sexual.

6.- Parámetros de control.

Son los que controlan la dinámica evolutiva, tal que cada combinación de problema, representación y operadores de evolución requieren de un grupo propio de parámetros, que por lo general son:

- Tamaño de población .....% de renovación.
- Probabilidad de cruce .....probabilidad de duración.
- Tipo de renormalización y parámetros asociados.
- Probabilidad de selección de los operadores.

El algoritmo genético simple se refiere a el sugerida por Holland y se estructura como:

Representación	binaria
Población	constante, de n individuos
Inicialización	aleatoria
Renormalización	ninguna
Selección	rueda de ruleta
Operadores	cruce un punto + mutación
Sustitución	total
Parámetros	n~100, Pm~0.002, Pc~0.8

Finalmente los pasos más básicos para aplicar un algoritmo genético son:

1. Determinar el modelo de representación.
2. Determinar la medida o capacidad de adaptación.
3. Determinar los parámetros o variables que controlan el algoritmo.
4. Determinar la vía para designar el resultado y criterio de terminación.

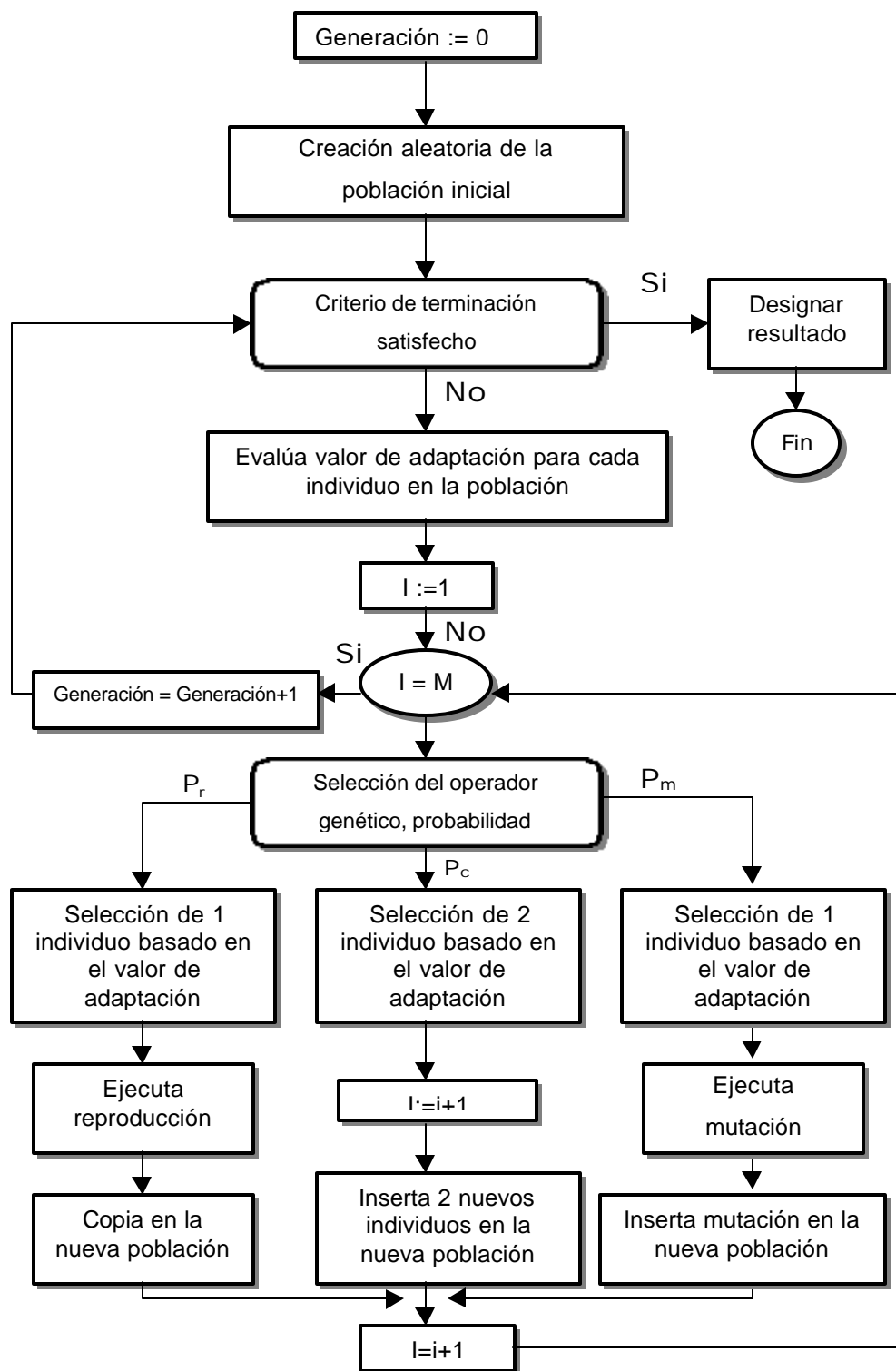


FIGURA N° 5.6, diagrama de flujo de un algoritmo genético convencional.

# ***CAPITULO 6***

## ***Lago de Maracaibo.***

En este capítulo se presenta un resumen sobre los problemas de ruido en el Lago de Maracaibo, haciendo especial énfasis en el problema de las reverberaciones en lodo, siendo este de particular interés en este trabajo, ya que a través de los modelos simplificados realizados del lago, se buscó limpiar un evento de interés afectado por problemas de ruido producido por la presencia de una capa de lodo.

### ***6.1.- Introducción.***

El Lago de Maracaibo ubicado en el Nor\_occidente de Venezuela posee la principal fuente productora de hidrocarburos en el país. Estos recursos son localizados y delimitados en general utilizando sísmica de reflexión (también utilizada en parte para su caracterización), con la que se obtienen imágenes que indican la distribución de los mismos. Pero en muchos casos las señales que permiten obtener estas imágenes son distorsionadas y/o atenuadas, por lo que no se puede generar una imagen útil del subsuelo.

En este sentido se sigue buscando mejorar las técnicas convencionales, aun así siguen existiendo múltiples casos en los cuales estos avances no funcionan, por



## **6.2.- Fuentes de ruido en el Lago de Maracaibo.**

Como se indicó anteriormente, la baja calidad de los datos ha sido atribuida a la presencia de capas de barro y arcillas blandas ricas en gas, de características y espesores variables, que cubren muchas de estas áreas críticas, igualmente se señala que este es uno de los factores que se piensa es el más influyente, otros también de importancia lo son, la presencia de una enorme cantidad de instalaciones y tuberías que cruzan el fondo del lago, muchas de las cuales se desconoce su localización, la presencia de estratos muy duros a continuación de estas capas de lodo y/o arcillas blandas, la profundidad del agua y los pozos de producción. Todos estos factores, unos más que otros, ocasionan interferencia en la señal sísmica grabada en el lago, en forma de ruido organizado tanto de baja como de alta frecuencia, así como la atenuación severa de la energía asociada principalmente a las frecuencias altas.

Este problema de ruido según P.Mora, 1999 se puede subdividir en:

- 1.- Reverberaciones en lodo.
- 2.- Reverberaciones en agua y dispersión.
- 3.- Pérdida de la resolución.
- 4.- Pérdida de continuidad de datos.

1.- Reverberaciones en lodo, se señala que la costa oriental del lago es rica en lodo. En esta zona se indican baja calidad en los datos, una baja relación señal/ruido relacionada con eventos reverberantes de bajas frecuencias (20Hz-40Hz).

Los espesores de estas capas de lodo son inferiores a los 30m-35m, presentan baja densidad, cercana a la del agua, es rico en gas por lo que la velocidad de propagación de las ondas acústicas son muchos menores que en el agua, las ondas compresionales presentan velocidades entre los 300m/s a 700m/s.

Esta característica implica que estas capas de lodo se comportan como un filtro que atenúan las altas frecuencias.

El ruido de baja frecuencia ó "*singing*", se piensa es debido a las reverberaciones de la señal entre la interfase aire-agua, agua-lodo, en la interfase lodo-agua y lodo-fondo, la hipótesis que se maneja es que esta energía queda atrapada en estas interfases, originándose lo que Levin (1962) denominó ondas de lodo "*mud wave*", las cuales son dispersivas, es decir la velocidad de grupo es distinta de la velocidad de fase.

De los resultados obtenidos del proyecto de adquisición sísmica, Costa Oriental del Lago en 1990, Pereira (1992) expone la idea del ángulo crítico para el problema de capas de baja velocidad, como lo son estas capas de lodo y arcillas blandas. Este ángulo se estima en aproximadamente 20° para la interface lodo-fondo en esta área estudiada, tal que toda la energía que incide sobre una interface de este tipo con un ángulo superior, queda reverberando en el barro sin penetrar, por lo que Pereira recomienda el uso de fuentes que enfoquen la energía en este cono de 20°.

En esta área según Sixma (1996) existen dos tipos de reverberaciones, una de rápido decaimiento al incidir la energía en el fondo con un ángulo inferior al crítico y una de lento decaimiento, cuando la incidencia es con un ángulo superior al crítico, por lo que se observa un lento decaimiento en la amplitud del ruido reverberante.

Finalmente de este y otros estudios en la costa oriental se infiere que el lago posee capas de lodo acompañadas por estratos de arenas y arcillas, presentando el conjunto espesores de hasta 35m.

2.- Reverberaciones en agua y dispersión, en la costa occidental del lago, no hay capas de lodo de importancia y los tipos de ruidos observados son refracciones a partir de los 2.2ms, *Ground Roll* de baja frecuencia, inferior a 14Hz, velocidades menores a 600m/s, ruido del ambiente, fuerte *waterbreak* seguido de *backscattering* de alta frecuencia, superior a 45Hz y ruido industrial ocasional, no presentándose ruidos de bajas frecuencias asociados con el lodo.

$V_{\text{agua}} \text{ (m/s)}$	$\tilde{N}_{\text{agua}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$V_{\text{lodo}} \text{ (m/s)}$	$\tilde{N}_{\text{lodo}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
1500	1.0	700	1.2
1500	1.0	300	1.1
$V_{\text{lodo}} \text{ (m/s)}$	$\tilde{N}_{\text{lodo}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$V_{\text{fondo}} \text{ (m/s)}$	$\tilde{N}_{\text{fondo}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
700	1.2	2500	2.0
300	1.1	3500	3.0

TABLA N° 6.1.-Muestra distintos valores de densidad y velocidad ( $v_p$ ), suponiendo incidencia normal, para la interfaz agua-lodo y lodo-sustrato en el Lago de Maracaibo. Tomados de P. Mora, 1998.

3.- Pérdida de la resolución, se refiere a pérdida de continuidad de altas frecuencias, lo que no permite identificar adecuadamente eventos finos. Las hipótesis que existen sobre su origen son:

- Que existe más de una capa de lodo, es decir, que existen estratos lodosos intercalados con estratos duros.
- Muchas de las capas de barro y arcillas blandas presentan un alto contenido de gas.

4.- Pérdida de continuidad de datos, para todos los tiempos hay pérdida de continuidad en los eventos sísmicos. La hipótesis es que esto evidencia la presencia de columnas o chimeneas de gas, que se filtra a través de los sedimentos.

A continuación se presentan los mapas, perfiles y un modelo del fondo del lago, que sirvieron de referencia en la elaboración de los dos modelos simples utilizados para la aplicación de las técnicas implementadas en este trabajo, estos son, un mapa del espesor de lodo, un mapa de la profundidad del lodo, un mapa de la profundidad del lago y tres perfiles obtenidos de las pruebas de pilotaje. También se reseñan 2 ejemplos de registros sísmicos que presentan pérdida de continuidad y pérdida en el contenido de frecuencia, debido a los problemas de ruido presentes en el lago.



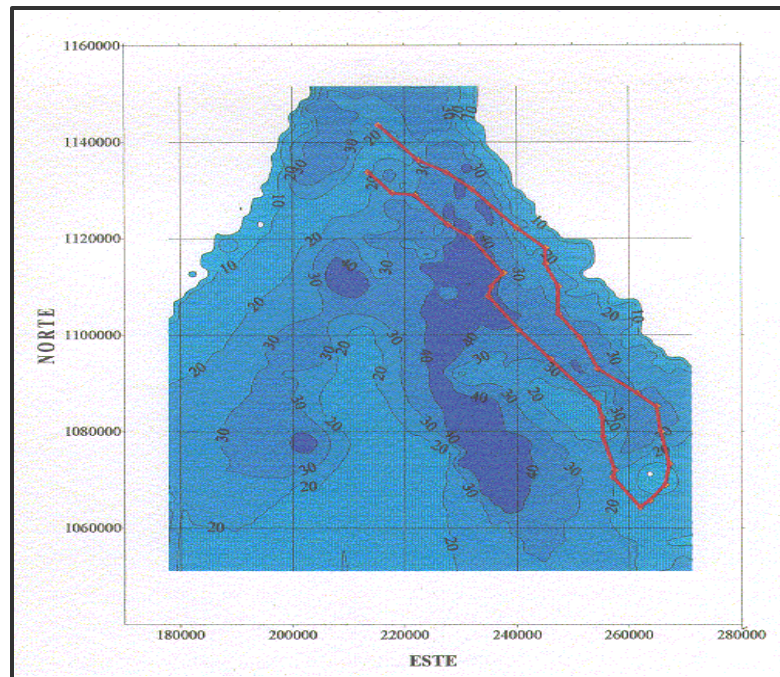


FIGURA N° 6.2.-Mapa de espesor del lodo en m, la zona delimitada por la línea roja presenta problemas de baja calidad en los registros sísmicos. Tomado de Alvarellos y Malavé, 1998.

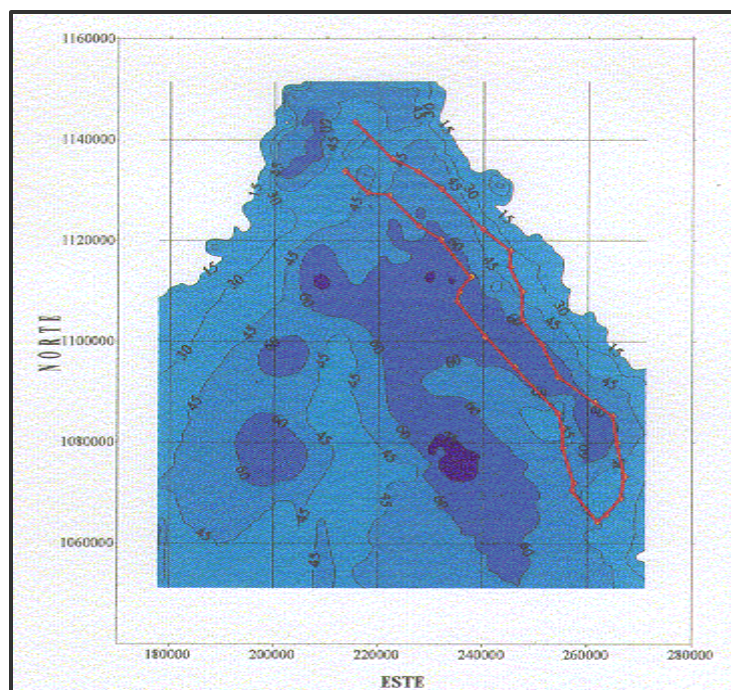


FIGURA N° 6.3.-Mapa de profundidad del lodo en m. Tomado de Alvarellos y Malavé, 1998.

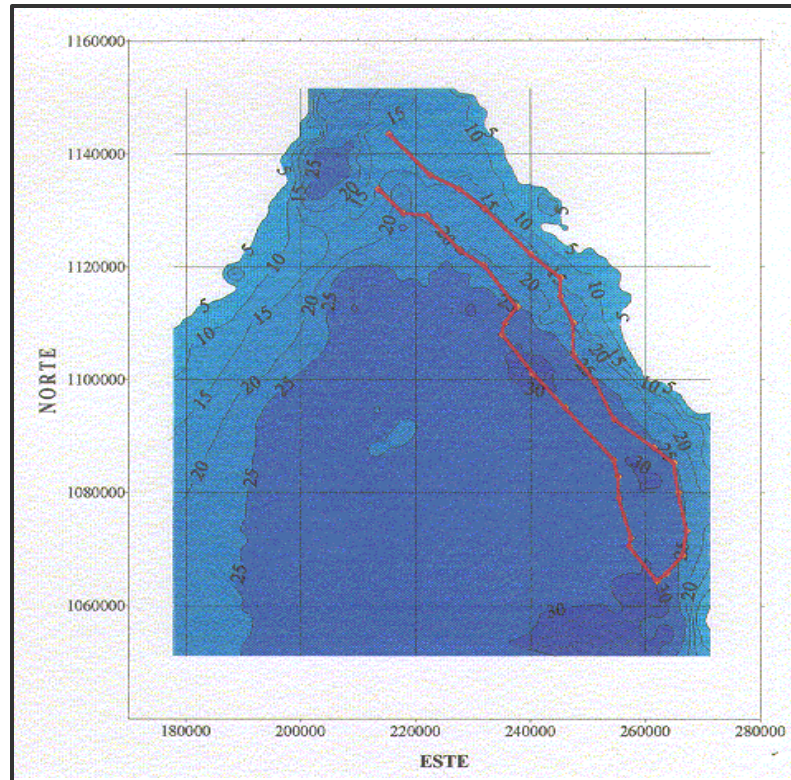


FIGURA N° 6.4.- Mapa de profundidad del Lago de Maracaibo. Tomado de Alvarellós y Malavé, 1998.

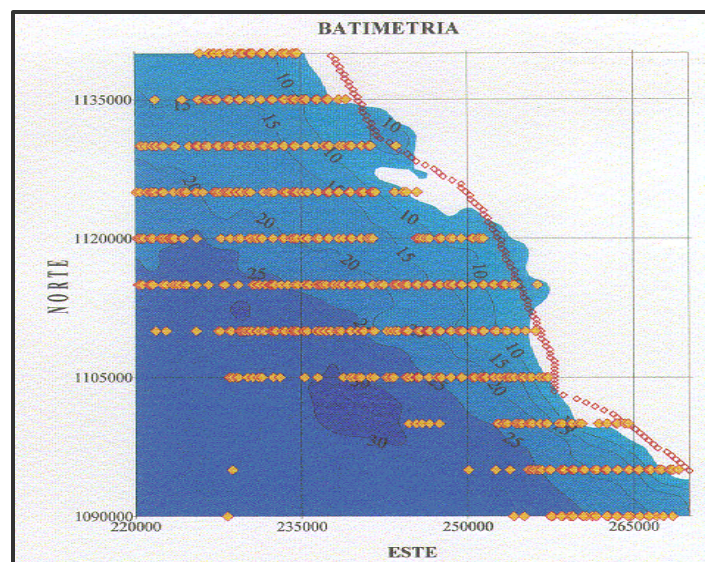


FIGURA N° 6.5.- Mapa de ubicación de los lugares donde se han estimado los valores de profundidad de las capas de arcillas blandas, con pruebas de pilotaje.



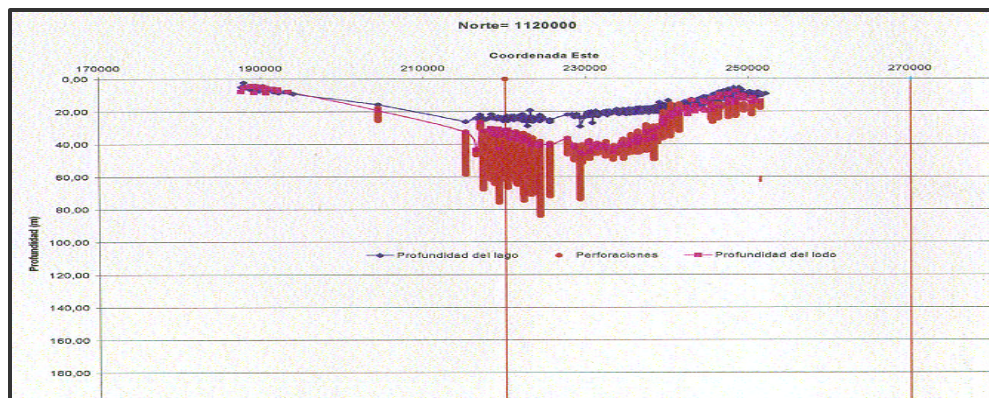


FIGURA ° 6.6.-Perfil obtenido a través de pruebas de pilotaje, las que permiten estimar la profundidad del agua, lodo y sedimentos someros. Tomado de Malavé, 1998.

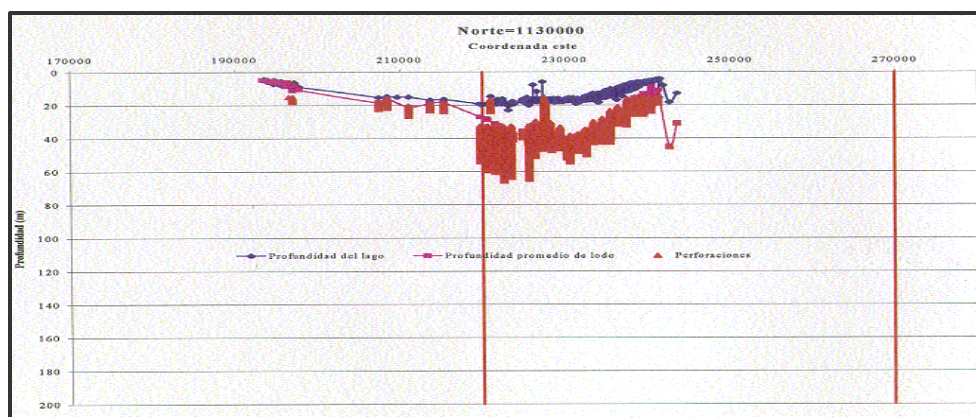


FIGURA ° 6.7.-Perfil obtenido a través de pruebas de pilotaje. Tomado de Malavé, 1998.

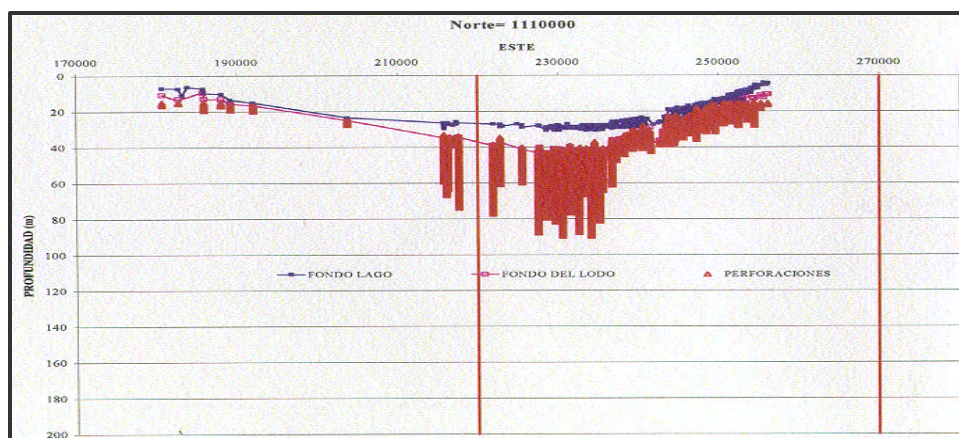


FIGURA ° 6.8.-Perfil obtenido a través de pruebas de pilotaje. Tomado de Malavé, 1998.

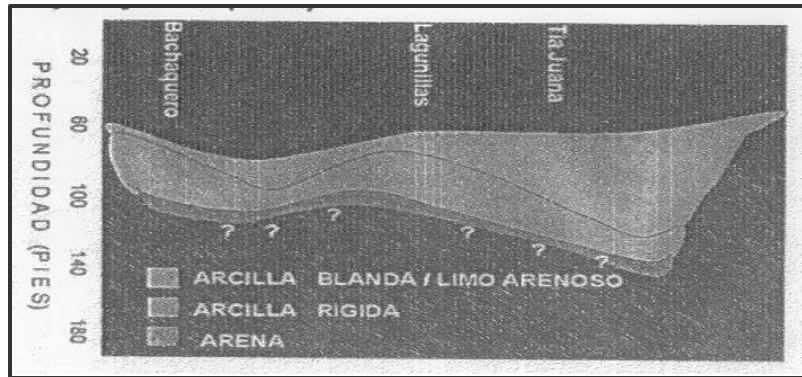


FIGURA N° 6.9.-Modelo del fondo del Lago de Maracaibo, Rajan y Soto, 1986.

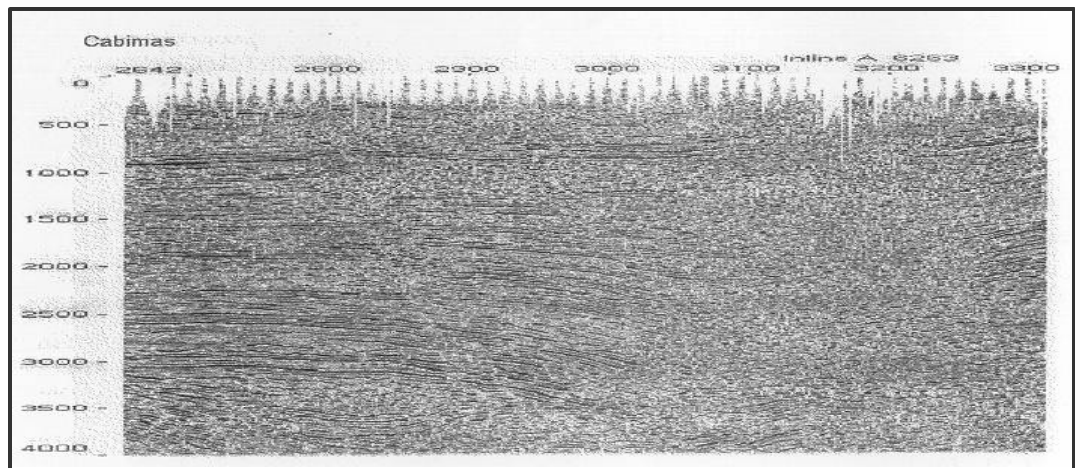


FIGURA N° 6.10.- Data sísmica correspondiente al área de Cabimas, donde se observa perdida de continuidad de los eventos sísmicos, en una zona se piensa es de baja velocidad.

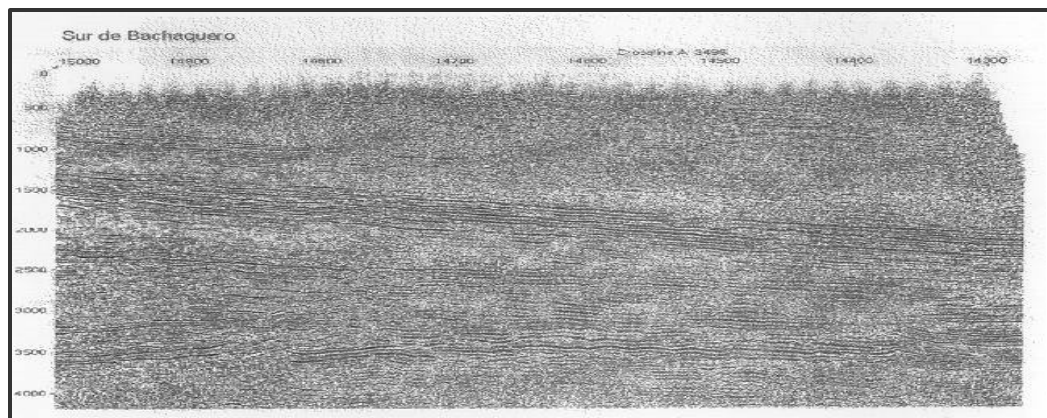


FIGURA N° 6.11.- Datos Adquiridos al sur de Bachaquero, donde se observa perdida en el contenido de frecuencia (altas), a lo largo de la sección.

## ***capitulo 7***

### ***Aplicación de la técnica del Beamforming***

En este capitulo se presenta la metodología, características y condiciones aplicadas en la elaboración de los distintos modelos probados.

#### ***7.1.- Realización de modelos más complejos.***

##### ***7.1.1.- Modelo simple con capa meteorizada***

En este trabajo se utilizaron 3 modelos que fueron contruidos con el programa Gmodel.f especialmente diseñado para ello.

En el estudio de la efectividad de la técnica del *Beamforming* en modelos más complejos, se comenzó en primer lugar complicando el modelo desarrollado previamente en Intevp (Segovia, 2000 ), para lo cual se agregó una capa de baja velocidad, de 100m de espesor, conservando el buzamiento del reflector inclinado, FIGURA N° 7.1, obteniéndose un modelo que consta de 3 capas isotrópicas y homogéneas, con una primera capa que representa a la capa meteorizada (CM) y la segunda y tercera capa ,roca consolidada.

En la primera capa se ensayaron con valores de velocidad comprendidos en un rango de 1000m/s a 1800m/s y valores de densidad en un rango de 1.2gr/cm<sup>3</sup> y 1.9gr/cm<sup>3</sup>.

Para la segunda y tercera capa se ensayaron con valores de velocidades y densidades de 2000m/s – 3300m/s, 2500m/s – 4800m/s y 2.0gr/cm<sup>3</sup> – 2.2gr/cm<sup>3</sup> y 2.1gr/cm<sup>3</sup> – 2.4gr/cm<sup>3</sup>. Obteniéndose de estos ensayos varios conjuntos de valores de densidades y velocidades que presentaban buenas reflexiones, reflectores bien definido, entre los cuales se seleccionaron, 1.2gr/cm<sup>3</sup> y 1500m/s para la primera capa, 2.1gr/cm<sup>3</sup> y 2200m/s, segunda capa y 2.3gr/cm<sup>3</sup> y 2700m/s para la tercera capa.

Este modelo al igual que se hizo con los otros modelos probados, se desglosó en 2 modelos, FIGURAS N° 7.1a Y 7.1b, uno que contiene todas las reflexiones de interés o no, en este caso contiene tanto el reflector inclinado como el reflector horizontal, y un segundo modelo que posee las mismas constantes elásticas, densidades, velocidades y dimensiones del primero, pero que sólo va a contener el evento de interés que será usado para entrenar los arreglos de geófonos (esto sería, haciendo una analogía con la teoría expuesta de la señal piloto).

El reflector horizontal en este modelo simple con CM, es el evento de interés, que se escogió para probar la efectividad del algoritmo LMS y la aplicabilidad de los algoritmos de búsqueda global descritos y las reflexiones del reflector inclinado es la señal no deseada.

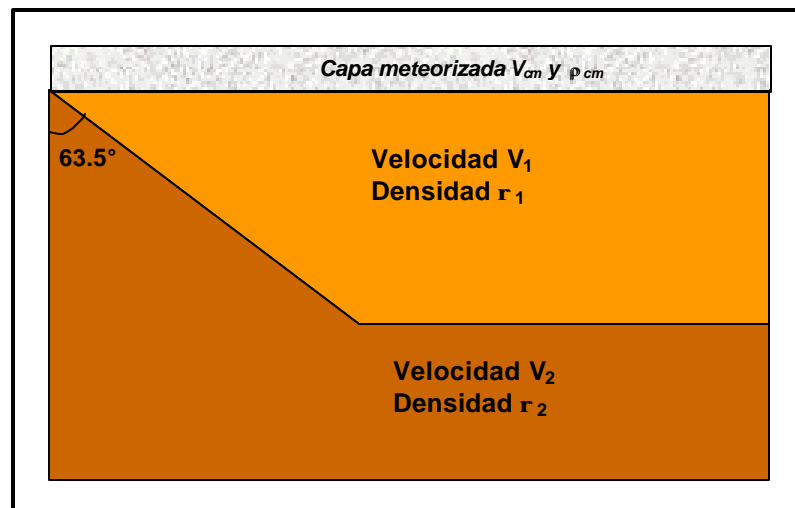


FIGURA N° 7.1a.-Modelo simple con capa de baja velocidad (CM).

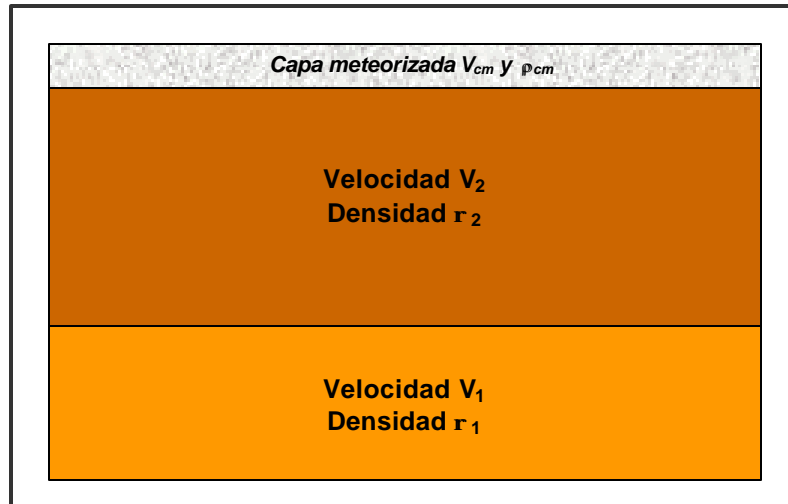


FIGURA N° 7.1b.-Modelo simple con capa de baja velocidad (CM), sólo el reflector horizontal.

Los parámetros de adquisición utilizados para los dos conjuntos de datos generados fueron:

```
$parms
dt=0.0005,
nt=4000,
ntsource=1200,
ngroup=800,
nx=800,
nz=800,
dz=5.,
dx=5.,
nsrc=1,
src_1=100,
src_inc=1,
src_depth=4,
src_type=4,
surf_type=0,
group_1=1,
geo_depth=4,
snap_i=100,
vpmax=4900,
$end
```

Para este modelo se generaron dos sismogramas sintéticos, que son parte de los resultados obtenidos, uno corresponde al modelo completo, FIGURA N° 8.2 y el segundo que pertenece al modelo que solo presenta el reflector de interés, en este caso el horizontal, FIGURA N° 8.4.

Luego, por motivos de tiempo de computo y costo de memoria compartida en disco duro, se procedió a seleccionar (recortar) una sección, que se considero de interés según:

- La calidad del reflector deseado en condiciones óptimas, las cuales en el caso de este modelo es la nitidez del reflector que se desea preservar sin la presencia de la señal no deseada, el reflector inclinado.
- La calidad del ruido, o señales a cancelar, en este caso la nitidez del reflector inclinado.

Según lo anterior, en este modelo se seleccionó un sector donde se observa con una buena nitidez y definición ambos reflectores.



### *7.1.2.- Modelos simplificados del Lago de Maracaibo con presencia de capa de lodo y arcillas blandas.*

En esta parte del trabajo se estudiará en dos modelos bidimensionales simplificados del Lago de Maracaibo, la efectividad de los filtros direccionales generados utilizando el mejor de los algoritmos de búsqueda global implementados.

El principal objetivo en la aplicación de estos filtros direccionales es el de recuperar un evento de interés, el cual se encuentra ubicado en un área que presenta una capa de lodo y arcillas blandas, rica en gas, utilizando receptores ubicados en un área que no presenta capas de lodo y/o arcillas blandas.

En general, se diseñaron dos modelos bidimensionales, con 7 capas isotrópicas y homogéneas que representan un corte transversal del lago, asignándose un área de 5000m en distancia horizontal, 5000m en profundidad y 6ms en tiempo. En ambos modelos el evento de interés a recuperar se colocó a 4000m de profundidad.

La elección de los espesores y velocidades, especialmente de las capas de agua, lodo y arcilla, se hizo tomando como referencia los mapas de espesor de las capas de lodo, mapa de profundidad del agua, perfiles sobre las variaciones del espesor y profundidad de las capas de lodo y arcillas y blandas, rangos promedios de las velocidades de la roca consolidada, mostrados en el Capítulo 6.

El primer modelo, **MODELO N°2**, esta referido a una zona de transición, agua\_tierra, que presenta un estrato compuesto de una capa de lodo, espesor máximo 15m, velocidad promedio de 500m/s, densidad de  $1.8\text{g/cm}^3$ , a continuación una capa de arcilla, máximo espesor 20m, velocidad de 2100m/s, densidad de  $1.8\text{g/cm}^3$ , a la zona de agua se le asigno en total una extensión horizontal de 3000m, velocidad de la onda p en el agua es de 1500m/s y la densidad del agua es de  $1\text{g/cm}^3$ , a la zona terrestre se le asigno una extensión horizontal de 2000m, fijándosele a la primera capa de roca consolidada una velocidad de 2500m/s, densidad  $1.9\text{g/cm}^3$ , la segunda capa de roca consolidada posee una velocidad de onda p de 2800m/s, densidad  $2.0\text{g/cm}^3$ , la tercera capa se le fijo una velocidad de

3100m/s, densidad  $2.1\text{g/cm}^3$  y a la ultima capa de roca consolidada se le asigno una velocidad y densidad de 3400m/s y  $2.3\text{g/cm}^3$ .

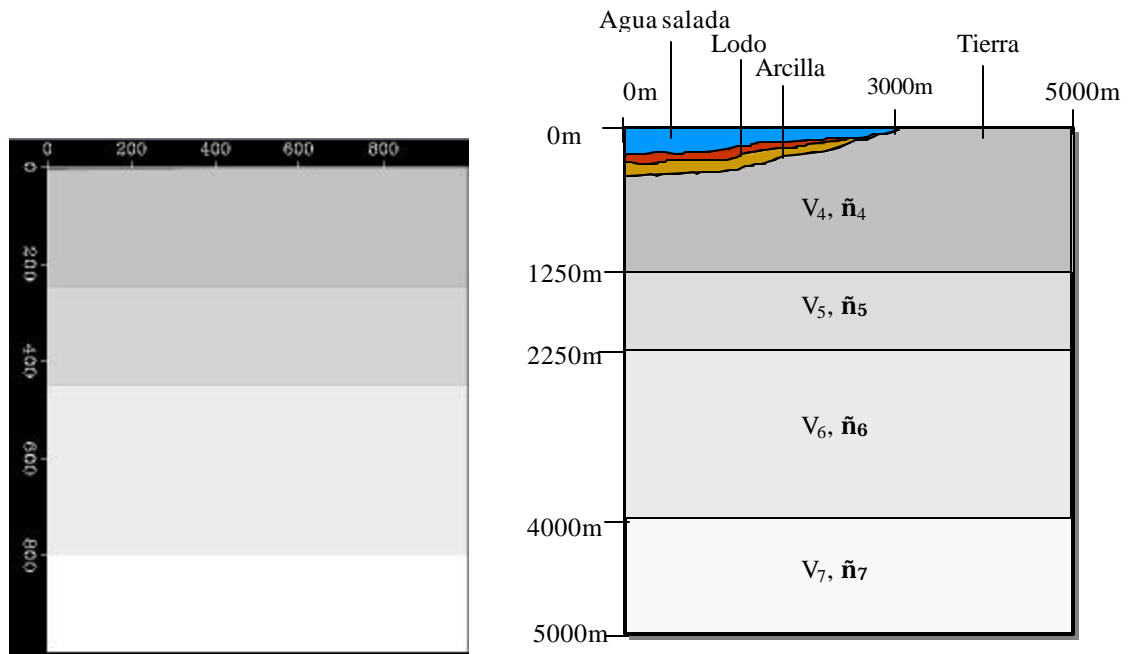


FIGURA N° 7.2a.-Modelo N°2

Modelo bidimensional a escala, que representa un corte transversal de una zona de transición que presenta una capa de lodo y arcilla en el Lago de Maracaibo.

FIGURA N° 7.2b.-Modelo N°2A

Representación detallada de los elementos que constituyen al Modelo N°2.  
No esta a escala.

El segundo modelo, **MODELO N°3**, esta ubicado completamente dentro del lago.

Presenta una profundidad de agua de 20m y se divide en dos zonas; una compuesta por un estrato de lodo y arcilla, con un espesor máximo del lodo de 20m y espesor máximo de las arcillas de 25m, que conserva las mismas velocidades fijadas para el MODELO N°2 y que cubre una extensión horizontal de 2500m y la otra que no presenta capa de lodo y/o arcilla, cubre una extensión horizontal de 2500m.

Las velocidades y densidades asignadas a las 4 capas de roca consolidadas son las mismas utilizadas para el MODELO N°2.

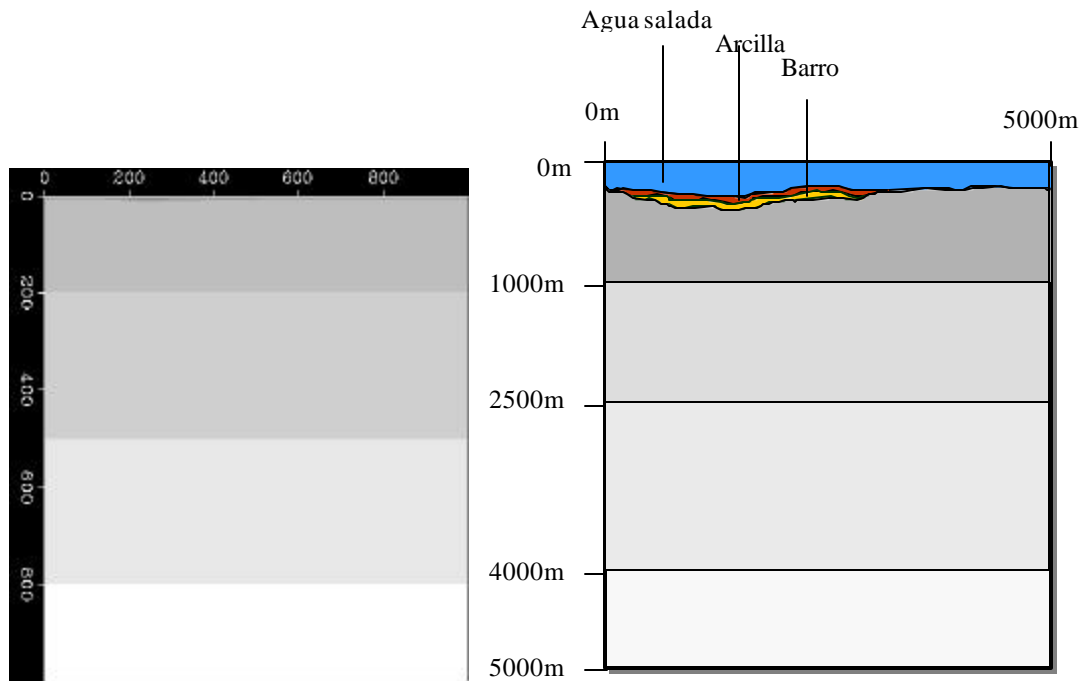


FIGURA N° 7.3a.-Modelo N°3  
Modelo bidimensional a escala, que representa un corte transversal en el Lago de Maracaibo con presencia de una capa de lodo y arcilla.

FIGURA N° 7.3b.-Modelo N°3A  
Representación detallada de los elementos que constituyen al Modelo N°3  
No está a escala.

Parámetros de adquisición utilizados en el modelo N°2:

```
$parms  
dt=0.0005,  
nt=6000,  
ntsource=1200,  
ngroup=1000,  
nx=1000,  
nz=1000,  
dz=5.,  
dx=5.,  
nsrc=1,  
src_1=150,  
src_inc=1,  
src_depth=4,  
src_type=4,  
surf_type=0,  
group_1=1,  
geo_depth=4,  
snap_i=100,  
vpmax=4900,
```

Parámetros de adquisición utilizados en el modelo N°3:

```
$parms  
dt=0.0005,  
nt=6000,  
ntsource=1200,  
ngroup=1000,  
nx=1000,  
nz=1000,  
dz=5.,  
dx=5.,  
nsrc=1,  
src_1=150,  
src_inc=1,  
src_depth=4,  
src_type=4,  
surf_type=0,  
group_1=1,  
geo_depth=4,  
snap_i=100,  
vpmax=4900,
```

En los dos modelos construidos del Lago de Maracaibo se generaron para cada uno 2 sismogramas sintéticos, según la ubicación de la fuente y que son parte de los resultados obtenidos, uno correspondiente a los modelos completos, FIGURAS N° 8.14 (A), N° 8.15 (C) y N° 8.16 (E), *i.e.* con la presencia de todas las capas, entre ellas la capa de lodo y la capa de arcillas blandas; el otro grupo de sismogramas se genero sin la presencia de estas capas de lodo y arcillas blandas, FIGURAS N° 8.14 (B), N° 8.15 (D), N° 8.16 (F) o sección sísmica sintética limpia en las cuales se les asigno velocidades promedios a las capas de rocas consolidadas que no contienen el evento considerado de interés para su recuperación, que por su nitidez y ubicación en los sismogramas sintéticos limpios se selecciono entre la segunda y tercera capa de roca consolidada, fijándose unas velocidades y densidades promedios de 2800m/s, 2.0g/cm<sup>3</sup>, 3100m/s y 2.1g/cm<sup>3</sup>, en las dos primeras capas y 3400m/s, 2.25g/cm<sup>3</sup>, 3700m/s y 2.35g/cm<sup>3</sup> a las dos ultimas capas de roca consolidada, obteniéndose un modelo de cinco capas, una de agua y las otras cuatro de roca consolidada.

En ambos casos, tanto para la generación de los datos sintéticos con el modelo completo, como para la generación de los datos sintéticos limpios, en el MODELO N° 2, se generaron dos conjuntos de datos, un grupo de datos sintéticos realizando el disparo en agua, y el otro grupo realizando el disparo en tierra. Para el MODELO N° 3, se genero un solo conjunto de datos, los datos sintéticos correspondientes al modelo completo y los datos sintéticos limpios.

Al igual que ocurrió para el modelo con capa de baja velocidad, por motivos de tiempo de computo y alto costo de memoria en disco duro, se seleccionaron (recortaron) secciones que se consideraron de interés, en ambos modelos del lago, según los dos criterios aplicados en la sección 7.1.1

## **7.2.- Implementación de algoritmos de búsqueda global.**

Se ensayo plenamente la técnicas de búsqueda global que consiste en una aplicación desarrollada en PDVSA\_Intevep por R.Banchs (2000) y que utiliza el método de propagación hacia atrás. Las otras dos referidas a la aplicación con algoritmo genético desarrollada por D.L.Carrol, 1998 y el SA (recocido simulado), solo se ensayaron con el modelo simple con CM.

A continuación se presenta un resumen de la estructura y funcionamiento de cada una de estas técnicas implementadas.

### **Algoritmo genético (AG).**

Al AG utilizado se le hicieron modificaciones muy simples que permitieran trabajar con la función objetivo diseñada.

Este algoritmo consta de 17 subrutinas, de las cuales la subrutina de entrada de valores *input* y la subrutina *func*, son las que le permiten al usuario adaptar el algoritmo a la búsqueda de la solución a un problema dado.

#### **Input**

Lee el archivo de parámetros de entrada, *ga.inp*, este archivo contiene el conjunto de valores iniciales necesarios para el funcionamiento del algoritmo<sup>1</sup>.

#### **initial**

Inicializa el programa y cuenta el número de cromosomas requeridos para una entrada específica. También inicializa aleatoriamente la generación de padres. Lee el archivo *ga.restart*<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>En el Apéndice D se reseñan con detalle los valores de entrada del archivo *ga.inp*, *ga.restart* y *ga.out*, y se ilustra cada uno con un ejemplo.

## evalout

Evalúa la población, asigna los valores de adaptación, establece el mejor individuo y escribe por pantalla en el archivo *ga.out* la información respectiva, por lo cual hay que revisar los formatos numerados como, 1075, 1100, 1200 y 1275, para obtener un funcionamiento y salida adecuada del algoritmo.

## niche

Implementa la opción “nighing” a través del fenotipo multidimensional de Goldberg, compartiendo los “scheme”, (cadenas) con una función de distribución triangular, para encontrar la distancia multidimensional de mejor individuo y normalizar los diferentes polinomios.

## selectn

Realiza la operación de selección por medio de torneos.

## crosovr

Realiza el cruce entre los pares seleccionados aleatoriamente.

## mutate

Ejecuta la mutación en la generación de niños producida.

## newgen

Escribe el arreglo de los niños para una nueva generación.

## gamicro

Implementa la técnica micro\_GA. Para esto primer chequea la convergencia de la población y si converge comienza con los mejores individuos y toma el resto aleatoriamente, como nuevos padres. Al aplicarlo se recomienda:

npopsiz = 5

iunifrm = 1

posibl = valores múltiplos de 2 ( $2^n$ )

`select`

Selecciona el mejor o 2 posibles padres para la piscina de selección.

`shuffle`

Mezcla el arreglo de padres y sus correspondientes adaptaciones.

`decode`

Descodifica una cadena binaria a un número real.

`code`

Codifica un parámetro a una cadena binaria.

`possibl`

Determina si todos los parámetros están dentro del rango, en el caso de que el número de posibilidades no sea optimizado a ser múltiplo de 2.

`restart`

Genera el archivo de salida `ga.restart1`.

`ranz`

Retorna una desviación aleatoria entre 0.0-1.0.

`func`

Es la función objetivo, explicada en detalle en la sección 7.3.



## Redes neuronales (BPN).

En la aplicación desarrollada por R.Banchs, 2000 las variables claves para su funcionamiento son:

NL = vector que contiene el número total de neuronas en cada capa. NN(1) es el número de entrada y NN(NL) es el número de salida de la red. NNMAX = 15.

VN = matriz de datos. Cada columna contiene el vector de datos correspondientes a cada etapa de la red. VN(1) es el vector de entrada y VN(NL) es el vector de salida.

WN = Volumen de pesos. La matriz  $WN(x,y,i)$  representa los pesos que interconectan a la capa  $i$  con a capa  $i+1$ .

ND = número de datos, NDMAX = 100000.

NDTST = numero de datos en el conjunto de ensayo, DTSTMAX = 20000.

NDTRN = número de datos en el conjunto de entrenamiento.

En la siguiente pagina se presenta un bosquejo de su diseño y modo de ejecución.

Bloque de definición y declaración de variables.



Lectura del archivo de parámetros de entrada, (*parameter*) e inicialización de variables.



Inicialización de pesos, crea un volumen de pesos aleatorios.



Lectura de los volúmenes de datos de los conjuntos de prueba, (*inputtst*), y de entrenamiento, (*inputtrn*).



Lectura de la matriz de datos de entrada y matriz de datos deseada.



Entrenamiento de la red.



Producto final es un archivo con el error de entrenamiento, (*trnerror*), y de las pruebas tres archivos, matrix1, matrix2 y matrix3 contentivos de los pesos de la red de entrenamiento.

Temple o recocido simulado (SA).

El algoritmo de recocido simulado utilizado es la versión mejorada por W.L.Goffe, G.D.Ferrier y J.Roger, 1994, a la cual se le hicieron algunas modificaciones que permitieron aplicar la técnica del *Beamforming* con la función objetivo diseñada, aquí se presenta un bosquejo resumido de su estructura y funcionamiento.

El programa inicia con un bloque de declaración de variables globales y asignación de parámetros de entrada, cuya manipulación por ensayo y error, es lo que permite obtener los resultados de salida deseados. Este conjunto de parámetros de entrada es:

MAX = Denota si la función va a ser maximizada o minimizada, tal que **T** (*true*, verdadero), indica un proceso de maximización y **F** (*false*, falso), indica un proceso de minimización. En la aplicación realizada se le dio el valor de **F**, ya que la meta era minimizar el valor de la función.

EPS = Tolerancia del error para la terminación. En esta aplicación se maneja una tolerancia de un orden de  $10^{-6}$ - $10^{-9}$ , debido al orden de los datos (amplitudes) manejados.

RT = Factor de reducción de la temperatura, el valor sugerido es de 0.85. En la aplicación se maneja un valor de 0.87, con el cual se obtuvieron mejores resultados.

ISEED1 = Primera semilla para el generador de números aleatorios.

ISEED2 = Segunda semilla para el generador de números aleatorios.

NS = Número de ciclos. Después de NS\*N evaluaciones de la función, cada elemento del VM es ajustado, de tal modo que aproximadamente la mitad de las evaluaciones de la función sean aceptadas. El valor sugerido es 20. N es el número de variables de la función a ser optimadas. Los valores utilizados en la aplicación se ubicaron entre 10-30.

NT = Número de iteraciones antes de la reducción de la temperatura (T). Después de NT\*NS\*N evaluaciones de la función, la T es cambiada por el factor RT, los valores sugeridos están entre 100 y 5\*N. En la aplicación se usaron valores de NT entre 20-100.

MAXEVAL = Máximo número de evaluaciones de la función, si este es excedido

IER = 1. IER es el error numérico retornado.

IPRINT = controla la impresión interior de SA.

0: No hay impresión.

- 1: Imprime el valor óptimo de la función, número total de movimientos, ascendentes, descendentes, rechazados aceptados, número de pruebas que excedieron el límite, número de pruebas óptimas encontradas a esta T, los valores de  $X_{\text{optimo}}$  y del vector de pasos VM. Esta fue la opción escogida.
- 2: Imprime VM,  $X_{\text{optimo}}$ , X de prueba lo cual da una idea de que tan alejado esta X de  $X_{\text{optimo}}$ .
- 3: Imprime cada evaluación de la función. Usado para aprender sobre el algoritmo.

T = Temperatura.

VM = Vector de longitud de pasos.

Luego del bloque de declaración de variables y parámetros, se realiza la asignación y delimitación de las variables solución admisible, lo que busca enfocar el algoritmo dentro de la región de búsqueda preestablecida, LB-UB, LB es el límite inferior de la variabilidad de la solución concebida y UB el límite superior.

Seguidamente se realiza la generación aleatoria de los valores de inicio, para lo cual se diseñó una subrutina, que:

Genera el signo (+/-) aleatoriamente



Genera  $X_{\text{aleatorio}} * \text{Signo} * \text{orden} (10^{-6})$

Las subrutinas asociadas al SA son:

rmarin

Asigna los  $X_{\text{optimos}}$ , verifica que la T seleccionada por el usuario sea  $>0$  y verifica que las X iniciales estén dentro del rango fijado LB-UB.

FCN

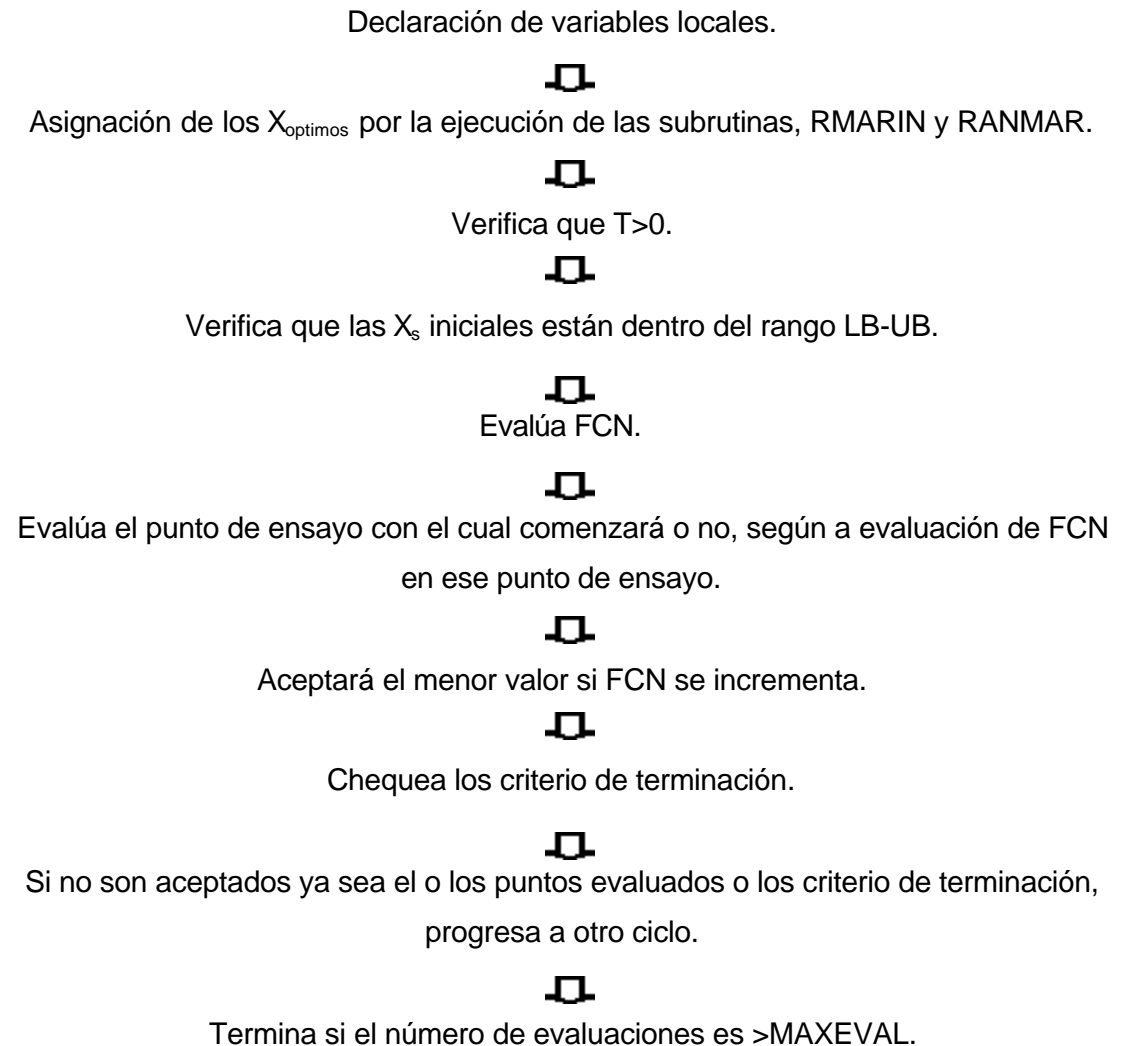
Función objetivo.

PRT1, PRT2, ..., PRT10

Subrutina de impresión de los valores intermedios, actuales, datos sobre el número de valores aceptados, rechazados, movimientos ascendentes, descendentes, tolerancia, valor de la función actual, valores intermedios, T actual, intermedia, leyendas correspondientes, etc.

### Temple o recocido simulado (SA)

La secuencia de ejecución de la subrutina que codifica el SA se bosqueja a continuación:



### **7.3.- Función objetivo.**

El proceso básico respecto al cual se diseñó la función objetivo, se puede bosquejar de la siguiente forma.

A cada una de las señales dirigidas, en este caso las señales provenientes de los distintos reflectores, se le aplica *n* conjunto de filtros, para luego ser sumadas y comparadas con la suma realizada de la señal o señales deseadas, esta comparación se hace mediante la resta de la suma de la señal filtrada de la suma de la señal deseada, lo que genera un error, y según la tolerancia respecto a ese error fijada y criterios de paro establecido, se vuelve a repetir o no el ciclo descrito.

De esta manera se logra filtrar las señales no deseadas y preservar las de interés.

En este trabajo se diseñó una subrutina o función objetivo, que fue usada con ligeras modificaciones en las diversas técnicas de búsqueda local y global y que permitió ejecutar el proceso de *Beamforming* descrito independientemente del método de búsqueda aplicado.

Este tipo de función, que permite aplicar sobre las señales la función deseada y que es independiente del algoritmo de búsqueda utilizado se conoce como función objetivo.

La aplicación de los filtros es lo que permite crear el arreglo directivo de geófonos, lo que se logra mediante la suma ponderada a la salida del arreglo.

El diseño y secuencia de ejecución de la función objetivo construida es:

La subrutina inicia con un bloque de declaración o adaptación de los parámetros y variables de entrada necesarios para la aplicación del método escogido. Igualmente aquí se definen las matrices de los datos correspondientes a la señal a procesar y a la señal deseada o de referencia.



Se ejecuta un ciclo de asignación de los coeficientes de los filtros generados por el método aplicado, según las variables internas de la función objetivo.



FILTROS\_FUNCION OBJETIVO ← FILTROS\_MÉTODO



Accesa los archivos de datos binarios, que contienen los datos a procesar y los datos de referencia.



Realiza la aplicación de los filtros por medio de la convolución de estos con los datos de entrada.

DATOS\_ENTRADA \* CONJUNTO DE FILTROS.



Realiza la comparación de los datos filtrados con los datos de referencia y guarda esta en la variable SUMA.

$SUMA = SUMA + (DATOS\_REFERENCIA - DATOS\_FILTRADOS)^2$



La condición de salida que va a controlar al algoritmo de búsqueda implementado es:

Función\_objetivo = SUMA.



Se repite el proceso, mientras no se cumplan los criterios de paro.

## ***CAPITULO 8***

### ***RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS***

En este capítulo se presentan los datos sintéticos adquiridos sobre los modelos descritos, y los sectores seleccionados sin procesar, sobre los cuales se realizaron las diferentes pruebas correspondientes a las diferentes técnicas expuestas, con los resultados obtenidos y su análisis.

#### ***8.1.- Eliminación de frentes de ondas según ángulos de interés, aplicando el algoritmo, LMS.***

##### ***8.1.1.- Generación de datos sintéticos.***

En el caso del modelo simple con una capa de baja velocidad, se generaron 2 sismogramas sintéticos adquiridos con 800 canales y 4000 muestras en formato binario.

En el primer sismograma generado, FIGURA N° 8.2, que corresponde al modelo simple completo, se recorto una sección que presenta con nitidez los dos



reflectores, tanto el de interés como el de referencia, las dimensiones elegidas fueron de 151 trazas y 1000 muestras en profundidad.

El segundo sismograma generado, FIGURAS N° 8.4 corresponde al modelo simple sin reflector buzante. Las secciones recortadas en ambos modelos tienen las mismas dimensiones y están en la misma ubicación

Los datos seleccionados en ambos sismogramas fueron utilizados tanto en la implementación del algoritmo de búsqueda local, LMS, como en las pruebas realizadas con los algoritmos de búsqueda global.

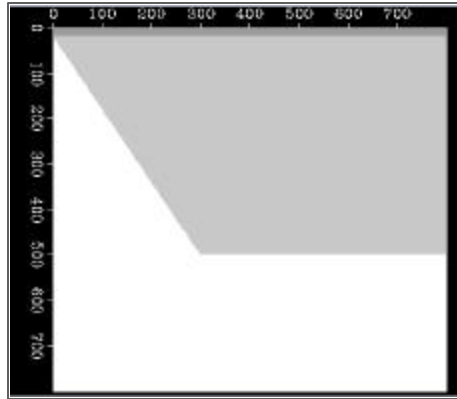


FIGURA N° 8.1, modelo simple completo con capa de baja velocidad, M1.

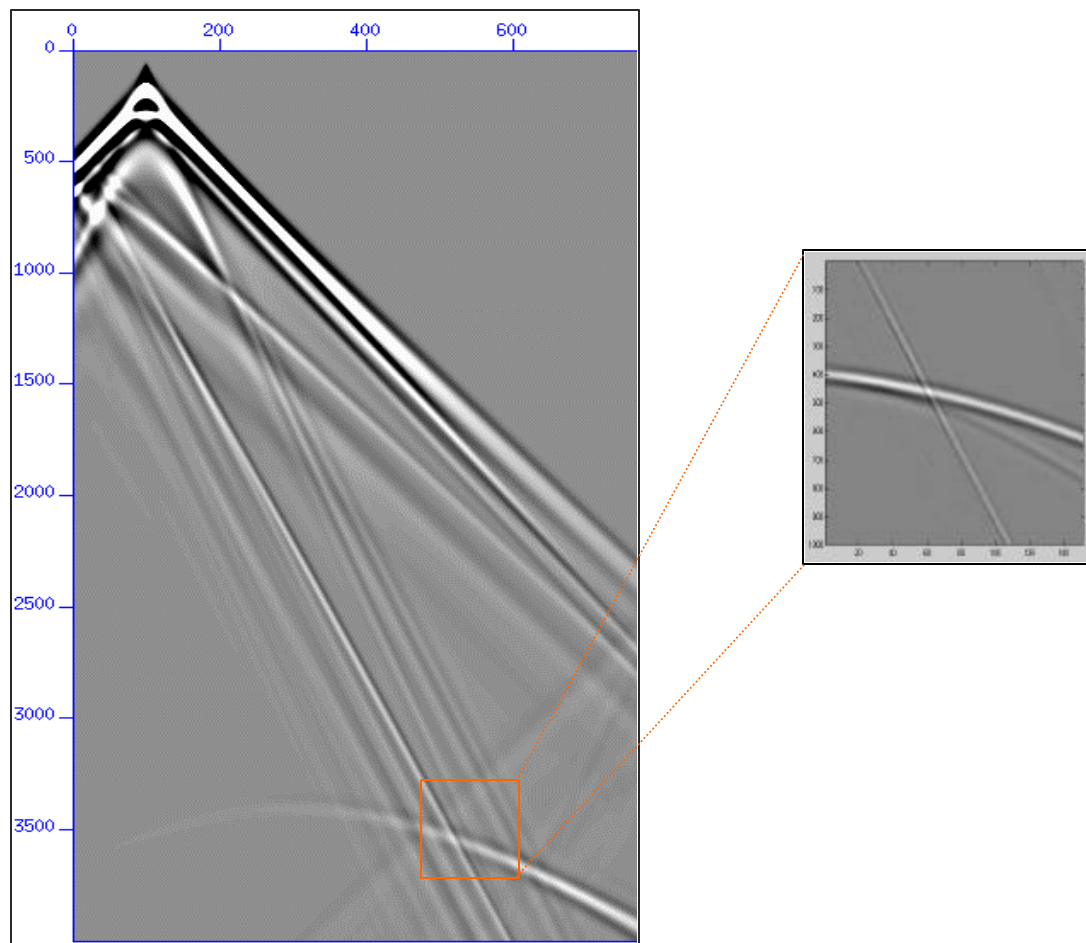


FIGURA N°8.2, sección sísmica sintética, correspondiente a M1 y sección recortada.

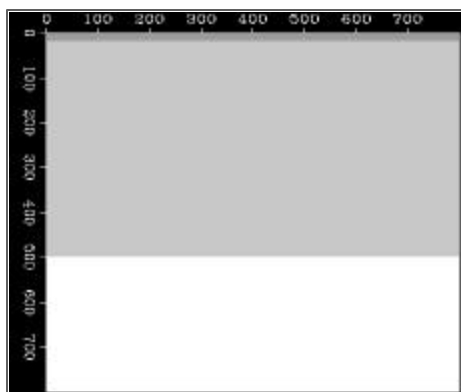


FIGURA N° 8.3, modelo simple con capa de baja velocidad sin el reflector buzante, M1h.

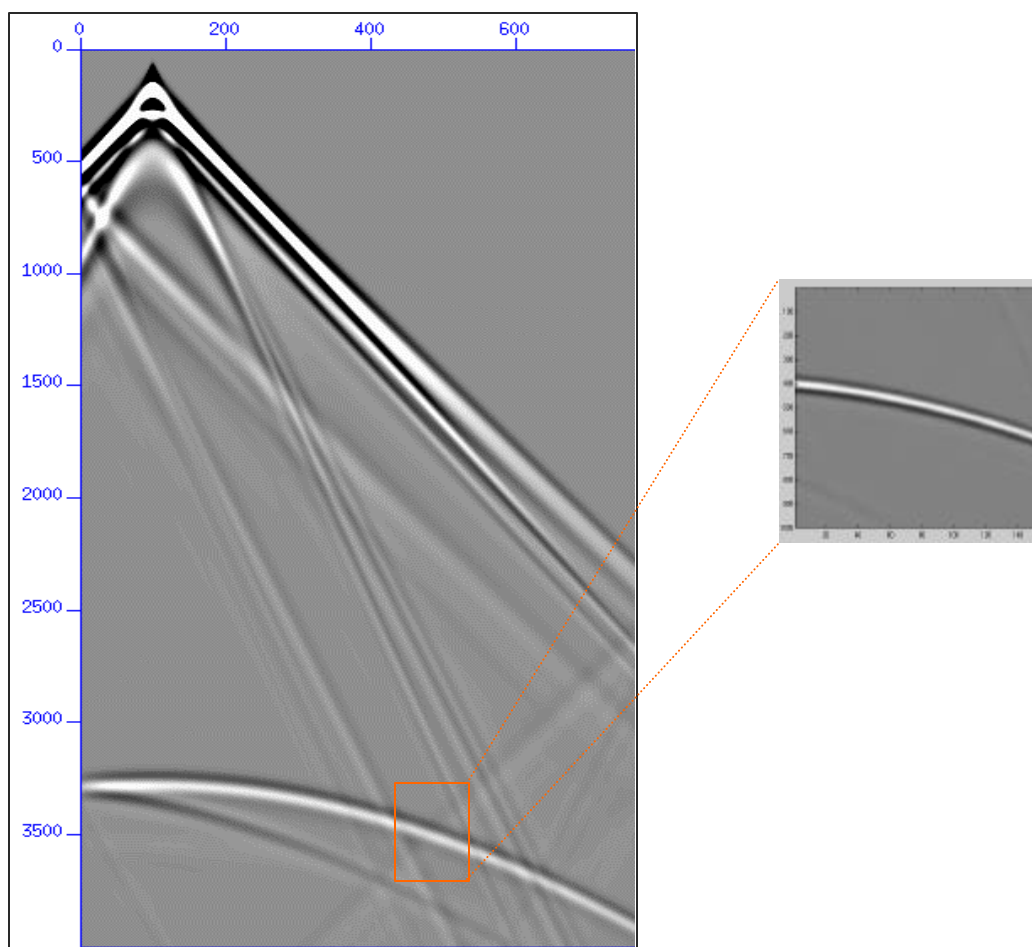


FIGURA N° 8.4, sección sísmica sintética sin el reflector inclinado, correspondiente a M1h y una sección recortada.

### 8.1.2.- Resultados obtenidos y su análisis.

A continuación se muestra la sección deseada, FIGURA N° 8.5, sección original (sección recortada del sismograma sintético del modelo simple completo, M1), sección filtrada y curva de error generada al aplicar el algoritmo de búsqueda local LMS, FIGURA N° 8.6.

Para este algoritmo tal como se demostró en la primera aplicación desarrollada por PDVSA\_Intevep, es necesario tener un buen punto de partida, lo que obliga al diseño previo de un conjunto de filtros iniciales, para garantizar la convergencia del algoritmo, para esta aplicación esta sería la eliminación o máxima atenuación del reflector inclinado, el cual representa la señal no deseada.

La ventaja que se encontró en su uso, parte de la limitación expuesta, ya que al diseñar un buen conjunto de filtros iniciales, que permita un buen punto de partida, el algoritmo siempre, bajo estas condiciones, encuentra la solución (converge), y lo hace, al comparar sus resultados con los obtenidos con los algoritmos de búsqueda global, presentados en el punto 8.2, relativamente mas rápido.

Respecto a los resultados obtenidos, el algoritmo limpia de forma bastante eficiente las señales no deseadas, que se escogieron como las reflexiones provenientes del reflector buzante y es efectivo en la preservación de la fase del evento de interés, pero esta efectividad es menor en la preservación de las amplitudes, las cuales son ligeramente distorsionadas.

La gráfica de error se estabiliza a partir aproximadamente 80 iteraciones, y el valor del error oscila entre -0.05 - 0.05.

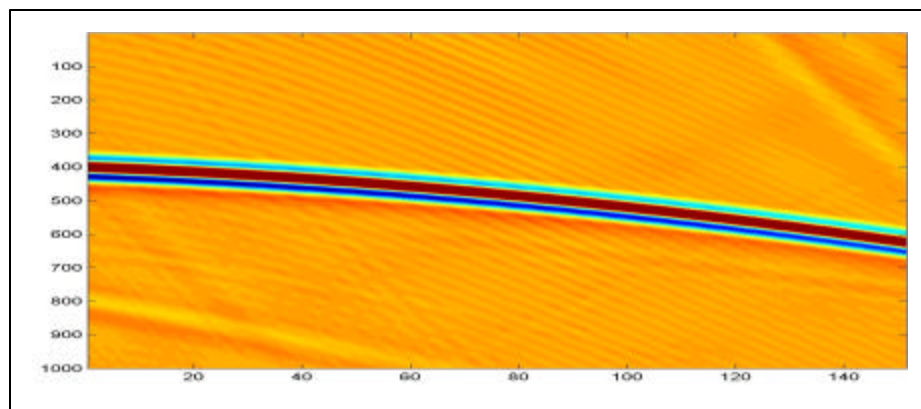


FIGURA N° 8.5, sección deseada.

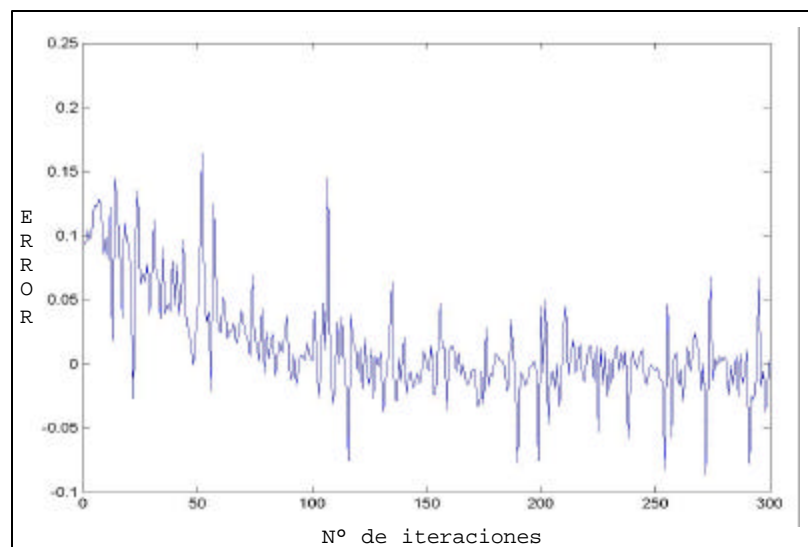
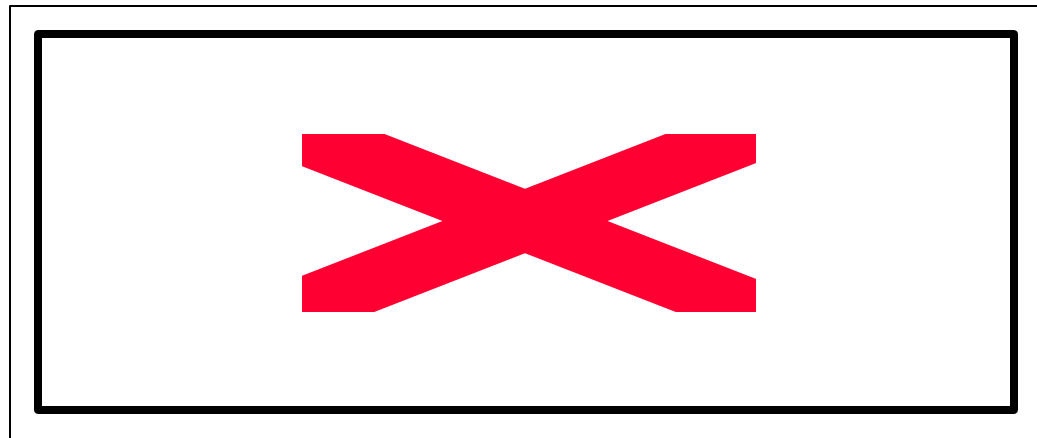
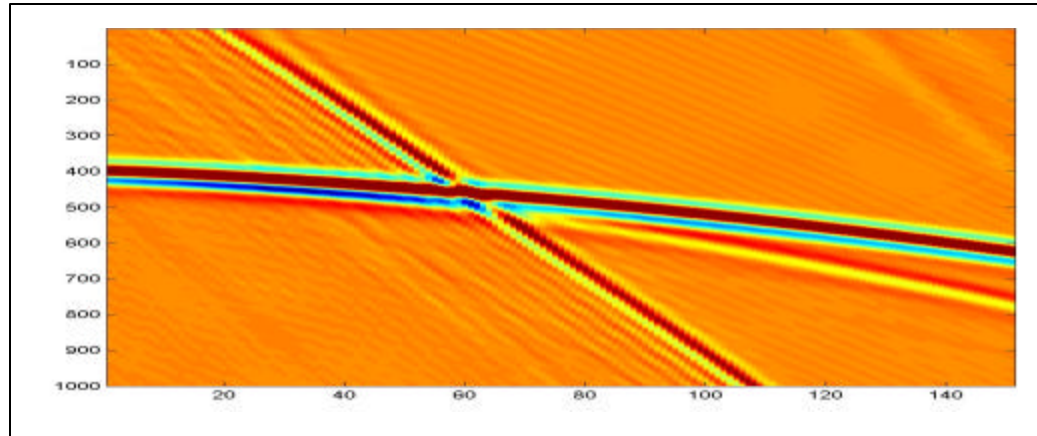


FIGURA N° 8.6, sección original, sección filtrada y curva de error, obtenidas en la aplicación del algoritmo LMS.

## **8.2.- Eliminación de frentes de ondas aplicando algoritmo de búsqueda global, en un modelo simple con una capa de baja velocidad, resultados.**

Resultados obtenidos con el SA.

A continuación se muestra la secuencia de resultados obtenidos, colocados en forma ascendente respecto al número de iteraciones (desde 500 iteraciones hasta 20000 iteraciones), en la eliminación del frente de ondas provenientes del reflector inclinado aplicando un algoritmo de búsqueda global utilizando la técnica del SA, FIGURAS N° 8.7, 8.8 y 8.9.

Se obtuvieron 6 secciones filtradas, numeradas del 1 al 5, ajustando los coeficientes de un conjunto de filtros de 60 muestras, aplicados a cada una, según el conjunto de parámetros:

Tolerancia (EPS) =  $10^{-3}$

Factor de reducción de la temperatura (RT) = 0.87

Números de ciclos (NS) = 10

Número de iteraciones antes de la reducción de la temperatura (NT) = 20

Temperatura (T) = 5

Dando esta combinación los mejores resultados observados, dejándose fijo este conjunto de parámetros para todas las pruebas realizada, para poder comparar la evolución de estos resultados, respecto al número de iteraciones necesarias, para la convergencia del algoritmo, *i.e.*, la eliminación o máxima atenuación de la señal no deseada, en este caso el reflector inclinado.

Luego, para el menor número de iteraciones utilizados, 500 iteraciones, sección filtrada 1, se observó casi o ninguna atenuación de la señal que interesa cancelar.

Al aumentar el número de iteraciones a 1000, sección filtrada 2, el algoritmo comienza a converger, se observan bastante atenuadas las reflexiones provenientes del reflector inclinado, lo que se acentuó al incrementar el número de iteraciones a 3000, sección filtrada 3.

Para 5000 iteraciones, sección filtrada 4, se obtuvo un reflector inclinado significativamente atenuado.

Con 8000 iteraciones, sección filtrada 5, se conserva la efectividad del algoritmo en la cancelación de las reflexiones del evento buzante, pero no se nota un incremento de esta efectividad.

Se presento una disminución de la efectividad del algoritmo en la cancelación del evento inclinado, con 10000 iteraciones, sección filtrada 6, lo que indica que el algoritmo no siempre converge, tal que su efectividad no se incrementa en forma lineal.

Para 20000 iteraciones, sección filtrada 7, el algoritmo vuelve a converger, obteniéndose un resultado muy similar al observado en la sección filtrada 5, no presentándose ningún aumento apreciable en la eficiencia del algoritmo.

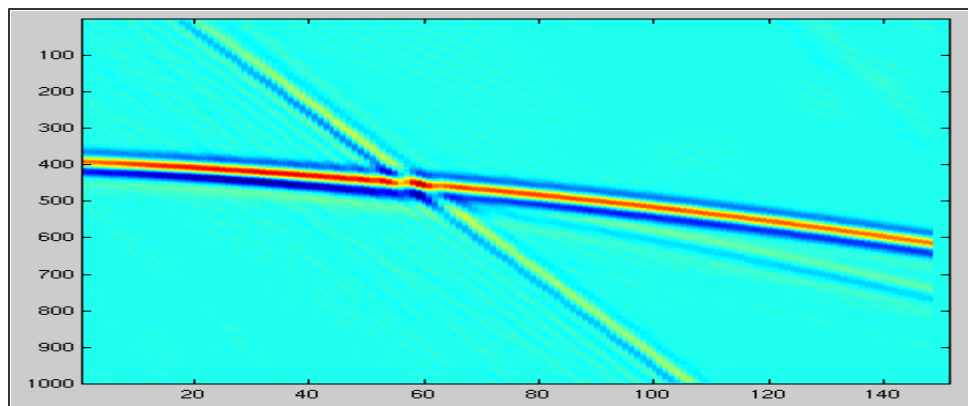
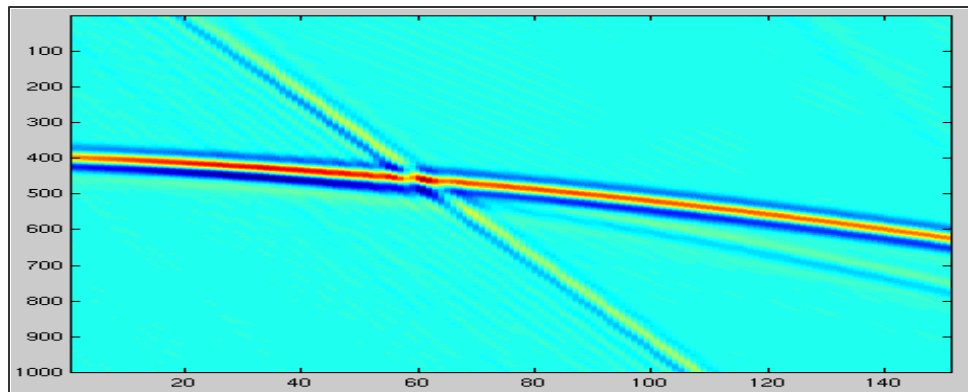
En todas las pruebas, en las cuales el algoritmo converge, esta técnica se muestra eficiente en la preservación de la fase, en los sectores donde se encuentran las señales a cancelar, y en la preservación del evento de interés, en este caso el reflector horizontal.

Las principales desventajas de esta técnica en este tipo de aplicación se refieren, a la lentitud en la convergencia del algoritmo, lo que implica un gran número de iteraciones necesarias para encontrar la solución y a la naturaleza empírica de la convergencia respecto al número de iteraciones, lo cual no se garantiza al incrementar las mismas.

Otra limitación de importancia que afecta directamente el tiempo invertido en la puesta en funcionamiento del algoritmo, según las condiciones y características de la solución a encontrar, se refiere a la calibración de los parámetros del algoritmo, ya que no se dispone en experiencias previas de ningún seguimiento estadístico o de algún tipo de relaciones o reglas que permitan fijar con rapidez los parámetros más óptimos.

La principal ventaja de este algoritmo es su robustez tanto como para trabajar con un elevado número de variables como para trabajar con superficies no cuadráticas.

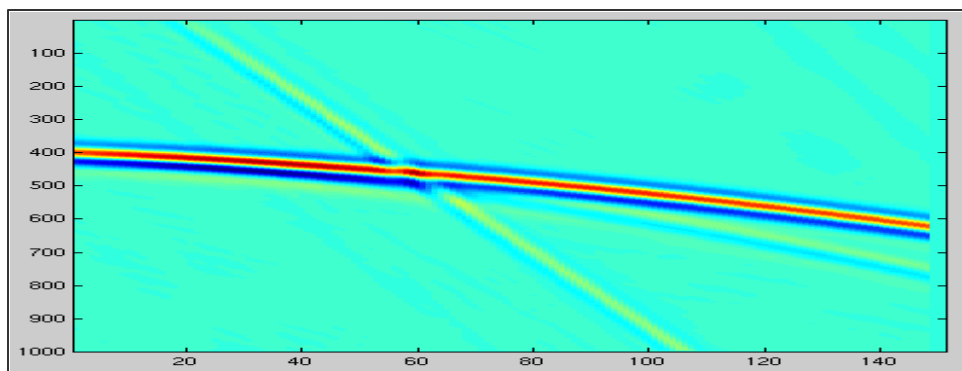
Otra gran ventaja es que no necesita un buen punto de partida, (para el caso que nos ocupa sería, el diseño de un conjunto de filtros iniciales) para converger o encontrar la solución.



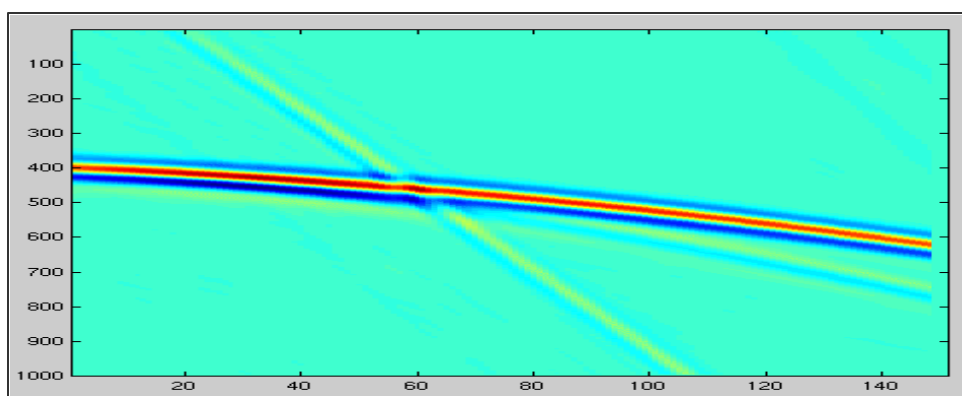
(1) 500 iteraciones.

FIGURA N° 8.7, sección original y sección filtrada (1).

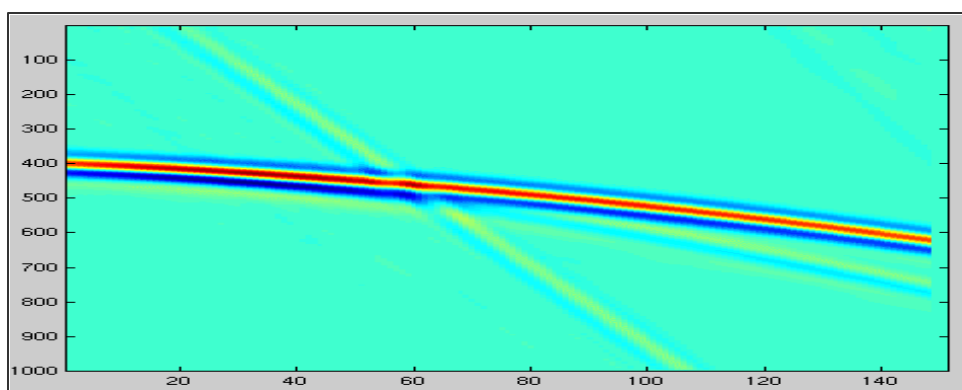




(2) 1000 iteraciones.

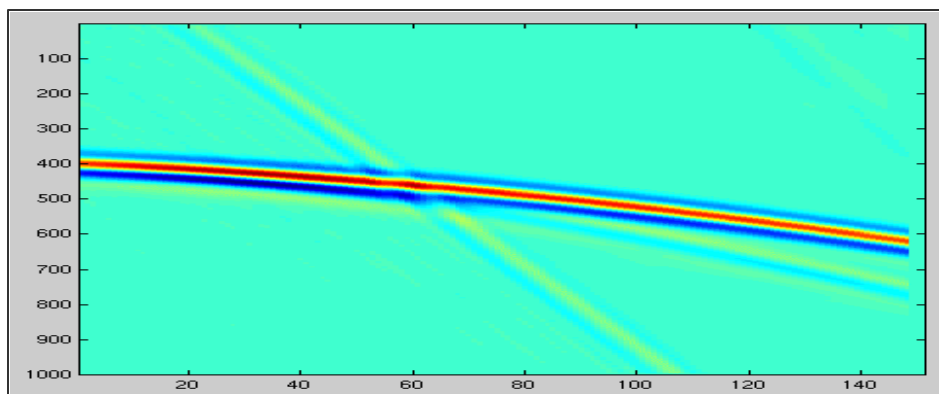


(3) 3000 iteraciones.

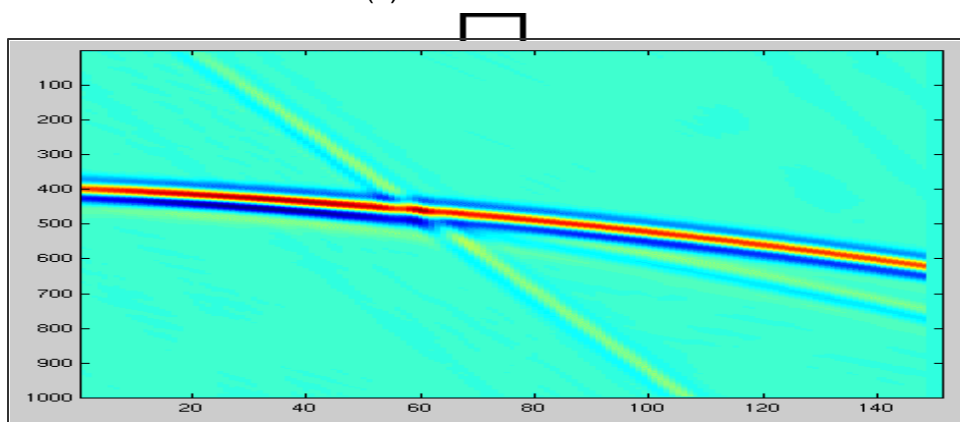


(4) 5000 iteraciones.

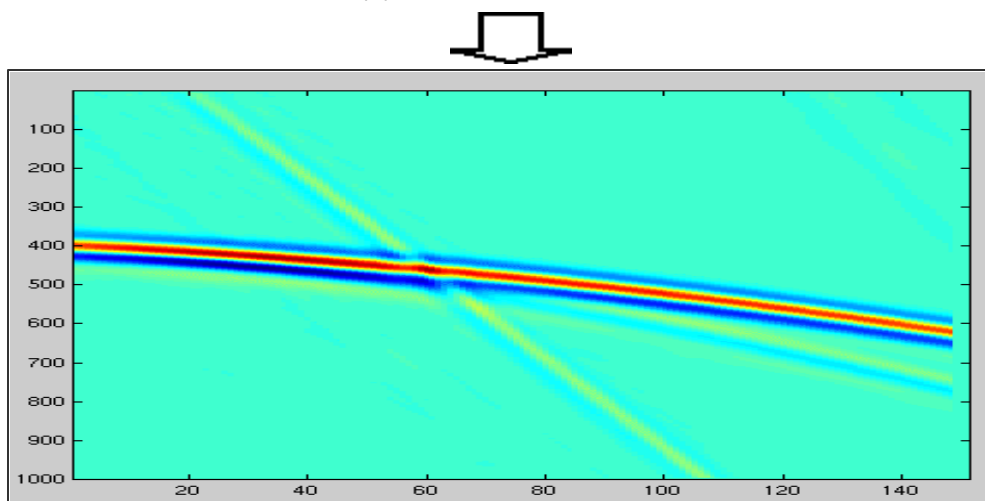
FIGURA N° 8.8, secciones filtradas (2), (3) y (4).



(5) 8000 iteraciones.



(6) 10000 iteraciones



(7) 20000 iteraciones.

FIGURA N° 8.9, secciones filtradas (5), (6) y (7).

## Resultados obtenidos con el AG.

En la eliminación del frente de ondas provenientes del evento inclinado, aplicando un algoritmo de búsqueda global utilizando la técnica AG, se obtuvieron 4 secciones filtradas, numeradas del 1 al 4, aplicándose un conjunto de 60 filtros, cuyos coeficientes fueron ajustados.

Se conservo el mismo número de filtros utilizado en la aplicación de la técnica del SA, con la finalidad de tener un punto de referencia, que permitiera comparar los resultados obtenidos con ambas técnicas.

El conjunto de parámetros fijados durante el desarrollo de las pruebas fue:

```
irestrt =0
microga =0
npopsiz =50 - 200
nparam =60
pmutate =0.02d0
maxgen =10
idum =-1000
pcross =0.5d0
itourny =1
ielite =1
icreep =0
pcreep =0.04d0
iunifrm =1
iniche =0
nchild =1
iskip =0
iend =0
nowrite =1
kountmx =5
parmin =60*-1
parmax =60*1
nposibl =60*32768
nichflg =60*2
```

En este caso sé vario el número de individuos.

Luego, para 50 individuos, sección filtrada 1, el algoritmo comienza a converger, *i.e.* se observa una atenuación moderada del reflector inclinado.

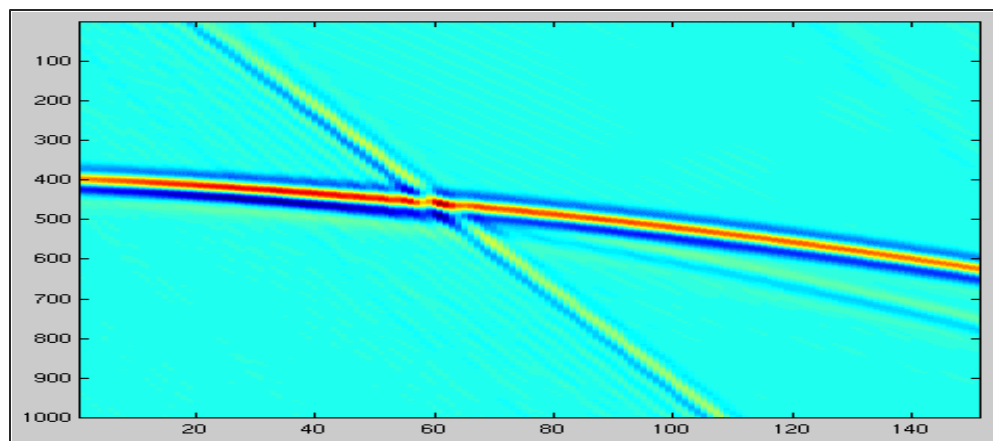
Para 100 individuos, sección filtrada 2, las señales provenientes de reflector inclinado son atenuadas y se produce un cambio de fase.

Al incrementar el número de individuos a 150, sección filtrada 3, el algoritmo es más eficiente tanto en la atenuación del reflector inclinado como en la preservación de la fase.

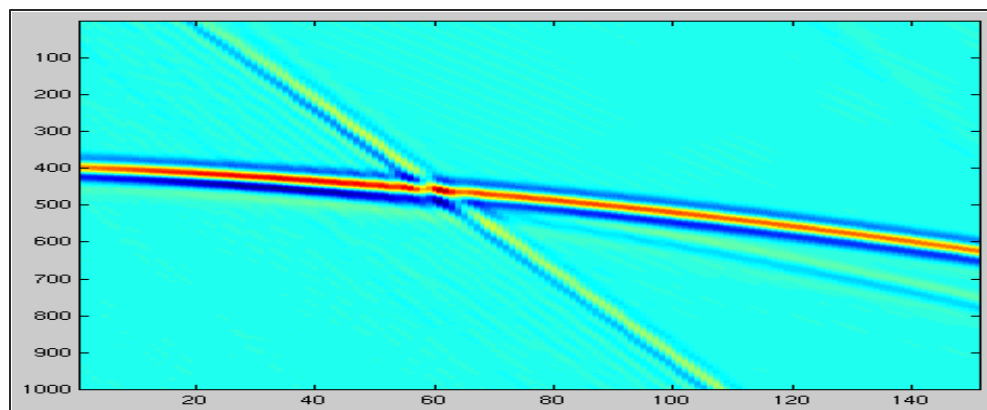
Con 200 individuos, sección filtrada 4, no se observa mayor variación en la eficiencia del algoritmo en la atenuación de las señales provenientes del reflector inclinado y continua preservando tanto la fase como la amplitud.

En todas las pruebas, se observó una buena preservación del reflector de interés, el evento horizontal.

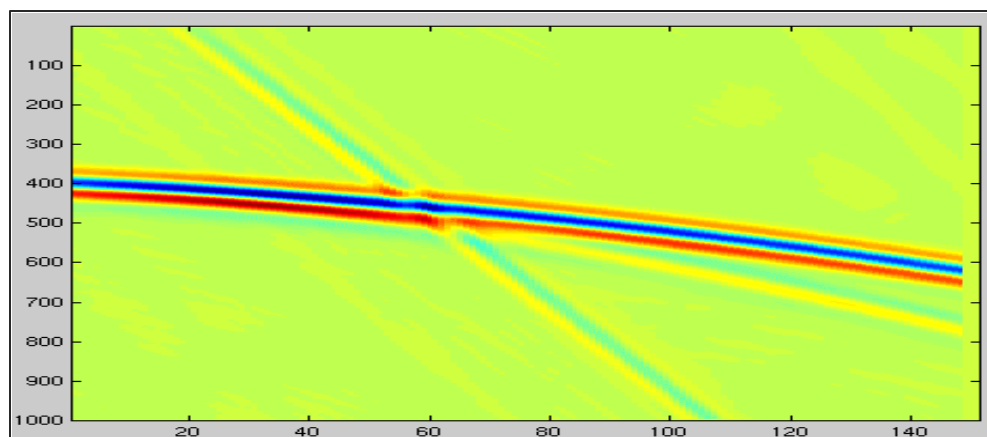
Esta técnica, bajo las condiciones descritas, converge en menor tiempo que la anteriormente descrita, pero es menos eficiente en la preservación de la fase, en los sectores donde se localizan las señales a cancelar.



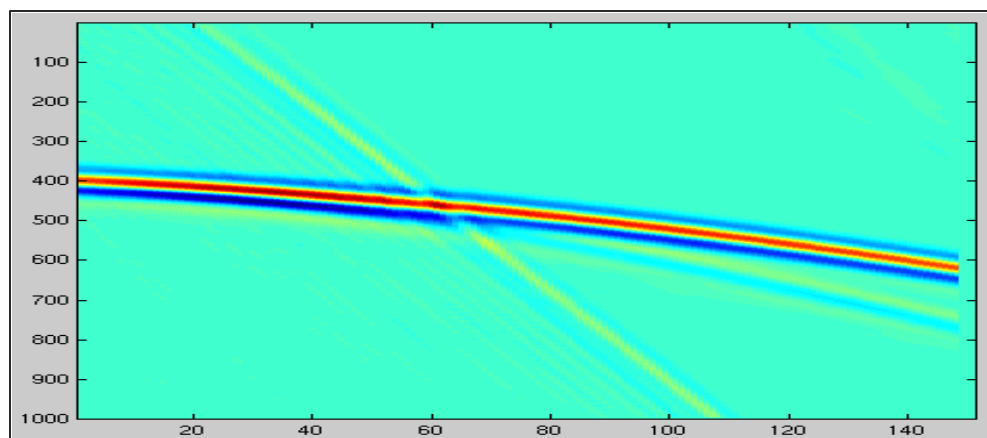
Sección original.



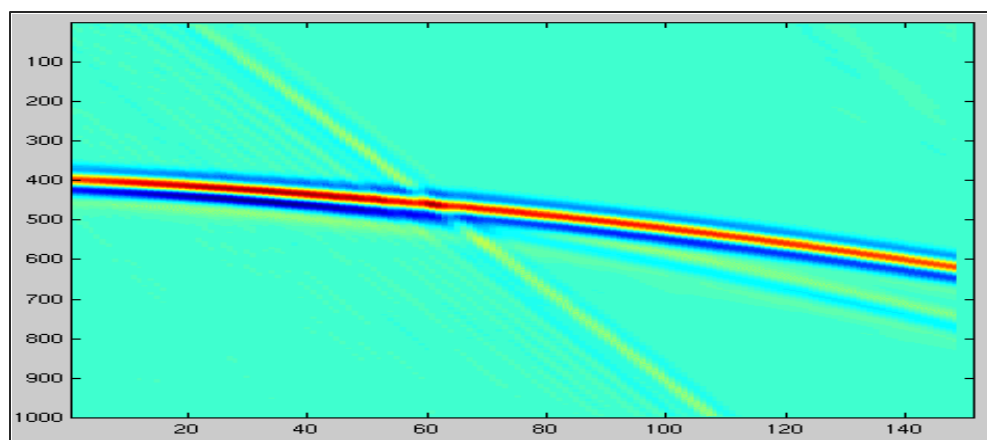
(1) 50 individuos.



(2) 100 individuos.



(3) 150 individuos.



(4) 200 individuos.

FIGURA 8.10, sección original y secciones filtradas (1) y (2), (3) y (4), obtenidas aplicando la técnica de AG.

Resultados obtenidos con el método de propagación hacia atrás.

En la realización de la prueba correspondiente a la eliminación del frente de ondas provenientes del reflector inclinado aplicando un algoritmo de búsqueda global diseñado utilizando las herramientas de programación de redes neuronales, específicamente el método conocido como propagación hacia atrás, se selecciono para el entrenamiento la red mostrada en la FIGURA N° 8.12.

Para este entrenamiento se selecciono un conjunto de datos de prueba de 2000 pixels y un conjunto de datos de entrenamiento de la red de 8000 pixels, ambos conjuntos fueron seleccionados aleatoriamente de los sectores encerrados en los recuadros, FIGURA N°8.11.

Estos sectores (encerrados en los recuadros) se escogieron según las características de las señales que se deseaban aprendiera la red, tal que el primer recuadro presenta tanto el evento a preservar, el reflector horizontal, como el que se desea cancelar, el reflector inclinado. El segundo recuadro inmediato, presenta las características solamente del reflector inclinado y del entorno. El primer recuadro seleccionado en la sección deseada (la que se genero conteniendo solamente el reflector horizontal), contiene el evento deseado y el ultimo recuadro escogido se hizo con la finalidad de que la red aprendiera las características de un sector donde no se encuentran ninguno de las dos señales.

Luego de escogidos los conjuntos de datos tanto de entrenamiento como de prueba, se procedió a entrenar la red y el error de entrenamiento se muestra en la FIGURA N° 8.13.

Luego se uso esta red entrenada para general los resultados que se muestran en la FIGURA N° 8.14.

Para esta prueba la red neuronal utilizada mostró ser la más eficiente entre los métodos de búsqueda global aplicados, siendo realmente efectiva en la preservación del evento de interés tanto en amplitud como en fase, como eficiente en la máxima atenuación y en algunos sectores en la cancelación de las señales no deseadas.

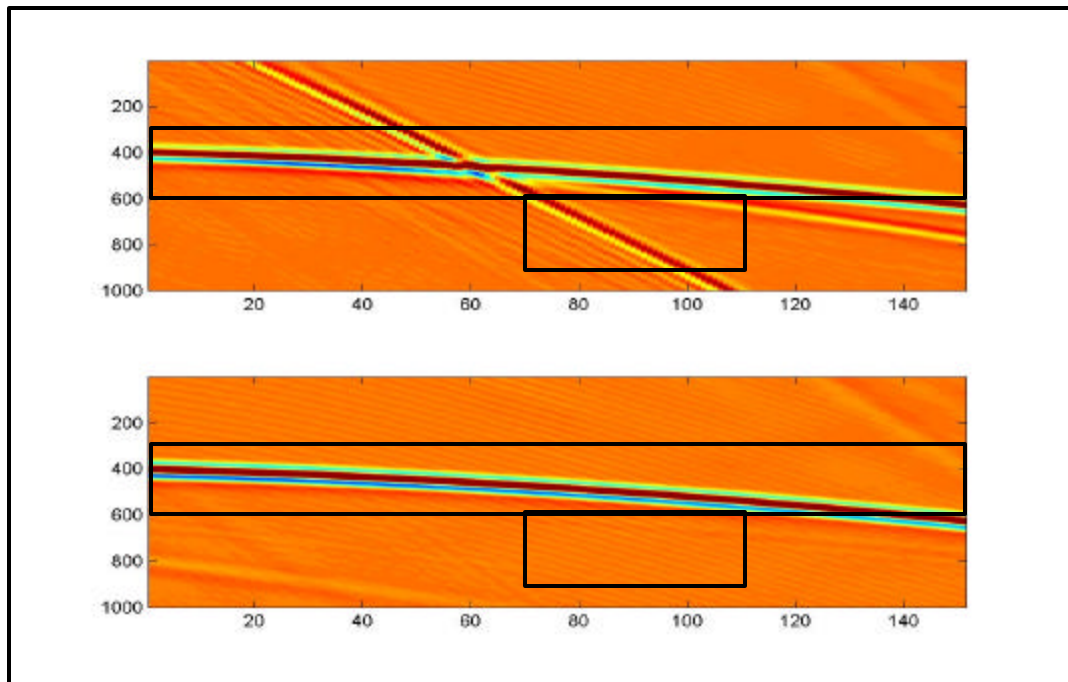


FIGURA N° 8.11, conjunto de datos tomados para el entrenamiento de la red neuronal diseñada. La primera sección es un conjunto de datos de 8000 pixels, la segunda contiene 2000 pixels

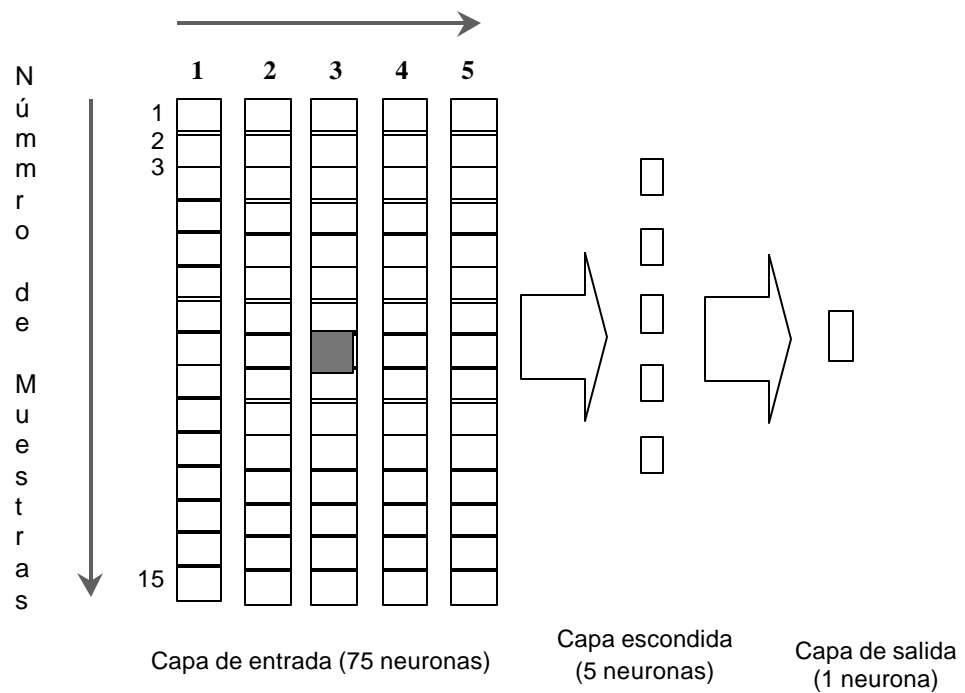


FIGURA N° 8.12, red neuronal utilizada.



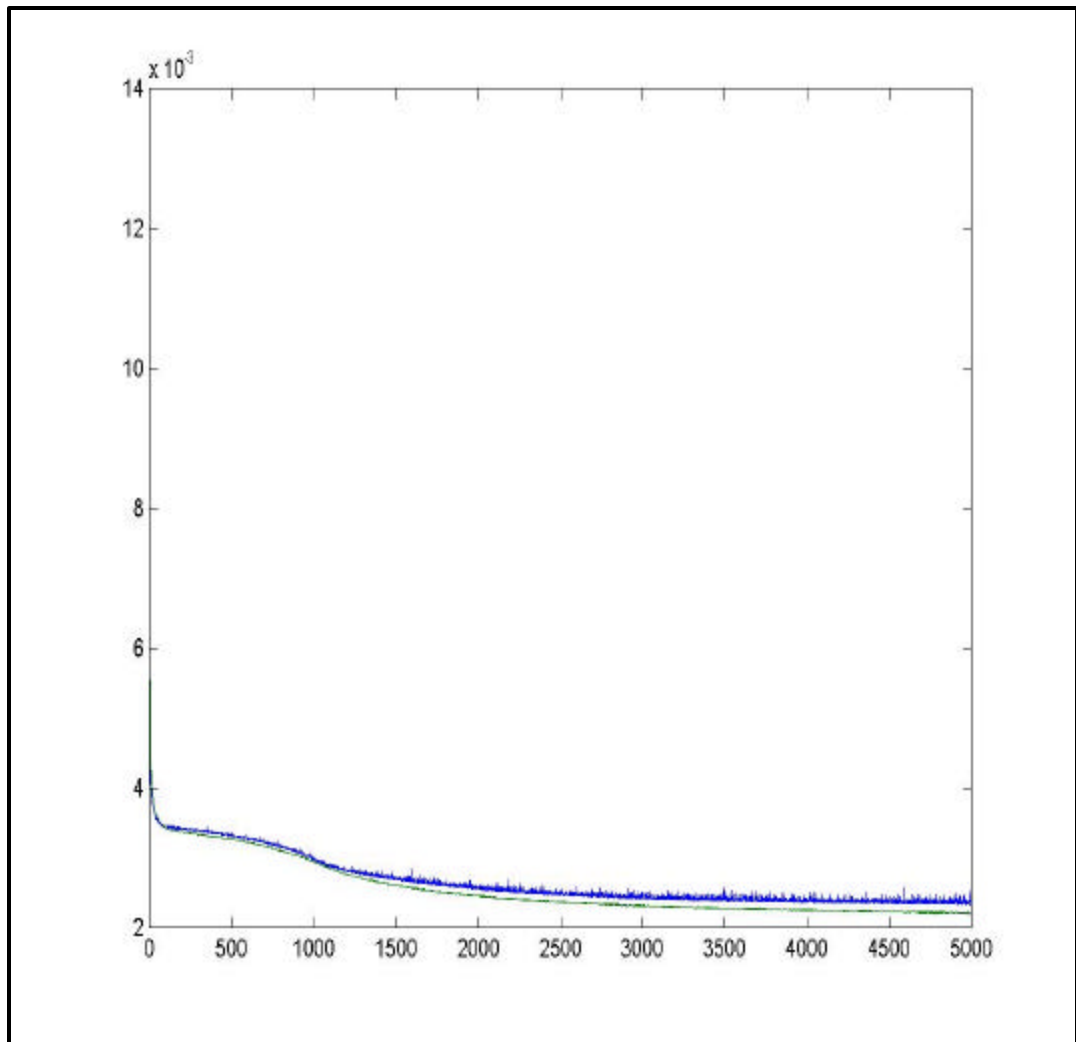


FIGURA N° 8.13, curva de error de entrenamiento.

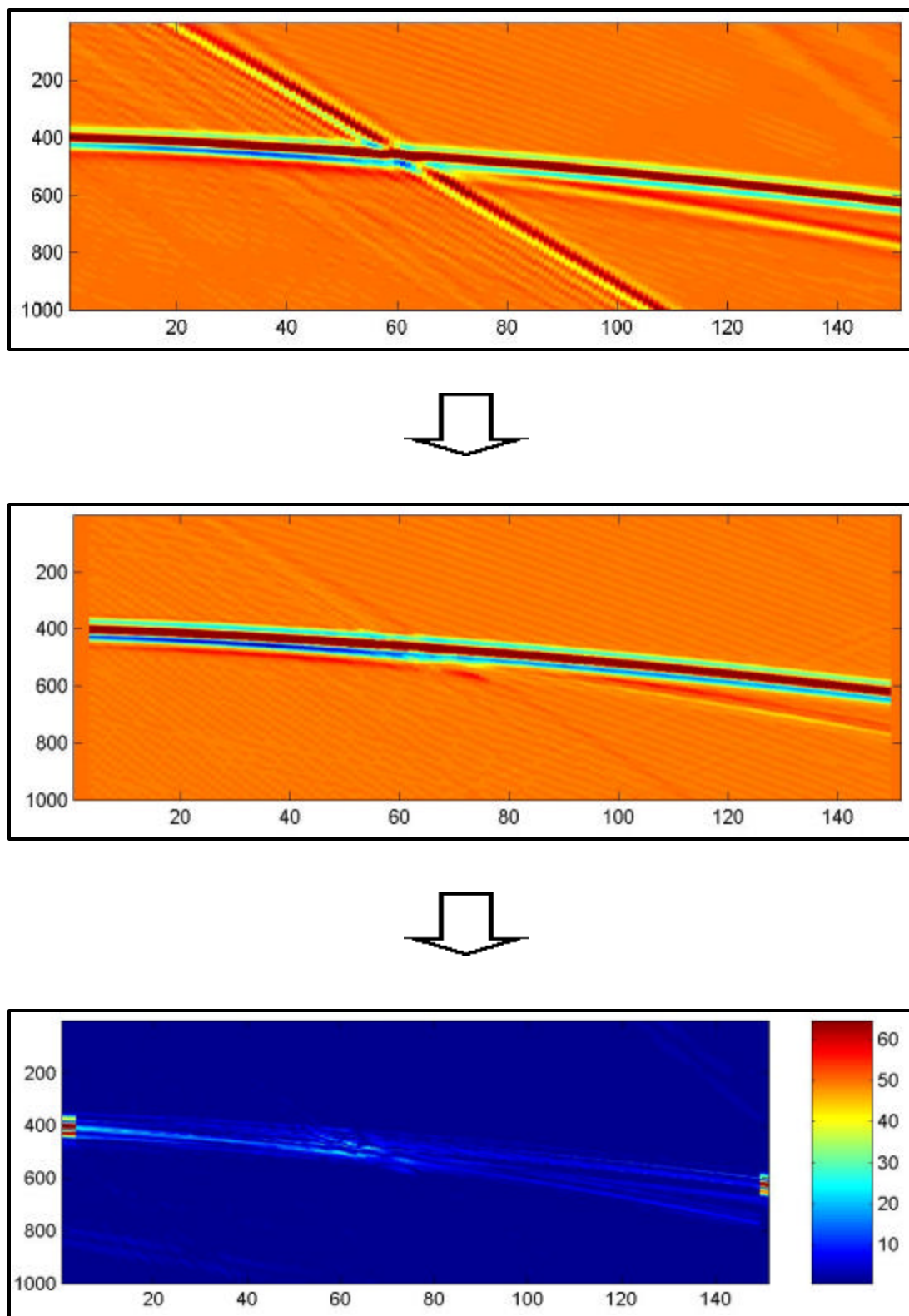


FIGURA 8.14, sección original, sección filtrada y error relativo, obtenidos aplicando la técnica BPN.

**8.3.- Eliminación de frentes de ondas según ángulos de interés, en dos modelos simplificados que representa algunos sectores del Lago de Maracaibo con presencia de capas de lodo, arcillas blandas y/o gas.**

**8.3.1.- Generación de datos sintéticos.**

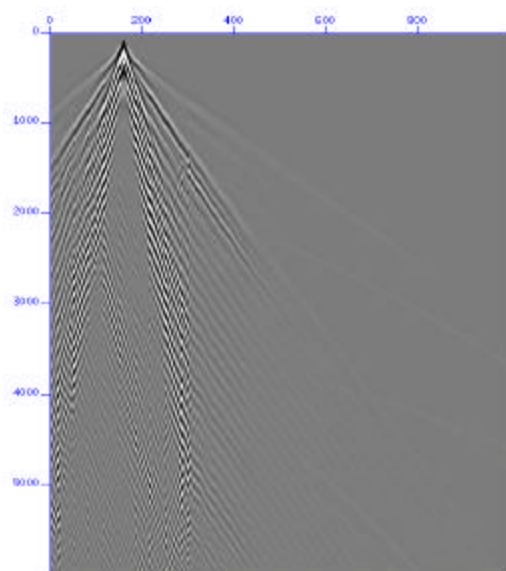
En el caso del Lago de Maracaibo, se generaron 6 sismogramas sintéticos adquiridos con 1000 canales y 6000 muestras en formato binario, tres correspondientes a los modelos completos y tres generados de los modelos sin la capa de lodo y arcillas blandas, denotados como sismogramas sintéticos limpios.

Para la zona de transición se generaron dos pares de sismogramas, un par se adquirió con la fuente colocada en el agua, FIGURA N° 8.15, con un sismograma correspondiente al modelo completo, sección A y uno del modelo sin las capas de lodo y arcillas blandas, sección B.

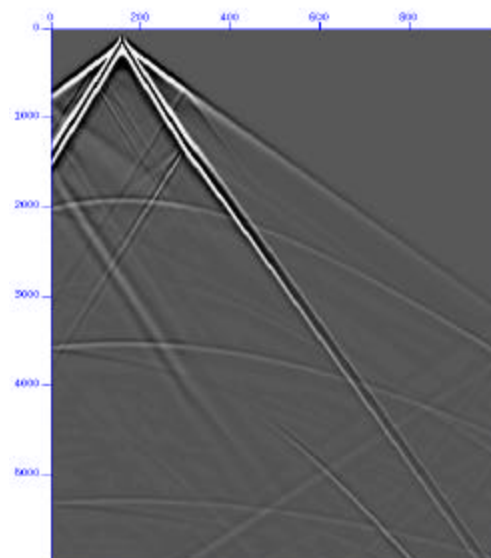
El segundo conjunto de sismogramas para la zona de transición, con la fuente colocada en tierra, FIGURA N° 8.16, que muestra en la sección C el sismograma del modelo completo y en la sección D el sismograma sintético limpio.

El ultimo conjunto de sismogramas generados corresponden al diseño del Lago de Maracaibo, ubicado completamente dentro del lago, FIGURA N° 8.17, sección E presenta el sismograma del modelo completo y la sección F, el sismograma sintético limpio.

Notar que la fuente en el modelo ubicado completamente en el agua, se colocó cerca de uno de los extremos (en sentido horizontal) con la finalidad de realizar la adquisición direccionada desde el otro extremo.

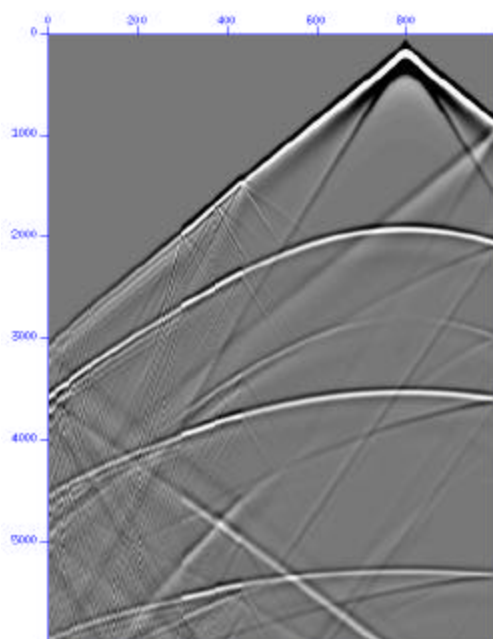


**A**

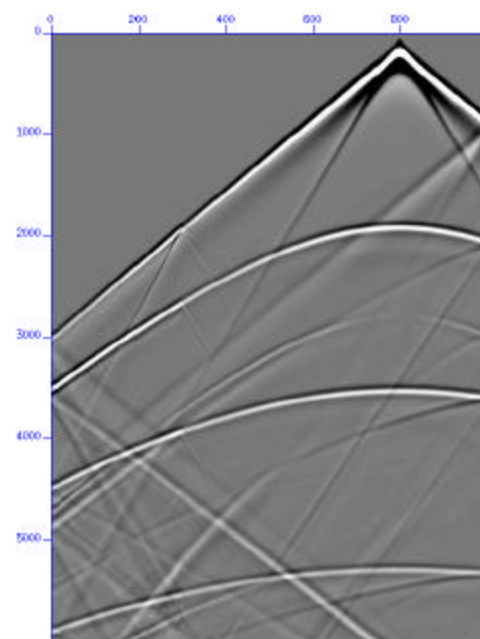


**B**

FIGURA N° 8.15 Sección sísmica completa del Lago de Maracaibo zona de transición, disparo en agua.



**C**



**D**

FIGURA N° 8.16, secciones sísmicas del Lago de Maracaibo, zona de transición, disparo en tierra.

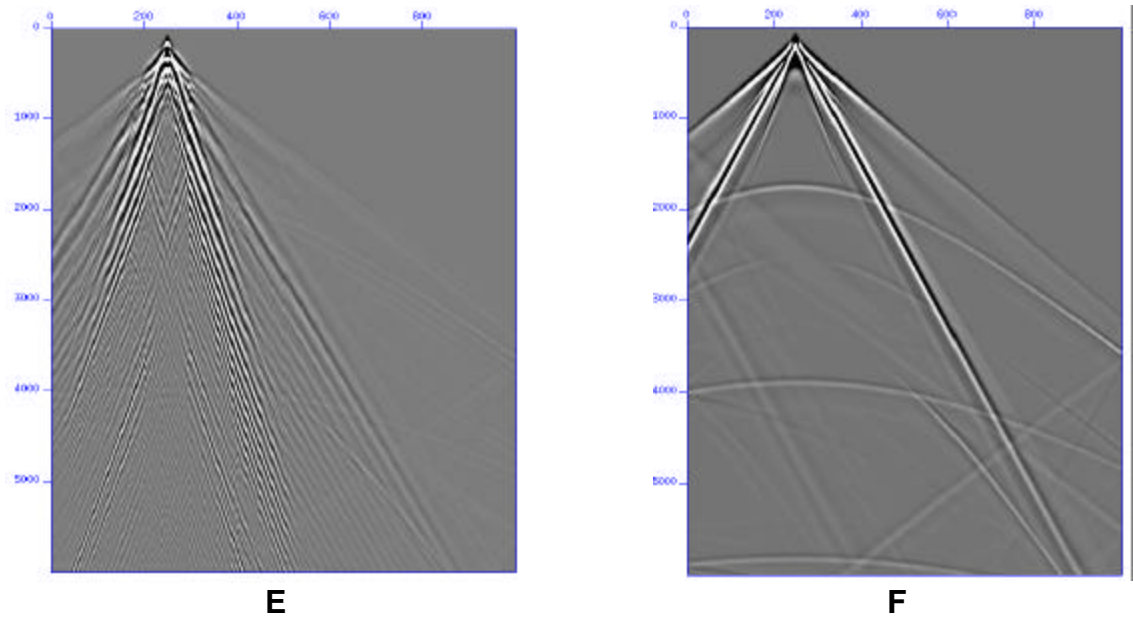


FIGURA N° 8.17, secciones sísmica del Lago de Maracaibo del modelo, ubicada completamente dentro del lago.

### 8.3.2.- Resultados.

Al compara los resultados obtenidos con el modelo simple con una capa de baja velocidad, utilizando algoritmos de búsqueda global en la aplicación de los distintos métodos, se encontró que la técnica de red neuronal utilizando el método de propagación hacia atrás, produjo los mejores resultados, lo que implica menor tiempo de convergencia del algoritmo y mayor efectividad en la preservación del evento de interés y en la eliminación de las señales no deseadas, por lo que se escogió esta técnica para realizar las distintas pruebas en los dos modelo diseñados del Lago de Maracaibo.

La primera prueba se realizo con la zona de transición, disparo en agua, en este caso el algoritmo no logra recuperar la señal, debido al ángulo critico, descrito por Pereira, 1992, como un problema de capas de baja velocidad, como las capas de lodo y arcillas blandas consideradas, de tal manera que toda la energía que incide sobre la frontera entre la capa de baja velocidad y el subsuelo, queda reverberando en el lodo y no penetra, tal que la energía sufre un rápido decaimiento al incidir en el fondo del lago, con un ángulo inferior al ángulo critico (estimado en  $20^\circ$ ), y un decaimiento más lento para ángulos superiores que genera ruido reverberante.

Para incrementar la penetración de la energía, se sugiere el diseño de fuentes que enfoquen la energía liberada dentro de este cono de  $20^\circ$  (Pereira, 1992).

En la segunda prueba realizada se selecciono un sector de la sección sísmica ubicada completamente dentro del lago, FIGURA 8.18, obteniéndose la sección filtrada, FIGURA N° 8.19, en la cual se observa que el algoritmo no logra limpiar la sección de las reverberaciones, múltiples y señales ruidosas que ocultan parte del evento de interés, y los sectores de este que se lograban percibir, se muestran más atenuados.

En este caso no se logra recuperar la señal que sufre una fuerte atenuación demasiado, debido a que pasa dos veces por la capa de lodo, siendo una de las características más importantes del lodo en el lago su baja velocidad, atribuido al alto contenido de gas, este se comporta como un filtro que atenúa las altas frecuencias lo que produce una perdida significativa en la resolución.

Para este ejercicio no se entreno la red neuronal, lo que se hizo fue una prueba rápida usando la red entrenada con el modelo simple, tomando en cuenta principalmente la similitud entre las características del evento a recuperar en ambos modelos.

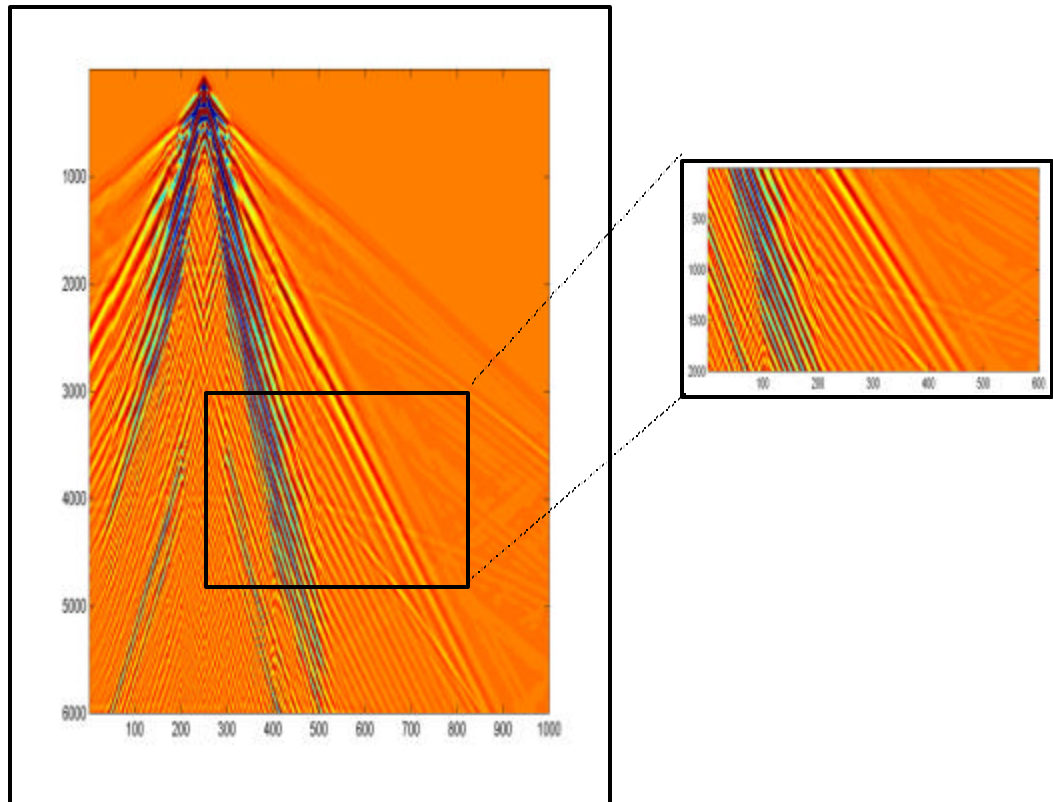


FIGURA N° 8.18, sección sísmica del modelo del Lago de Maracaibo, ubicada completamente dentro del lago y. el sector escogido.

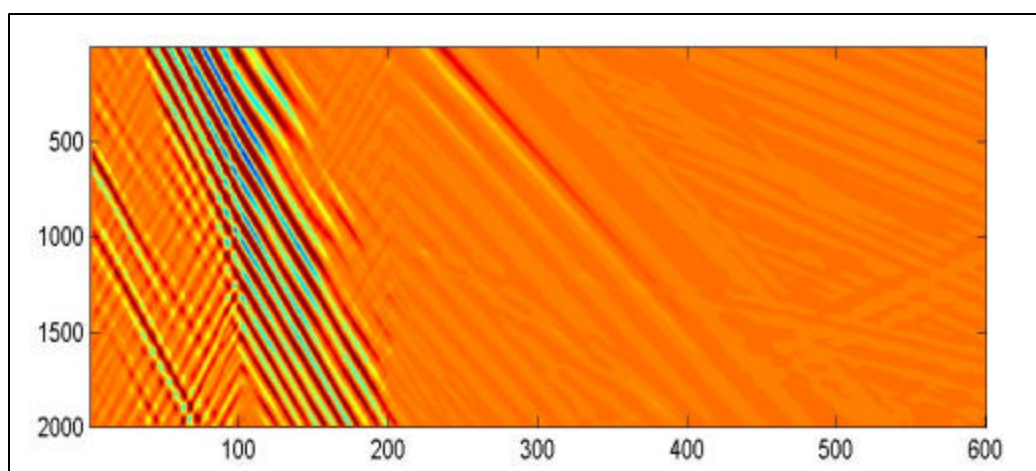
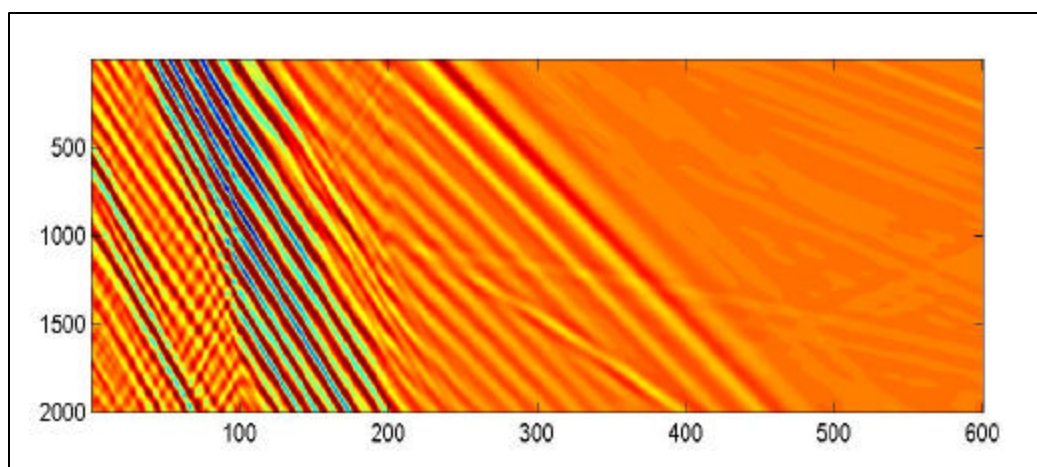


FIGURA N° 8.19, sección sísmica original y sección filtrada aplicando BPN.



Se realizaron 3 tipos de adquisiciones, para los 2 modelos diseñados del Lago de Maracaibo, dos en la zona de transición con la fuente colocada en el agua y con la fuente colocada en tierra y la tercera, en el modelo ubicado completamente dentro del lago.

Este proceso se hizo, debido a que el paso de la energía por la capa de lodo una o dos veces depende del modelo. En el caso de las pruebas realizadas con el modelo con una zona de transición, disparo en agua no se logro recuperar la señal debido al ángulo critico.

En el caso del modelo ubicado completamente dentro del lago, no se logro recuperar la señal, ya que al pasar dos veces por la capa de lodo, esta sufre una atenuación significativa.

Luego buscando obtener resultados positivos, se realizaron otras pruebas, pero esta vez seleccionando una sección del sismograma sintético generado en el modelo con una zona de transición, disparo en tierra, FIGURA N° 8.20.

Para este caso por no disponer de los datos correspondientes de la sección sísmica de la zona de transición en ausencia de la capa de lodo y capa de arcillas blandas, se crea una mascara, FIGURA N° 8.21 en la cual los sectores que no eran de interés se les asigno cero y a los sectores de interés se les asigno 1, tal que al multiplicar esta por la sección se generaron los datos de referencia.

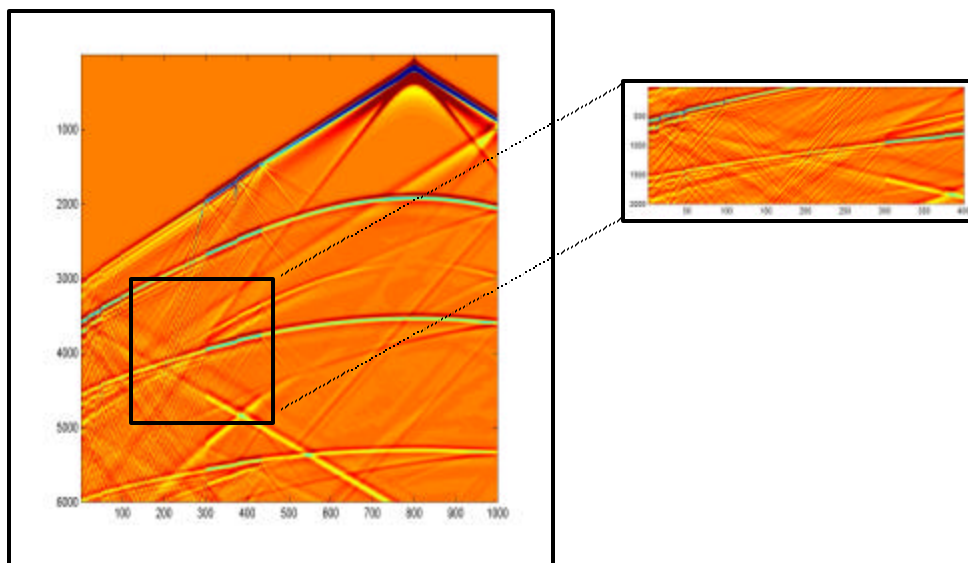


FIGURA N° 8.20, sección sísmica del Lago de Maracaibo zona de transición disparo en tierra, y sección recortada.

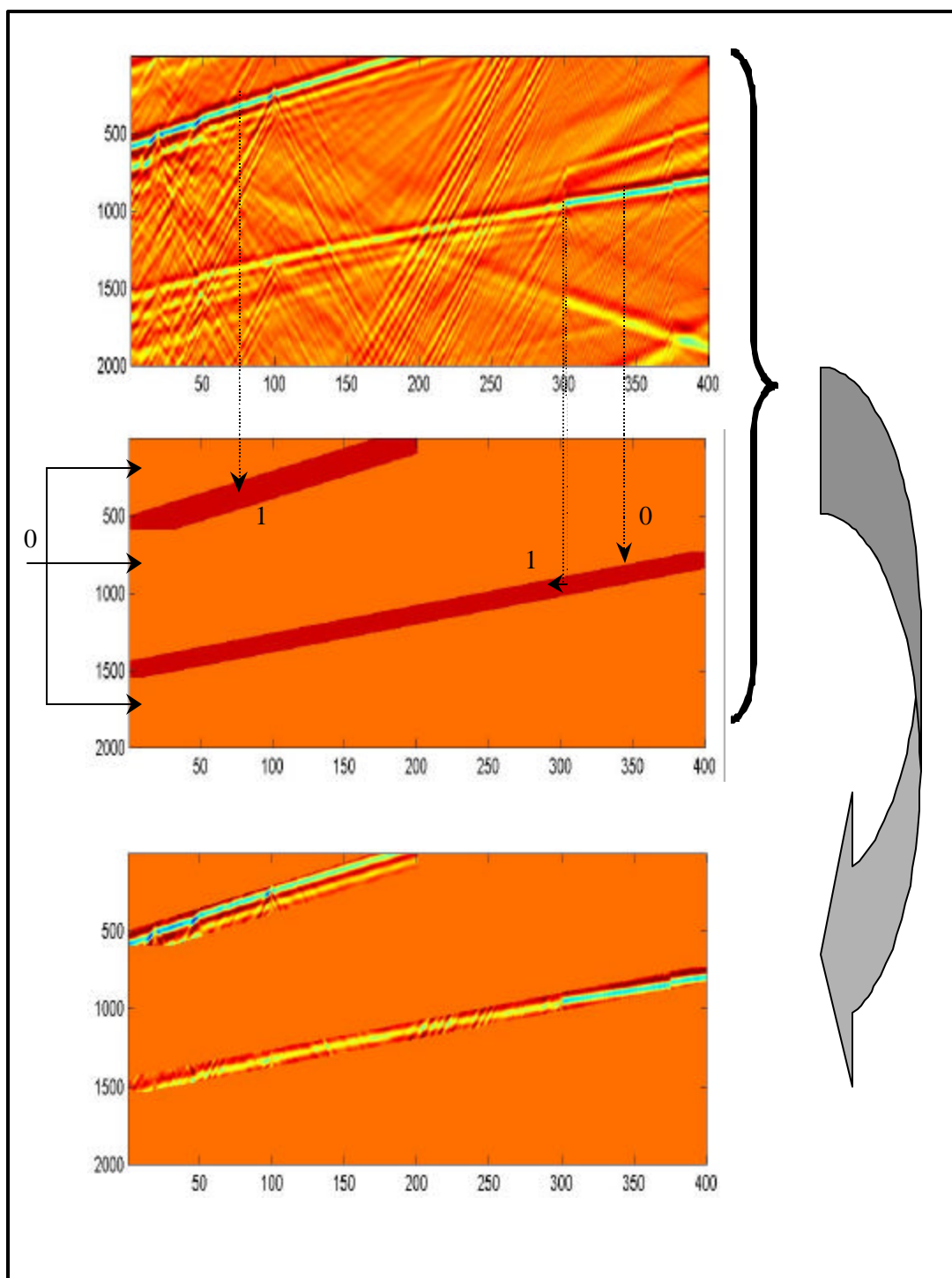


FIGURA N° 8.21, construcción de una seudo\_sección deseada.

De nuevo se realizó una prueba rápida utilizando la red entrenada con el modelo simple, basándose en el criterio ya expuesto, la similitud entre los eventos a recuperar. El conjunto de datos tomados para el entrenamiento de la red y la estructura de la red neuronal utilizada se muestran en la FIGURA N° 8.22, en la que se presenta en primer lugar la sección a filtrar, luego la máscara construida y finalmente el conjunto de datos de referencias generados.

Se seleccionó para el entrenamiento de la red un conjunto de datos de prueba de 2000 píxeles y un conjunto de datos de entrenamiento de 8000 píxeles, ambos conjuntos fueron seleccionados aleatoriamente de los sectores encerrados en los recuadros.

Estos sectores se escogieron según las características de las trazas que se deseaba aprendiera la red.

Sector A: Presenta el evento a recuperar de forma nítida.

Sector B: Presenta señales ruidosas en dos direcciones distintas, línea azul y Verde.

Sector C: Se seleccionó por presentar señales no deseadas con buena definición en una dirección.

Finalmente se procedió a entrenar la red neuronal, el error de entrenamiento se muestra en la FIGURA N°8 23, y luego se usó la red entrenada para generar los resultados que se muestran en la FIGURA N° 8.24.

En esta prueba la red se mostró eficiente eliminando las trazas ruidosas para las que fue entrenada, pero no fue tan efectiva en la preservación del evento de interés, el cual se muestra atenuado.

La red neuronal utilizada nuevamente fue:

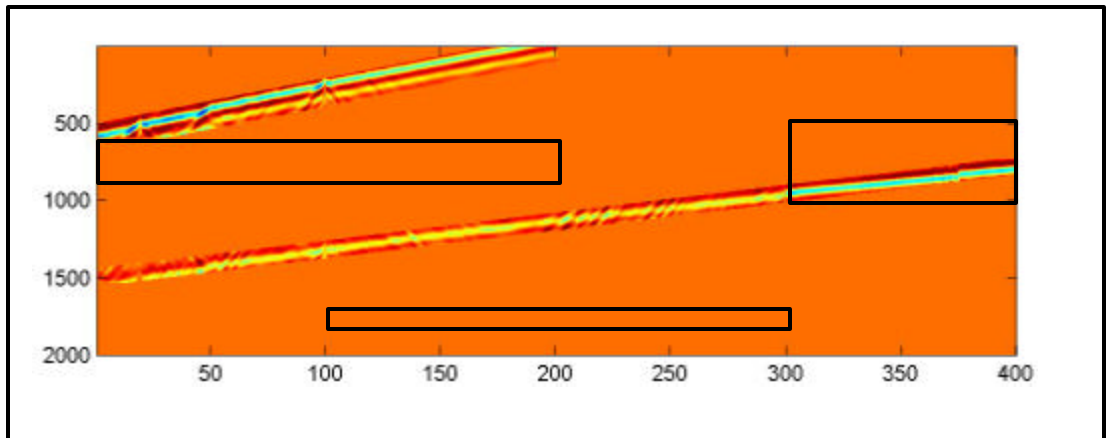
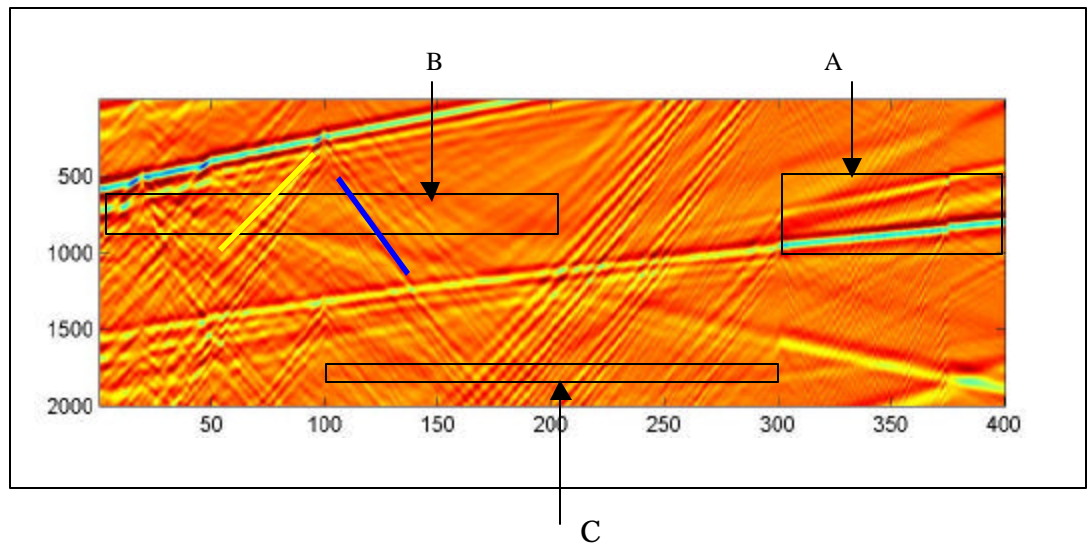
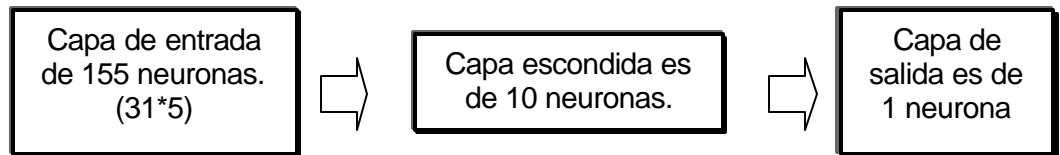


FIGURA N° 8.22,segundo grupo de datos seleccionados, tanto para la sección a filtrar como para la sección de referencia obtenida.

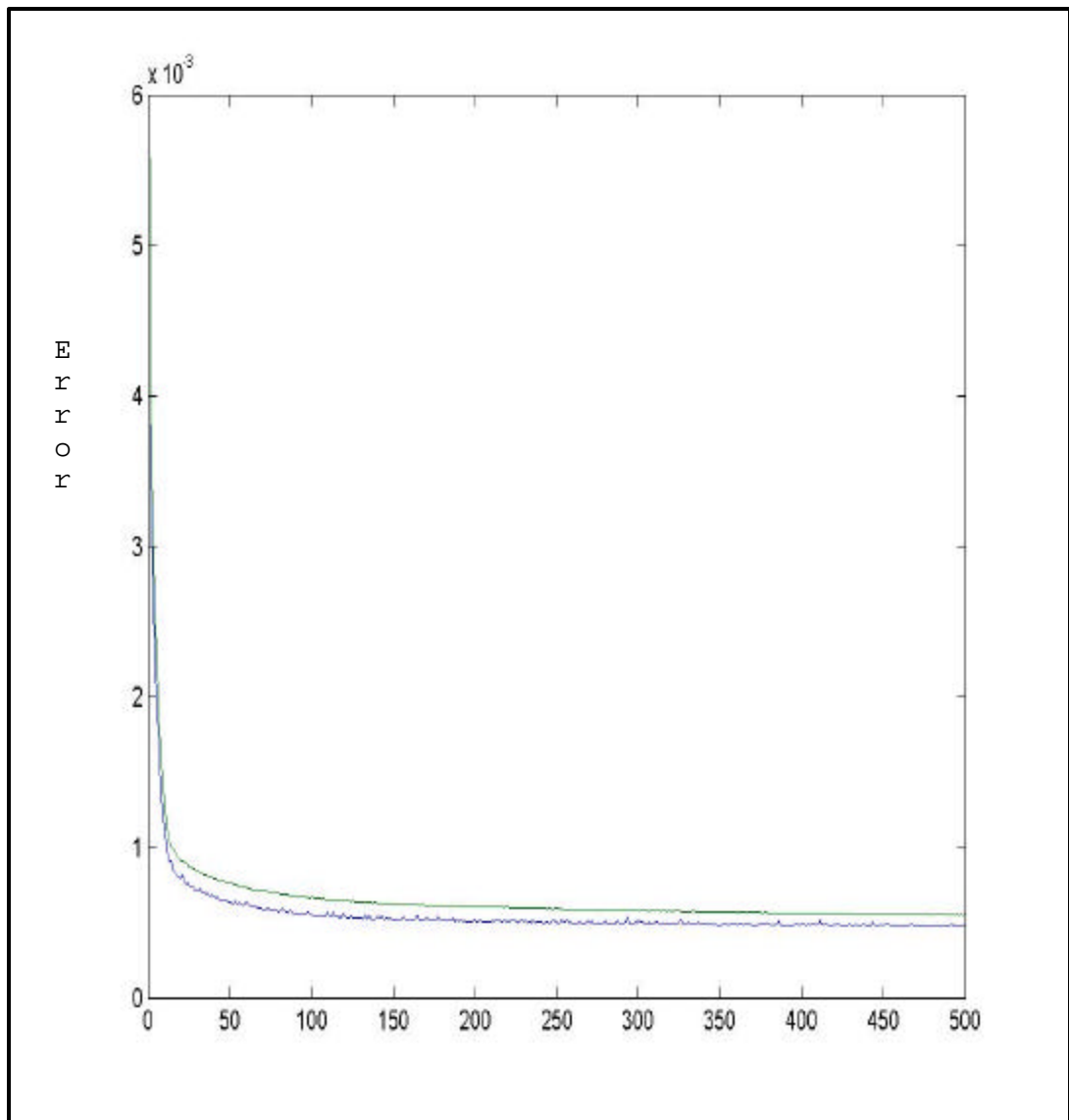


FIGURA N° 8.23, curva del error de entrenamiento.

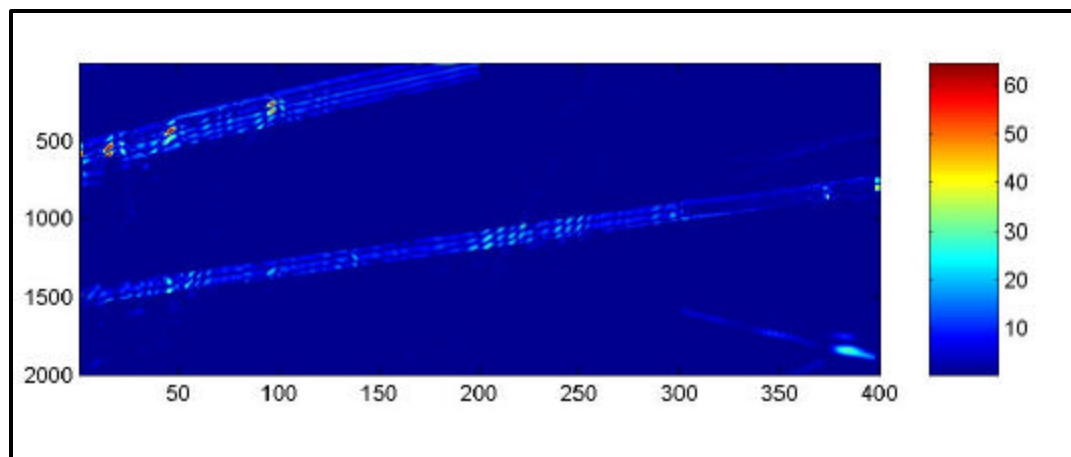
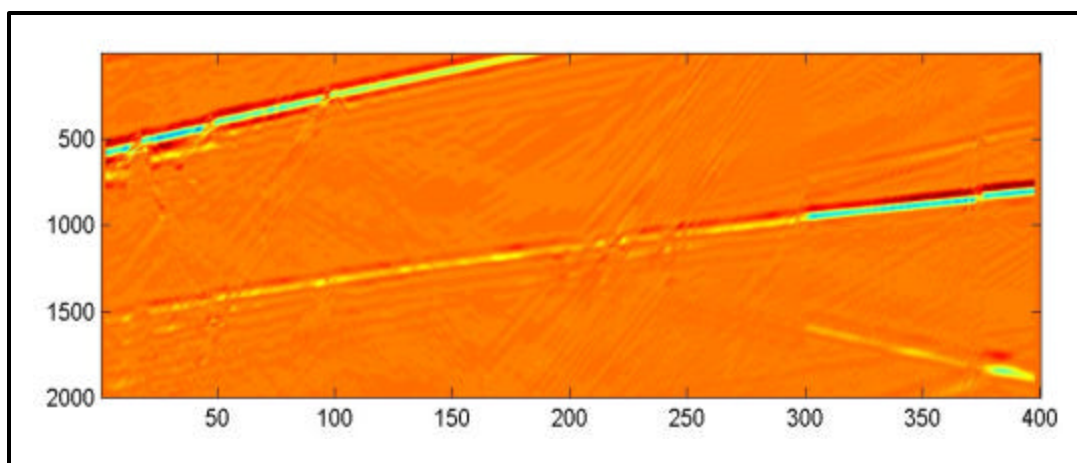
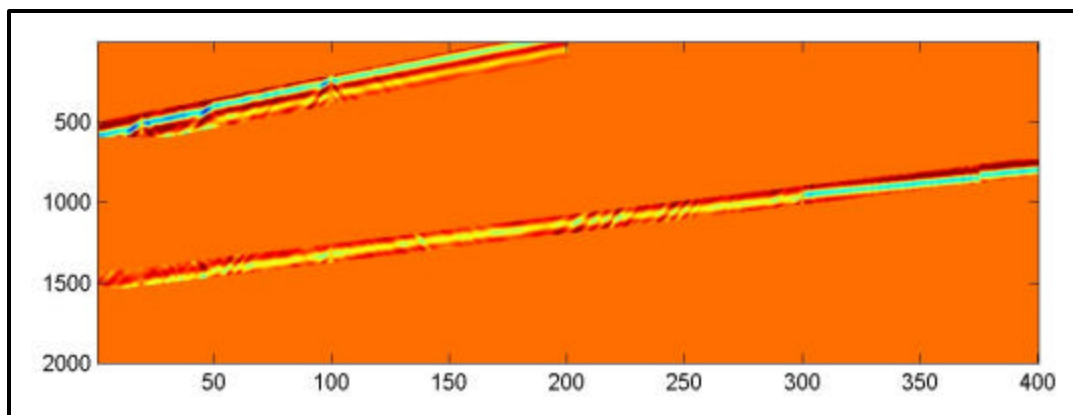


FIGURA N° 8.24, señal de referencia, señal filtrada y error relativo.

Para mejorar la efectividad del algoritmo en la preservación del evento de interés, se construyó, otra *pseudo\_sección*, pero esta vez usando una mascara mejor diseñada lo que se muestra en detalle en la FIGURA N° 8.25, donde la primera sección es la sección original, la segunda es la mascara construida y la tercera el conjunto de datos de referencias generados, al multiplicar la mascara por la sección original. El conjunto de datos de entrenamiento y de prueba escogidos para entrenar la red se seleccionaron más cuidadosamente y se muestran en la FIGURA N° 8.26.

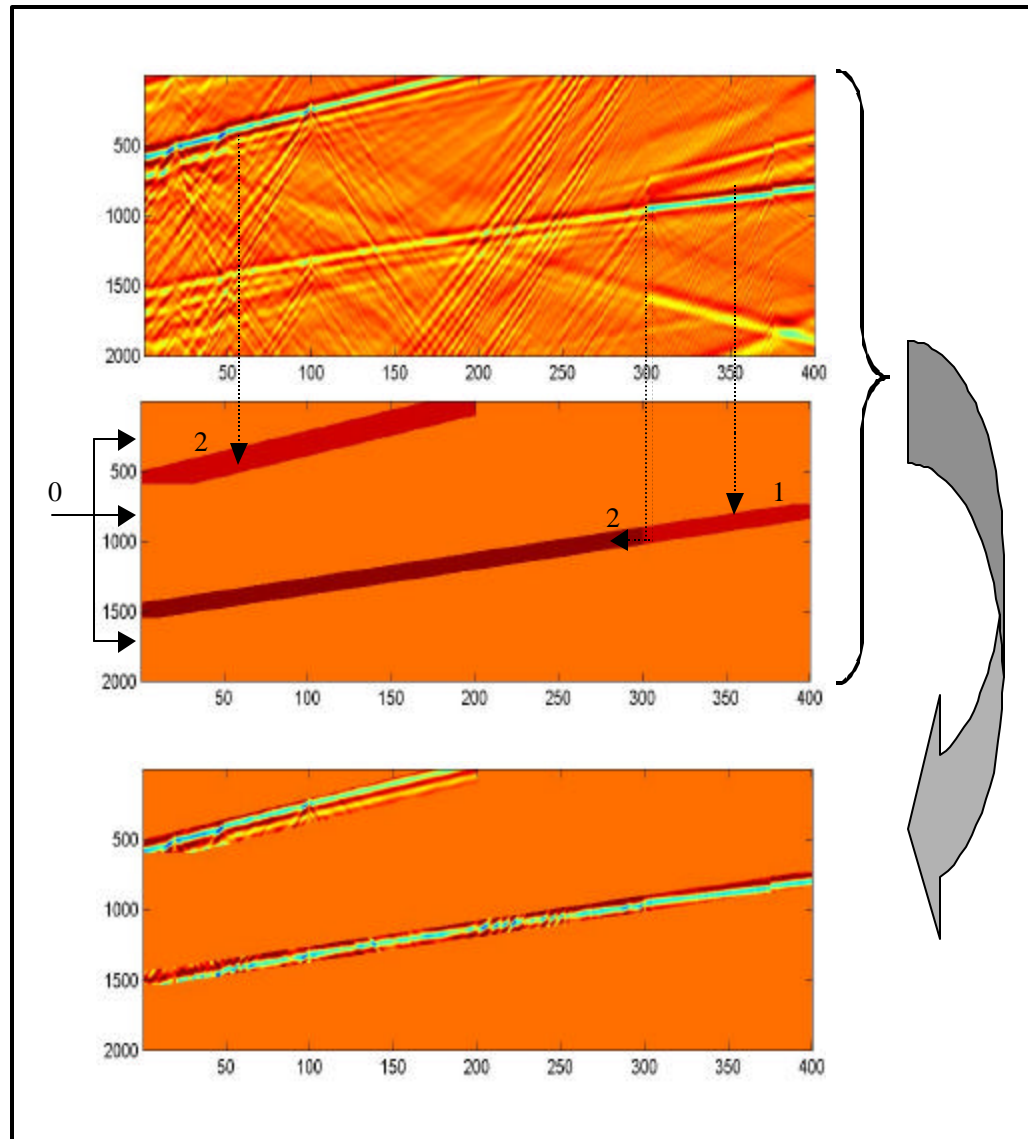


FIGURA N° 8.25, segunda seudo\_sección construida.



La red neuronal utilizada nuevamente fue:

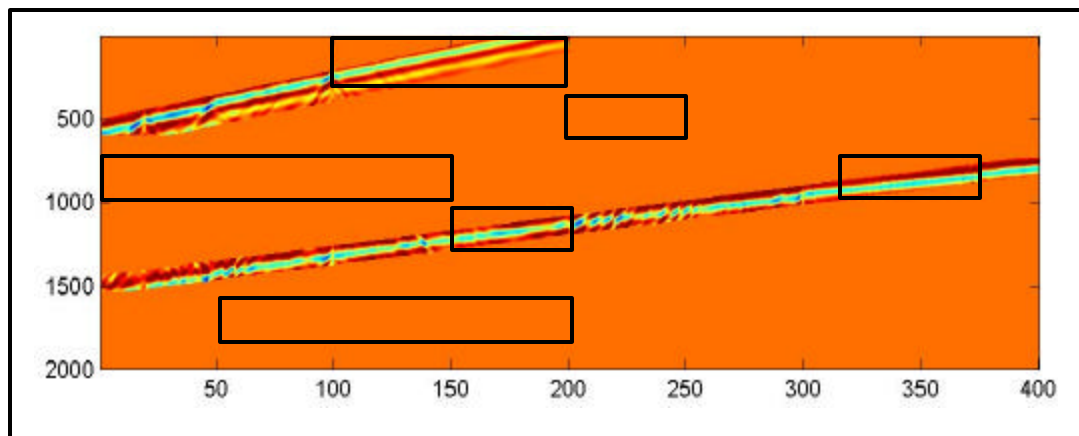
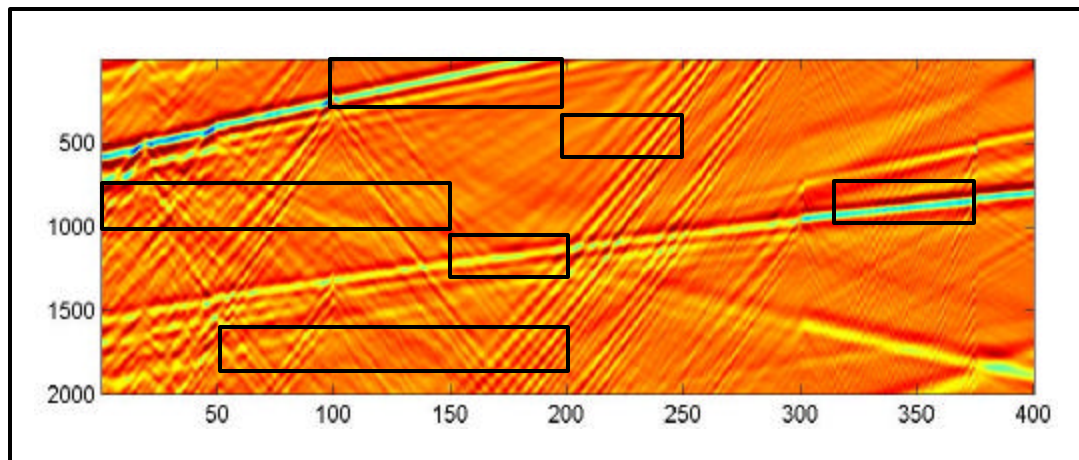
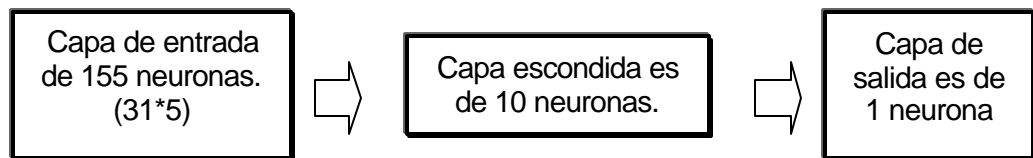


FIGURA N° 8.26, conjunto de datos de entrenamiento y de prueba, seleccionados.



La red se entreno y el error de entrenamiento se muestra en la FIGURA N° 8.27, para luego con esta red entrenada general los resultados que se presentan en la FIGURA N° 8.28. Como se esperaba, el algoritmo conservo su efectividad para la eliminación de las señales no deseadas y con esta modificación mejoro la calidad (nitidez) del evento de interés.

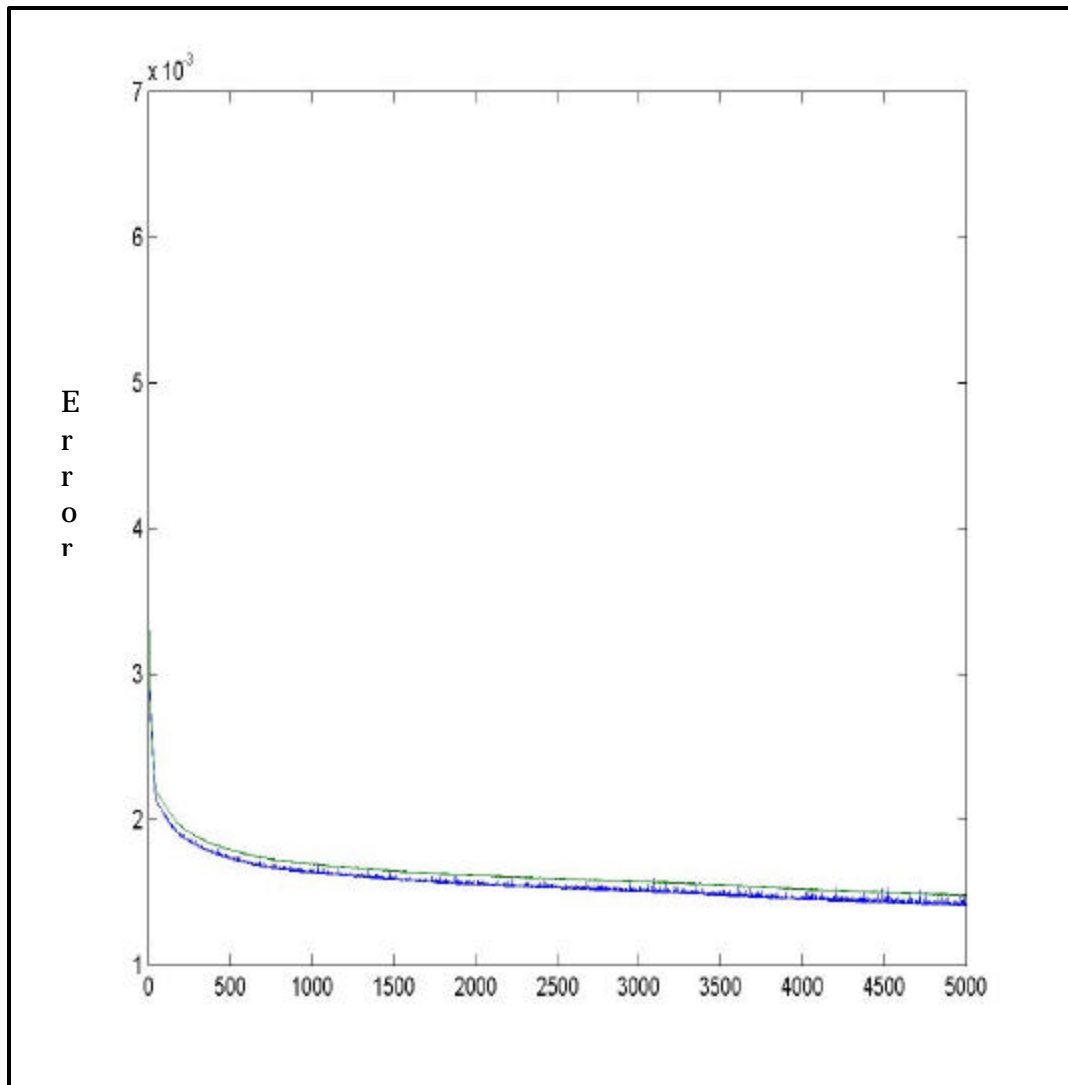


FIGURA N° 8.27, curva del error de entrenamiento.

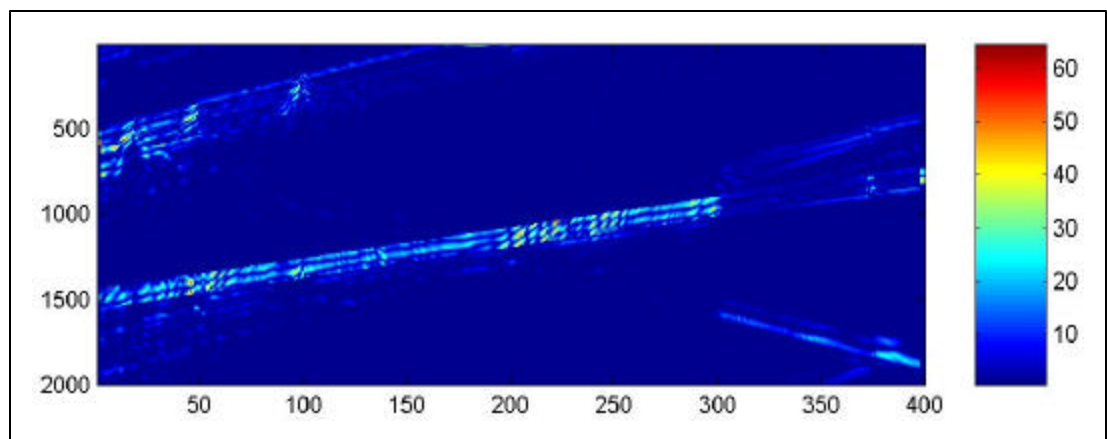
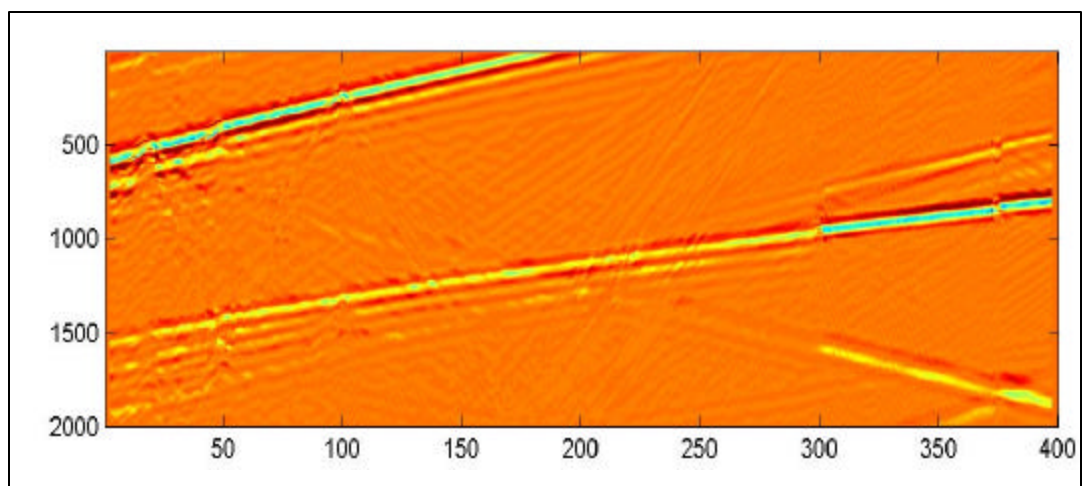
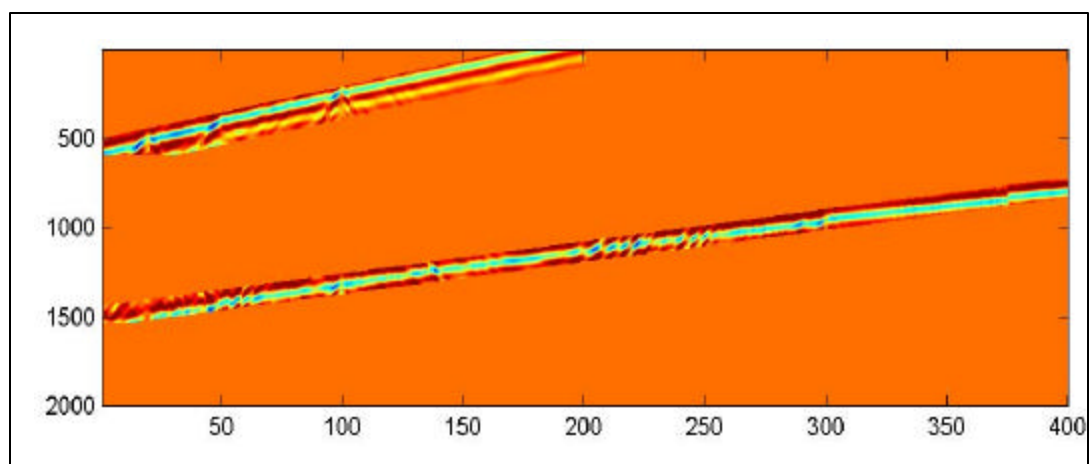


FIGURA N° 8.28, señal de referencia, señal filtrada y error relativo.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se verificó la efectividad y robustez del algoritmo de búsqueda local LMS, para la cancelación adaptativa de señales sísmicas provenientes de una dirección dada y en la preservación de las señales de interés, tanto en amplitud como en fase, que arriban en una dirección distinta, lo cual se logra siempre y cuando se diseñe un buen conjunto de filtros iniciales.

Entre las principales ventajas que presentan los métodos de búsqueda global implementados está su robustez para trabajar con un elevado número de variables y en superficies no cuadráticas, otra de especial peso en esta aplicación se refiere a que no existe la necesidad de conocer o buscar un buen punto de partida, *i.e.*, no es necesaria la aplicación de filtros iniciales, para garantizar la convergencia del algoritmo a la solución optima.

En general los métodos de búsqueda global aplicados comparados con el método de búsqueda local utilizado, resultaron ser más lentos y menos consistentes en la obtención de la solución optima, lo cual se refiere en este trabajo, en la capacidad que el método aplicado posea para cancelar las señales que no son de interés y preservar o recuperar tanto en amplitud como en fase las señales de interés

De los tres métodos de búsqueda global implementados, se encontró que la técnica de red neuronal utilizando el método de propagación hacia atrás, produjo los mejores resultados, siendo la más efectiva en tiempo de convergencia del algoritmo, preservación o recuperación de las señales de interés y en la atenuación o cancelación de las señales no deseadas o interferencia.

La principal desventaja que presenta el método de búsqueda local utilizado, se refiere a la necesidad de conocer o encontrar un buen punto de partida, en este caso la necesidad de disponer o diseñar un buen conjunto de filtros iniciales, que permitan garantizar la convergencia del algoritmo a la solución deseada.

Respecto a los algoritmos de búsqueda global aplicados, la principal desventaja radica en la lentitud en la convergencia de estos algoritmos, siendo relativamente más lentos que el algoritmo de búsqueda local probado.

Las dos limitaciones más importantes observadas en los métodos de búsqueda global utilizando SA y AG, se refieren, a la calibración de los parámetros de estos algoritmos, lo cual se realiza en forma empírica, y a la convergencia de los mismos no siempre coincide con el incremento en la afinación del ajuste de los parámetros. El SA en las pruebas realizadas se mostró eficiente en la preservación de la amplitud del evento de interés, pero produjo inversión de la fase. Respecto a la señal a cancelar, no lo suficientemente efectivo.

El AG, fue más eficiente que el SA en la preservación tanto de la fase como de la amplitud del evento de interés y al igual que este no resultó óptimo en la cancelación de la señal no deseada.

En el Lago de Maracaibo se realizaron tres tipos de adquisiciones, dos para el modelo con una zona de transición y una para el modelo ubicado completamente dentro del lago.

La adquisición realizada en la zona de transición, con la fuente ubicada en el lago, no es viable, ya que no se recupera, la señal desaparece debido al ángulo crítico.

La segunda adquisición realizada en el modelo ubicado completamente dentro del lago, no es viable, la señal es atenuada significativamente debido a que pasa dos veces por la capa de lodo, la cual actúa como un filtro de altas frecuencias.

La tercera adquisición realizada en la zona de transición, adquiriendo en el agua y colocando la fuente en tierra, fue la única que resulto viable, pudiéndose recuperar el evento de interés, teniéndose que las señales no resultan tan atenuadas, ya que pasan una sola vez por la capa de lodo.

Una recomendación que se hace es continuar explorando la efectividad de la técnica de *Propagación hacia atrás*, con modelos más complejos y finalmente con datos reales.

Se sugiere continuar con la revisión de otros métodos tanto de búsqueda global como local, en la aplicación de la técnica del *Beamforming*, y obtener un conjunto de resultados que permitan establecer la utilidad y aplicabilidad de esta técnica en el campo de la geofísica, según los fundamentos descritos.

## **Referencias bibliograficas.**

**ALCARRAZ A., VALDÉS A.,**(2000). *“Cancelador de ruido utilizando un filtro adaptativo NLMS”*. Proyecto de DSP.

<http://www.iie.edu.uy/ense/assign/sisdsp/proyecto/1999/nlms/dsp1.htm>

**CORANA A., MARCHESI C., RIDELLA S y MARTINI.,**(1987). *“Minimizing Multimodal Funtions of Continuos Variables with the “Simulated Annealing” Algorithm”*. Instituto per i Circuiti Electronici, C.N.R.

**COWAN, C., y STEARNS, S.,**(1985) *“ Adaptive Filters ”*. Signal Processing Series. Prentice-Hall.

**CIED-PDVSA.,**(1998) *“ Métodos de adquisición y procesamiento sísmico ”*.

**DOMINGUEZ L.J.,**(1999) *“ Migración en medios ortorrombicos ”*. Thesis, ULA. Intevep-PDVSA.

**EDUARDO MORALES.,**(2000) *“Búsqueda, optimización y aprendizaje”*.

<http://w3-mor.itesm.mx/~emoraes/cursos/KDD/principal.html>

**EAGE 62nd CONFERENCE AND TECNICALEXHIBITION.,**(2000) *“ Coherent Noise Attenuation by Adaptive Filtering and Beamforming “*. Glasgow Scotland.

**ETGEN J.T.,**(1998). *“Finite\_diference elastic anisotropic wave propagation”*.

**FELIX G.M.,**(1991). *“Programación Fortran 77”*. Tercera edición.

**FIGUEROA .,**(1998). *“Curso De sismología”*. Escuela de Geología, Geofísica y Minas. Facultad de Ingeniería. U.C.V.

- FREEMAN J.A y SKAPURA D.M.**,(1997). “*Redes Neuronales. Algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación*”. Editorial, Addison-Wesley/Diaz de Santos.
- FORTTRAN 90., TUTORIAL .** (2000)  
[http://www.Stanford.edu/class/mez90/tutorial\\_77/13\\_common.html](http://www.Stanford.edu/class/mez90/tutorial_77/13_common.html)
- MICHAEL A.C., GARDNER W.G., BASU S.**,(2000). “*Vision-Steered Beam Forming and Transaural Rendering for the Artificial Life Interactive Video Environment, ALIVE*”. Perpeptual Computing Technical Report N°352.  
[www.mkc,billg,sbasu@media.mit.edu](http://www.mkc.billg.sbasu@media.mit.edu)
- MICHELENA R., MALAVÉ G., ALVERELLOS J Y MORA P.**,(1998). “*Sísmica experimental en zonas de baja calidad de datos en el Lago de Maracaibo, un enfoque integral*”. PDVSA\_INTEVEP.
- MORALES E.**,(1999). “*Búsqueda, Optimización y Aprendizaje*”.
- MORA P.**,(1999). “*Simulación y Continuación de Campo en problemas de adquisición sísmica en el Lago de Maracaibo*”. PDVSA\_Intevep.
- MORENO J.A.**,(1999). “*Aspectos de Métodos Evolutivos (Programas Evolutivos)*”. Postgrado de Computación Emergente. Curso de Computación Emergente II. Facultad de Ingeniería. U.C.V.
- NOGERA, C.**,(1995) “*Un enfoque birrefringente para las ondas S*”. Magister. Thesis, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Geofísica y Minas. Dpto de Geofísica.
- SEGOVIA, R.**,(2000). “*Técnicas de optimización para arreglos direccionales De geófonos*”. Thesis, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Geofísica y Minas. Dpto de Geofísica.

**SHERIFF R.E.,**(1994). *“Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics Third Edition”*. Society of Exploration Geophysicists (SEG).

**SIERRA J.,**(1999). Comunicación personal. PDVSA\_Intevep.

**STONE D.G.,**(1995). *“Designing Seismic Surveys in Two on Three Dimensions”*. Society of Exploration Geophysicists (SEG).

**WILLIAM I.G., FERRIER G.D.Y ROJERS J.,**(1992).*“Global Optimization of Statical Function with Simulated Annealing”*.

**WIDROW B., y SAMUEL, D.,**(1997) *“Adaptive Signal Processing”*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs.



## **APÉNDICE A**

Aquí se presenta un complemento sobre el desarrollo del algoritmo LMS en el contexto de las redes neuronales.

### *Adaline y el algoritmo LMS.*

Con la evolución de las telecomunicaciones y la necesidad del diseño de filtros para eliminar el ruido de las señales empleadas, el procesamiento de señales pasó a formar parte del campo de la ingeniería.

El Adaline y el Adaline múltiple o Madeline, desarrollado por Bernard Widrow (Universidad de Stanford) es similar a un PE en una ANS, es decir, que consta de un único elemento de procesamiento, en si técnicamente no es una red neuronal.

El termino Adaline se conoce como **Adaptive Linear Element** (elemento lineal adaptivo), cuya estructura general se muestra en la FIGURA N° A1.

En el ALC se lleva a cabo el cálculo de una suma de productos empleando los vectores de entrada y de pesos y aplica una función de salida que arroja un único valor de salida., tal como se muestra en la expresión (A.1) :

$$y = W_0 + \sum_{j=1}^n W_j X_j \quad (\text{A.1})$$

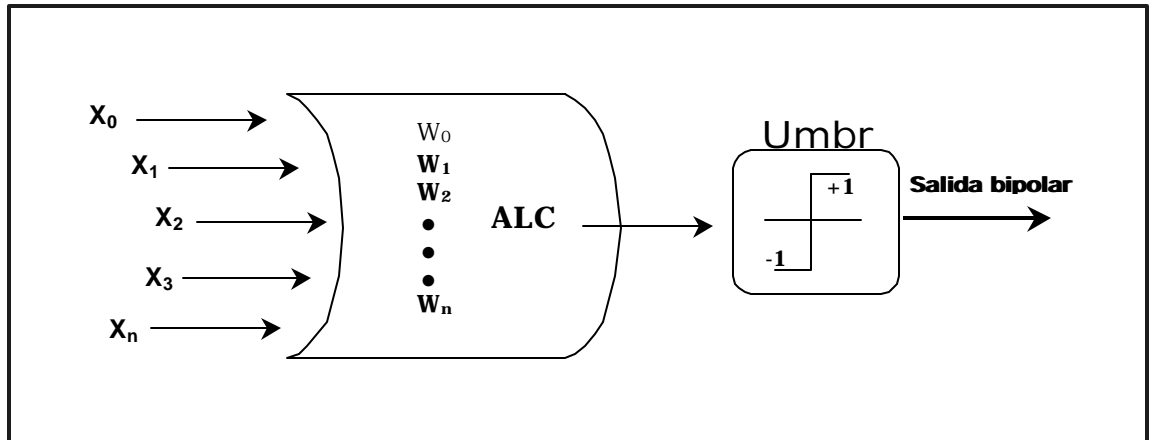


FIGURA N° A1, estructura general de un Adaline, la cual consiste de una combinación lineal adaptativa (ACL) y una función bipolar de salida.

El Adaline o ALC es **Adaptativo** debido a que se aplica un proceso bien definido para modificar los pesos y así obtener el valor de salida deseado para una entrada dada; es **Lineal** porque su salida es una función lineal (simple) de los valores de entrada y es una **Neurona** y que consta de un único elemento de procesamiento.

Un método para entrenar el Adaline es la **Regla de Aprendizaje LMS** (regla de aprendizaje de mínimos cuadrados), que es un método para hallar el vector de pesos deseados, proceso que se indica como entrenamiento del ALC.

La regla de aprendizaje se puede incorporar al propio dispositivo que se va auto adaptando en la medida que se le van presentando las entradas y salidas deseadas, haciendo pequeños ajustes en los valores de los pesos, cada vez que se procesa una combinación de entrada / salida.

La obtención del *mejor vector de pesos* implica minimizar la diferencia entre la salida deseada y la salida real, para todos los vectores de entrada, la aproximación que se utiliza en este trabajo, consiste en minimizar el *error cuadrático medio* para un conjunto de valores de entrada.

Sea  $y_k$  el valor de la salida para el  $k$ -ésimo vector de entrada, el error correspondiente es:  $e_k = d_k - y_k$  (A.2)

El error cuadrático medio o valor esperado del error se define como:

$$\langle e_k^2 \rangle = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L e_k^2 \quad (\text{A.3})$$

$L$  : N° de vectores de entrada que haya en el conjunto de entrenamiento.

Luego el error puede ser expresado como:

$$\langle e_k^2 \rangle = \langle (d_k - W^t X_k)^2 \rangle \quad (\text{A.4})$$

$$= \langle d_k^2 \rangle + W^t \langle X_k X_k^t \rangle W - 2 \langle d_k X_k^t \rangle W \quad (\text{A.5})$$

El paso de la ecuación (A.4) a (A.5) se realiza bajo la condición de que el conjunto de entrenamiento permanece estacionario estadísticamente.

Sea  $R = \langle X_k X_k^t \rangle$ , matriz de correlación en el tiempo.

$$P = \langle d_k X_k \rangle$$

$$\mathbf{x} = \langle e_k^2 \rangle = \langle d_k^2 \rangle + W^t R W - 2 P^t W \quad (\text{A.6})$$

Para hallar el vector de pesos el error cuadrático medio se deriva.

$$\frac{\partial \mathbf{x}(W)}{\partial W} = 2 R W - 2 P = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$W^* = R^{-1} P \quad (\text{A.8})$$

Luego aunque  $\mathbf{x}$  es un escalar,  $\frac{\partial \mathbf{x}(W)}{\partial W}$  es un vector y la ecuación (A.7) es una expresión del gradiente de  $\mathbf{x}$ :

$$\nabla \mathbf{x} = \left[ \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial W_1}, \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial W_2}, \dots, \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial W_n} \right]^t \quad (\text{A.8})$$

Lo anterior indica que se ha encontrado un punto en el cual la pendiente de la función  $\mathbf{x}(W)$  es cero y el cual puede ser un máximo o un mínimo. Para dos pesos la grafica de esta función es un paraboloide con concavidad hacia arriba, ya que todas las combinaciones de los pesos generan un valor positivo para  $\mathbf{x}$ , para más de dos dimensiones se conoce como hiperparaboloide.

El cálculo analítico para determinar los pesos óptimos se vuelve complejo con el aumento del tamaño de las matrices y por otra parte las componentes de  $R$  y  $P$  son valores esperados, lo que implica un análisis estadístico de las señales de entrada.

Otra opción es que la ALC obtenga los pesos óptimos explorando la superficie de pesos, para hallar el mínimo, es decir:

- Se asignan unos valores arbitrarios de pesos.
- Se determina la dirección de la pendiente más pronunciada, en dirección hacia abajo.
- A continuación iterativamente se van modificando suavemente los pesos, para hacer descender el vector de pesos, hasta alcanzar el mínimo deseado.

Pero este método considera que se conoce la superficie de pesos, luego como el vector de pesos es variable

Sea  $R = \langle X_k X_k^t \rangle$ , matriz de correlación en el tiempo.

$$P = \langle d_k X_k \rangle$$

$$\mathbf{x} = \langle e_k^2 \rangle = \langle d_k^2 \rangle + W^t R W - 2P^t W \quad (\text{A.9})$$

Para hallar el vector de pesos el error cuadrático medio se deriva.

$$\frac{\partial \mathbf{x}(W)}{\partial W} = 2RW - 2P = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$W^* = R^{-1}P \quad (\text{A.11})$$

Luego aunque  $\mathbf{x}$  es un escalar,  $\frac{\partial \mathbf{x}(W)}{\partial W}$  es un vector y la ecuación (A.10) es

una expresión del gradiente de  $\mathbf{x}$ :

$$\nabla \mathbf{x} = \left[ \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial W_1}, \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial W_2}, \dots, \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial W_n} \right]^t \quad (\text{A.12})$$

Lo anterior indica que se ha encontrado un punto en el cual la pendiente de la función  $\mathbf{x}(W)$  es cero y el cual puede ser un máximo o un mínimo. Para dos pesos la gráfica de esta función es un paraboloide con concavidad hacia arriba, ya que

todas las combinaciones de los pesos generan un valor positivo para  $\mathbf{x}$ , para más de dos dimensiones se conoce como hiperparaboloide.

El cálculo analítico para determinar los pesos óptimos se vuelve complejo con el aumento del tamaño de las matrices y por otra parte las componentes de  $\mathbf{R}$  y  $\mathbf{P}$  son valores esperados, lo que implica un análisis estadístico de las señales de entrada.

Otra opción es que la ALC obtenga los pesos óptimos explorando la superficie de pesos, para hallar el mínimo, es decir:

- Se asignan unos valores arbitrarios de pesos.
- Se determina la dirección de la pendiente más pronunciada, en dirección hacia abajo.
- A continuación iterativamente se va modificando suavemente los pesos, para hacer descender el vector de pesos, hasta alcanzar el mínimo deseado.

Pero este método considera que se conoce la superficie de pesos, luego como el vector de pesos es variable,  $\mathbf{W}(t+1) = \mathbf{W}(t) + \nabla \mathbf{W}(t)$  (A.13), y básicamente lo que se está buscando es la dirección del descenso más pronunciado en cada punto de la superficie, se necesita calcular el gradiente de la superficie.

Para obtener la magnitud del cambio, se multiplica el gradiente por  $\mathbf{m}$ , obteniéndose :

$$\mathbf{W}(t+1) = \mathbf{W}(t) + \mathbf{m} \nabla \mathbf{x}(\mathbf{W}(t)) \quad (\text{A.14})$$

Pero no se conoce la forma de la superficie de pesos, por lo que se aplica una aproximación del gradiente, teniéndose en general:

Sea  $\mathbf{X}_k$  el vector de entradas del Adaline.

1. El error cuadrático  $e_k^2(t)$  se calcula con el valor actual de pesos,

$$e_k^2(t) = (d_k - \mathbf{W}'(t) \mathbf{X}_k)^2.$$

2. Se toma  $e_k^2(t)$  como aproximación de  $\langle e_k^2 \rangle$ ,  $\nabla e_k^2(t) \approx \nabla \langle e_k^2 \rangle = 2e_k(t)X_k$  (A.15).
3. Se actualiza el vector de pesos, ecuación (A.14) tomando (A.15) como aproximación del gradiente.
4. Los pasos del 1-4 se repiten hasta obtener un error aceptable.

La ecuación (A.14) es una expresión del algoritmo LMS, donde el parámetro  $\mu$  determina la estabilidad y velocidad de la convergencia del vector de pesos hacia el valor del error mínimo.

Al utilizar una aproximación del gradiente, el descenso del vector de pesos por la superficie de pesos, hacia el mínimo, no es tan suave lo que implica que los cambios en el vector de pesos deben ser relativamente pequeños en cada iteración, ya que si son muy elevados podría no converger al mínimo o alcanzarlo por azar, el parámetro  $\mu$  evita este asar.

**LO ANTERIOR EXPRESADO VECTORIALMENTE ES:**

Si se tiene una red neuronal compuesta por varias capas de PE idénticos, con una capa cualquiera  $C_1$  que contiene  $n$  unidades, la salida de  $C_1$  se puede considerar como un vector  $n$ \_dimensional,  $X_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)_n^t$  (A.16) es decir:

$$X_n = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}$$

Donde  $X_n$  es la entrada a otra capa  $C_2$   $m$ \_dimensional, ( $m$  unidades) y cada unidad de  $C_2$  poseerá  $n$ \_pesos asociados a las conexiones procedentes de la capa anterior, lo que implica que hay  $m$ \_vectores de pesos asociados a esta capa, tal que un vector pesos de la  $i$ \_ésima unidad será:

$$W_{ij} = (W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{in})_m^t \quad (A.17)$$

La entrada neta de la  $i$ \_ésima capa se puede expresar como:

$$neta_i = \sum_{j=1}^n X_j W_{ij} \quad (A.18)$$

$j$  : salidas de la capa  $C_1$   $n$ \_dimensional.

$i$  : índice de los  $m$ \_vectores de pesos.

$n$  : N° de conexiones a la  $i$ \_ésima unidad.

$$\text{En notación vectorial: } neta_i = X \times W_i \text{ o } neta_i = X^t W_i \quad (A.18)$$

## ***APÉNDICE B***

En este apéndice se presenta un breve resumen sobre dos de los conceptos básicos que sirvieron de fundamento para el desarrollo del algoritmo SA, como lo son la distribución de Boltzmann y las cadenas de Markov.

### *Distribución de Boltzmann.*

Según la mecánica estadística un sistema físico de muchas partículas puede verse como una agrupación estadística, si esta agrupación es estacionaria, lo que se logra en equilibrio térmico, su densidad es función de la energía del sistema y la probabilidad de estar en un estado  $i$  con energía  $E_i$  esta dada por la distribución de Boltzmann.

Dado un problema combinatorio con una estructura de vecinos adecuada, luego de un número de transiciones lo suficientemente alta para un  $c$  fijo y aplicando algún criterio de aceptación, el SA encontrara una solución  $i \in S$  con probabilidad:

$$P_c\{X = i\} \equiv q_i(c) = \frac{1}{\sum_{j \in S} \exp\left(\frac{-f(j)}{c}\right)} \exp\left(\frac{-f(i)}{c}\right) = \frac{1}{N_0(c)} \exp\left(\frac{-f(i)}{c}\right)$$

$N_0$  : Constante de normalización.



Luego, dado un problema de optimización combinatoria, una estructura de vecindad adecuada y una distribución estacionaria equivalente a la distribución de Boltzmann, se cumple que :

$$\lim_{c \rightarrow 0} q_i(c) \equiv q_i^* = \frac{1}{|S_{opt}|} X_{S_{opt}}(i)$$

$S_{opt}$  : Conjunto de soluciones globales.

$X_{S_{opt}}(i)$  : Es la función característica definida como

$$X_{S_{opt}}(i) = \begin{cases} 1 & \text{si } i \in S_{opt} \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Este resultado es importante ya que garantiza la convergencia asintótica hacia el conjunto de soluciones optimas del algoritmo, según la condición que la distribución estacionaria se obtenga para cada valor de c.

## *Cadenas de Markov*

Este algoritmo puede ser modelado matemáticamente usando cadenas de Markov, siendo una cadena de Markov una secuencia de eventos, donde la probabilidad del resultado de un evento depende solo del resultado previo. En el SA un evento corresponde a una transición y los resultados posibles al conjunto de soluciones posibles.

Si se define  $X(k)$  como una variable estocástica que denota el resultado del  $k$ -ésimo evento, la transición de probabilidad en el  $k$ -ésimo evento para cada par  $i, j$  resultados se define como:

$$P_{ij}(k) = P\{X(k)_{=j} | X(k-1)_{=i}\} \quad \longleftarrow \text{ se llama matriz de transición}$$

Si  $a_i(k)$  es la probabilidad del resultado  $i$  en el  $k$ -ésimo evento, es decir,  $a_i(k) = P\{X(k) = i\}$ ,  $a_i(k)$  se define como  $a_i(k) = \sum_i a_i(k-1)P_{li}(k)$ .

En el SA la probabilidad de transición esta definida como :

$$\forall i, j \in S : P_{ij}(c_k) = \begin{cases} G_{ij}(c_k) * A_{ij}(c_k) & \text{si } i \neq j \\ 1 - \sum_{j \in S, j \neq i} P_{ij}(c_k) & \text{si } i = j \end{cases}$$

$$G_{ij}(c_k) = \frac{1}{q} X_{S_i}(j), \quad q = |S_i| \forall i \in S \quad \text{y} \quad A_{ij}(c_k) = \exp\left(\frac{-(f(j) - f(i))^+}{c_k}\right)$$

$G_{ij}(c_k)$  : Probabilidad de generación, es decir, la probabilidad de generar una solución  $j$  a partir de una solución  $i$ .

$A_{ij}(c_k)$  : Probabilidad de aceptación que se refiere a la probabilidad de aceptar  $j$  una vez que fue generada a partir de la solución  $i$ .

Propiedades de una cadena de Markov:

- Es **finita**, si tiene un conjunto finito de resultados.
- **No homogénea**, si las probabilidades de transición dependen del número del evento  $k$ .
- **Homogénea**, si las probabilidades de transición son independientes del número del evento  $k$ .
- **Irreducibles**, si para cada par de soluciones  $i, j \in S$  existe una probabilidad positiva de alcanzar  $j$  a partir de  $i$  en un número finito de eventos.

Un punto fundamental para la prueba de convergencia es la existencia de una distribución estacionaria única, en una cadena de Markov finita con matriz de transición  $P$  se define como un vector  $q$ , en el caso de la  $i$ -ésima componente esta dada por:

$$q_i = \lim_{k \rightarrow \infty} P\{X(k) = i | X(0) = j\} \forall j$$

Si  $P$  es una matriz de transición asociada a una cadena de Markov finita, irreducible, no periódica y homogénea, una distribución es estacionaria si se satisface:

$q_i P_{ij} = q_j P_{ji} \forall i, j \in S$ , lo que se conoce como la *condición de balance detallado*.

Luego las pruebas de convergencia indican que el algoritmo requiere un número infinito de transiciones para obtener una buena aproximación a una distribución estacionaria, lo que implica la generación de secuencias infinitas para valores descendentes del parámetro  $c$  lo cual se puede superar elaborando el algoritmo como una secuencia de cadenas de Markov de longitud finita que convergen a un conjunto de soluciones óptimas si el enfriamiento es lo suficientemente lento. En la práctica no se puede garantizar que se llegara a una solución óptima por lo que se hacen aproximaciones con longitud de transición y número de descensos del parámetro de control finitos, con lo que se obtienen soluciones sub\_óptimas y para esto se requiere definir un mecanismo de enfriamiento que involucre.

- Una secuencia finita de valores para el parámetro de control.
- Un valor inicial  $c_0$ .
- Una función de decremento.
- Un valor final o/y condición de paro.

Un mecanismo de enfriamiento propuesto por Kirkpatrick sugiere para el valor inicial del parámetro de control, comenzar con un entero positivo pequeño e irlo multiplicando por un factor mayor que 1 hasta que las transiciones generadas sean aceptadas en su mayoría. El decremento del parámetro de control,  $c_k = \alpha * c_k$ , siendo  $\alpha$  una constante entre (0.8,0.99). Respecto al valor final de  $c$ , se termina cuando la solución permanece igual para un número determinado de cadenas consecutivas.

Para la longitud de las cadenas, establecer una longitud  $L$  fija, de otro modo  $L \rightarrow 0$  cuando  $c_k \rightarrow 0$ .

Hay propuestos otros esquemas de enfriamiento.

Para implementar el algoritmo se requiere definir 3 cosas:

1.- Representación del problema, lo que implica:

- Definir el espacio de soluciones.
- Elaboración de una función de costo que represente el costo de las soluciones.

2. Mecanismo de transición:

- La generación de las nuevas soluciones (simétricas).
- Cálculo de las diferencias de costo.
- Decisión de aceptación (probabilidad de aceptación).

2. Mecanismo de enfriamiento:

- Valor inicial de  $c$ .
- Función de decremento.
- Criterio de paro.
- Longitud de las cadenas.

## ***APÉNDICE C***

En esta sección se muestran en forma muy breve los fundamentos básicos de una red neuronal y los pasos elementales a tener presente al realizar una simulación con una ANS.

### ***Aprendizaje de Hebb.***

Los sistemas neuronales biológicos no nacen programados, es un proceso de aprendizaje a lo largo del tiempo que modifica de alguna forma la red, para añadir las nuevas informaciones.

Esta teoría básica fue expuesta por Hebb (1949), quien indica que cuando una célula está lo suficientemente cerca de otra para excitarla, ocurre un crecimiento o cambio metabólico en una de las células o en ambas, tal que la eficiencia de una para desencadenar el disparo en la otra se va incrementando cada vez que ocurre el acercamiento, luego como la conexión entre neuronas se realiza a través de la sinapsis, “los cambios que tiene lugar durante el aprendizaje deberán producirse en ellas”, luego las conexiones sinápticas en una neurona pueden ser tanto excitatorias como inhibitorias, lo que se traduce en los sistemas de control como realimentación positiva y realimentación negativa.

Los primeros fundamentos de red neuronal los desarrolló McCulloch y Pitts (1943), cuya teoría se basa en 5 suposiciones:

- 1.- La actividad de una neurona es un proceso todo/nada (binario).
- 2.- Es preciso que un número de sinapsis mayor que uno sean excitadas dentro de un período de adición latente para que se excite una neurona.
- 3.- El único retraso significativo es el retraso sináptico.
- 4.- La actividad de cualquier sinapsis inhibitoria impide la excitación de la neurona.
- 5.- La estructura de interconexiones no cambia en el tiempo.

### *Simulación con **ANS**.*

Una forma de simular redes ANS es aplicando el concepto básico de PE distribuidos y firmemente interconectados. Al comenzar a simular redes neuronales se debe tener en cuenta:

- El tamaño de la red, número de PE y su organización.
- El tiempo invertido en calcular el término entrada / activación,  $\tau_{eta_i}$ .
- Estructuramiento de los datos y conceptos de procesamiento.
- Estrategia de interconexión.

La forma básica en que se procesa la información en una red neuronal es:

- Las unidades de la red se pueden ver como capas de unidades que tienen características similares.
- Todas las unidades de cualquier capa se debe procesar completamente antes de continuar la simulación en unidades de cualquier otra capa.
- El procesamiento de todas las capas por lo general implica a las conexiones de entrada de un nodo.

## ***APÉNDICE D***

El algoritmo `ga.inp` contiene los valores iniciales que permiten guiar al algoritmo genético en la búsqueda del conjunto de soluciones para un problema en particular, estos valores de entrada son:

`irestrt` = 0: Inicia una nueva corrida del AG.

1: Inicia una continuación de la corrida del algoritmo.

`microga` = 0: Operación convencional del algoritmo.

1: Corrida del algoritmo usando esta opción.

`npopsiz` = Tamaño de la población de una corrida de un AG. Tamaño típico es de 100.

`nparam` = Número de parámetros (grupos de bits) de cada individuo, i.e, el número de parámetros que se busca optimizar con el algoritmo.

`pmutate` = Probabilidad de que se produzca una mutación. Un valor empírico sugerido,  $1/\text{npopsiz}$ .

`maxgen` = Máximo número de generaciones por corridas.

idum = Número aleatorio inicial de la semilla, debe ser igual a un entero negativo.

pcross = Probabilidad de cruce, se recomienda fijarla en un rango de 0.6-0.7. Para cruce uniforme se sugiere 0.5.

itourny = Activa la selección por torneo. Siempre esta activado.

ielite = 0: No elitismo. El mejor individuo no necesariamente es replicado.

1: Hay elitismo. El mejor individuo es replicado a la generación siguiente.

icreep = 0: No hay mutación por arrastre.

1: Hay mutación por arrastre.

pcreep = Probabilidad de mutación por arrastre. Se sugiere estimarla con la relación empírica  $(nchrome/nparam)/npopsiz$ .

iunifrm = 0: Cruce de punto simple.

1: Cruce uniforme. Es recomendado y usado en la implementación realizada.

iniche = 0: Opción desactivada.

1: Opción activada.

nchild = 1: Un niño por pareja. Opción usada.

2: Dos niños por pareja.

iskip = 0: Corrida normal.

1: Ver un individuo o conjunto de individuos.

iend = 0: Corrida normal. Esta fue la opción usada.

1: número de los últimos miembros de una población a ser almacenados en un conjunto de individuos.



nowrite = 0: Escribe detalles de la mutación y parámetros a ajustar.

1: Opción desactivada.

kountmx = Máximo valor del contador antes del nuevo comienzo del archivo.

parmin = Arreglo de valores mínimos asignados de parámetros Se asigno -1.

parmax = Arreglos de valores máximos asignados a los parámetros. Se asigno 1

nposibl = Arreglo de números enteros de posibilidades por parámetros. Para una ejecución eficiente se recomienda este sea múltiplo de 2

nichflg = Arreglo de banderas 1/0.

0: El medio ambiente no opera sobre el parámetro.

1: El medio ambiente opera sobre el parámetro.

EJEMPLO DE UN ARCHIVO ga.inp:

```
irestrt =0
microga =0
npopsiz =20
nparam =4
pmutate =0.02d0
maxgen =50
idum =-1000
pcross =0.5d0
itourny =1
ielite =1
icreep =0
pcreep =0.04d0
iunifrm =1
iniche =0
nchild =1
iskip =0
iend =0
nowrite =1
kountmx =5
parmin =4*-1
parmax =4*1
nposibl =4*64
nichflg =4*2
```

El archivo de parámetros, `param.f` dimensiona las matrices dentro del programa,  
UN EJEMPLO de este archivo:

Parameter (indmax=20,nchrmax=30,nparmax=4)

c indmax = maximo # de individuos, *i.e.*, máximo tamaño e a población.

c nchrmax = maximo # de cromosomas por individuos.

c nparmax = maximo # de parámetros a ajustar.

EJEMPLO de la salida de un archivo ga.out:

##### Generation 1 #####

# Binary Code	Param1	Param2	Param3	Fitness
1 100011111101010001001000001101000110010010001	. 5618	. 1410	. 0982	7.54771
2 101001110011100110010101011001110110101011010	. 6532	. 7918	. 8543	4.00461
3 010100111000101110111111010001111011111100000	. 3263	. 8736	.9366	1.80588
4 100100111110101010101110010010111001101010100	. 5778	. 3404	.9010	3.27996
5 101011011110001100100011101111101101010100000	. 6793	. 5698	. 7080	3.34850
Average Values:	.	5597	. 5433 . 6996	3.99733

Average Function Value of Generation= 3.99733

Maximum Function Value = 7.54771

Number of Crossovers = 99

Elitist Reproduction on Individual 5

##### Generation 2 #####

# Binary Code	Param1	Param2	Param3	Fitness
1 101001111101000000001101001101100110101011010	6555	0258	.6043	2.29532
2 100100111110101110000110010010111010101011000	. 5778	.7623	.9168	4.31505
3 100011111001100101001001011101010110010011011	. 5609	.6435	. 3485	10.29530
4 100011111001010110010001011001100110100011001	. 5609	.7840	.6023	6.81303
5 100011111101010001001000001101000110010010001	. 5618	. 1410	.0982	7.54771
Average Values:	.5834	. 4713	.5140	6.25328

Average Function Value of Generation= 6.25328

Maximum Function Value = 10.29530

Number of Crossovers = 113

Elitist Reproduction on Individual 3

El ga.restart ayuda a recomenzar una nueva generación, por ejemplo para 4 individuos se tiene:

## ***APÉNDICE E***

Código del programa Gmodel.f:

```
C      Este programa genera reflectores planos en distintas configuraciones
C      espaciales 2D.
C
C
C      NZ tamaño en la dirección Z
C      NX tamaño en la dirección X
C      NZ*NX número total de nodos
C      NI número de interfaces
C      NQ(1:20) vector que contiene el número de quiebres en cada interfaz
C      NXQI(1:20,1:20) vector que contiene las coordenadas X de los quiebres
C      NZQI(1:20,1:20)vector que contiene las coordenadas Z de los quiebres
C
C      Ejemplo: NXQI(3,:) son los quiebres en X de la interfaz 3
C
C
C
C
C
```

```

parameter (nzp=1000, nxp=1000)

real c11(nxp, nzp), c13(nxp, nzp), c33(nxp, nzp), c44(nxp, nzp), rho(nxp, nzp),
*densidad(15), vp(15), factorce
integer NZ, NX, NQ(20), NXQI(20, 20), NZQI(20, 20), i, j, Nlimites(20, 1000)
character*60 titulo1, titulo2, perfil(10)

OPEN (8, file='sueloLMSLA.dat', form='formatted', access='sequential')
read(8,72) titulo1
read(8,73) NX
read(8,73) NZ
read(8,73) NI
read(8,74) factorce

do i=1, NI
    read(8,72) perfil(i)
    read(8,*) NQ(i)
    do j=1, NQ(i) + 1
        read(8,*) NXQI(i,j)
        read(8,*) NZQI(i,j)
    enddo
enddo
read(8,72) titulo2
do i=1, (NI + 1)
    read(8,*) densidad8i)
    read(8,*) vp(i)
enddo
CLOSE(unit=8)
C
write(*,*) titulo1
write(*,*) 'NX = ', NX
write(*,*) 'NZ = ', NZ
write(*,*) 'NI = ', NI

```

```

write(*,*) 'factor = ', factorce
C
do i = 1, NI
    write(*,*) perfil (i)
    write(*,*) NQ(i)
    do j = 1, NQ(i) + 1
        write(*,*) NXQI(i,j)
        write(*,*) NZQI(i,j)
    enddo
enddo
write(*,*) titulo2
do i = 1, (NI + 1)
    write(*,*) densidad(i)
    write(*,*) vp(i)
enddo
PAUSE
C
C
72    format(A60)
73    format(5X, I4)
74    format(I4)
C
C
do k = 1, NX
    Nlimites(1, k) =1
    Nlimites(NI + 2, k) = NZ
Enddo

OPEN(80, file='LTRsla.out', 'status = 'unknow', form = 'unformatted',
*access = 'direct', recl = lrec)
C
C
C
C

```

```

do K = 1, NI
  do j = 1, NQ(k)
    do i = NXQI(k, j), NXQI(k, j + 1)
      fpend = (real(NZQI(k, j) - NZQI(k, j + 1))/real(NXQI(k, j) - NXQI(k, j + 1)))
      fval = fpend*(real(i-NXQI(k, j))) + real(NZQI(k, j))
      Nlimites(k + 1, i) = int(fval)
    enddo
  enddo
enddo
C
C
do j = 1, NX
  do i = 1, NI + 1
    do k = Nlimites(i, j), Nlimites(i + 1, j)
      rho(k, j) = densidad(i)
      c11(k, j) = vp(i)**2*densidad(i)
      c33(k, j) = vp**2*densidad(i)
      c44(k, j) = (k, j) = (vp(i)*factorce)**2*densidad(i)
      c13(k, j) = c11(k, j) - (2*c44(k, j))
    enddo
  enddo
enddo
C
C
call write_1(c11, NZ, NX, 0)
call write_1(c13, NZ, NX, 1)
call write_1(c33, NZ, NX, 2)
call write_1(c44, NZ, NX, 3)
call write_1(rho, NZ, NX, 4)
C
CLOSE(unit = 80)
C
C
C

```

```
stop
C
end
C
C
subroutine call write_1(ainput, NZ, NX, ind)
real ainput(NZ, NX)
do i = 1, NX
  call write(80, rec = i + ind*NX) (ainput(j, i), j = 1, NZ)
enddo
C
Return
C
End
```



## ***APÉNDICE F***

Código de la función objetivo, (aplicada en la implementación del SA):

```
SUBROUTINE FCN(N,X,F)
```

```
parameter(nrec=4,nfil=15,ntrace=151,nsample=1000)  
parameter(nsref=8,nfref=1,LSUP=8, LINF=54,LDR=3)  
double precision filtros(nrec,nfil), zfilt(ntrace,nsample)  
double precision z1(ntrace,nsample), zh(ntrace,nsample)  
double precision ZX(ntrace,nsample),temp  
double precision SUMA,F,X(N)
```

```
OPEN(UNIT = 15, FILE = 'filtw1.dat')
```

```
k=0
```

```
do i=1,nfil
```

```
do j=1,nrec
```

```
    k=k+1
```

```
    filtros(j,i) = X(k)
```

```
    write(15,*) filtros(j,i)
```

```
enddo
```

```
enddo
```

```
CLOSE(UNIT = 15, STATUS = 'KEEP')
```

```
OPEN (UNIT = 16, FILE = 'z1.dat', STATUS = 'OLD', ACCESS = 'DIRECT',FORM =  
*'UNFORMATTED',RECL = 2)
```

```
do i=1,ntrace  
  do j=1,nsample  
    read(16,REC=(i-1)*nsample+j) z1(i,j)  
  enddo
```

```
enddo
```

```
CLOSE(UNIT = 16, STATUS = 'KEEP')
```

```
OPEN (UNIT = 16, FILE = 'zh.dat', STATUS = 'OLD',ACCESS = 'DIRECT',FORM =  
*'UNFORMATTED',RECL = 2)
```

```
do i=1,ntrace  
  do j=1,nsample  
    read(16,REC=(i-1)*nsample+j) zh(i,j)  
  enddo
```

```
enddo
```

```
C   i=1
```

```
C   do j=1,24
```

```
C     zi(i,j)=0.D0
```

```
C   enddo
```

```
C   do i=1,ntrace
```

```
C     do j=1,nsample
```

```
C       WRITE(*,*)i,j,zi(i,j)
```

```
C     enddo
```

```
C   enddo
```

```
CLOSE(UNIT = 16, STATUS = 'KEEP')
```

```
do indexs=1,nsample-nfil+1
```

```
  do indext=1,ntrace-nrec+1
```

```
    temp = 0.D0
```

```

do i=indext,indext+nrec-1
  do k=indexs,indexs+nfil-1
    temp = temp+z1(i,k)*filtros(i-indext+1,k-indexs+1)
  enddo
enddo
zfilt(indext+nfref-1,indexs+nsref-1) = temp
enddo
enddo

```

```

OPEN(17,file='outw1.dat')

```

```

do j=1,ntrace
  do i=1,nsample
    write(17,*) zfilt(j,i)
  enddo
enddo

```

```

SUMA = 0.0
M = 1.0
do j=1,ntrace-LDR
  do i=LSUP,nsample-LINF
    ZX(j,i) = (zh(j,i)-zfilt(j,i))**2
    SUMA=SUMA+ZX(j,i)
    M=M+1
  enddo
enddo
SUMA=SUMA/M
WRITE(*,*)SUMA
F = SUMA

```

```

CLOSE(UNIT = 17, STATUS = 'KEEP')

```

```

RETURN
END

```