

2
2j.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**SUPRESION AUTOMATICA DE DISTORSION
DINAMICA EN REGISTROS SISMICOS DE
PUNTO DE REFLEJO COMUN, UTILIZANDO
RELACIONES DE ENERGIA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A :

REYNALDO CASTELLANOS CALVO



MEXICO, D. F.

1997.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-069

SR. REYNALDO CASTELLANOS CALVO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. C. Jorge A. Mendoza Amuchástegui, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

SUPRESION AUTOMATICA DE DISTORSION DINAMICA EN REGISTROS SISMICOS DE PUNTO DE REFLEJO COMUN, UTILIZANDO RELACIONES DE ENERGIA

- RESUMEN
- I INTRODUCCION
- II FUNDAMENTOS TEORICOS DE RELACIONES DE ENERGIA
- III APLICACIONES DE RELACIONES DE ENERGIA EN REGISTROS SISMICOS
- IV ALGORITMO PARA LA SUPRESION AUTOMATICA DE DISTORSION DINAMICA EN REGISTROS SISMICOS
- V RESULTADOS Y CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 6 de noviembre de 1995
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*RLR*gtg

A mis PADRES y HERMANOS

A NINA CON AMOR

LA MÁS CURIOSO ES QUE TODOS AQUELLOS QUE ESTUDIAN
SERIAMENTE ESTA CIENCIA DE LOS NÚMEROS Y FIGURAS, CAEN EN
UNA ESPECIE DE PASIÓN. VERDADERAMENTE LO QUE MÁS PLACER
PROPORCIONA NO ES EL SABER, SINO EL ESTUDIAR, NO LA
POSESIÓN, SINO LA CONQUISTA, NO EL ESTAR AQUÍ, SINO LLEGAR
ALLÁ.

KARL FRIEDERICH GAUSS

PARA DISTINGUIR LAS COSAS MÁS SIMPLES DE LAS COMPLICADAS,
Y PONER ORDEN EN SU INVESTIGACIÓN, ES PRECISO, EN CADA SERIE
DE COSAS EN QUE HEMOS DEDUCIDO DIRECTAMENTE ALGUNAS
VERDADES DE OTRAS, VER CUAL ES LA MÁS SIMPLE Y CÓMO TODAS
LAS DEMÁS ESTAN MÁS O MENOS O IQUALMENTE ALEJADAS DE ELLA.

DESCARTES

INDICE

RESUMEN	1
---------------	---

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN	3
--------------------	---

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RELACIONES DE ENERGÍA	6
---	---

2.1	Medidas de coherencia	7
2.1.1	Dominios de aplicación	8
2.1.2	Filosofía del diseño	9
2.2	Concepto de energía en la traza sísmica	10
2.3	Técnicas de correlación	12
2.3.1	Consideraciones básicas	12
2.3.2	Autocorrelación	14
2.3.3	Croscorrelación	16
2.4	Utilización de coherencia	18
2.5	Suma de amplitudes	20
2.5.1	Normalización de amplitudes	21
2.6	Coherencia multicanal basada en correlación cruzada	21
2.6.1	Suma de croscorrelación sin normalizar	22
2.6.2	Suma de croscorrelación normalizada	24
2.7	Coherencia basada en la semblanza	26
2.7.1	Normalización de semblanza	26

Capítulo 3

APLICACIONES DE RELACIONES DE ENERGÍA EN REGISTROS SÍSMICOS	29
--	----

3.1	Método del punto de reflejo común	29
3.2	Determinación geométrica del Normal Moveout (NMO)	30
3.3	Uso de correlación en correcciones estáticas	32
3.3.1	Correlación en estáticas residuales	34
3.3.2	Correlación en estáticas consistentes con la superficie	37
3.4	Uso de semblanza en análisis automático de velocidad	38

3.5	Aplicación de coherencia en diseños de filtros	41
3.5.1	Filtro local por coherencia	41
3.5.2	Filtro de semblanza direccionado	43
3.5.2.1	Estructura del filtro de semblanza direccionado	43
3.6	Sumatoria de amplitudes para la supresión de ruidos	45
3.6.1	Supresión automática de alta energía usando procedimientos de suma (stack)	46
3.7	El entorno de la distorsión dinámica alargamiento NMO	50

Capítulo 4

ALGORITMO PARA LA SUPRESIÓN AUTOMÁTICA DE DISTORSIÓN DINÁMICA EN REGISTROS SÍSMICOS		56
4.1	Condicionamiento para los datos de entrada	56
4.2	Pruebas preliminares para la solución del problema	57
4.3	Despliegues de espectros de energía del algoritmo	61
4.4	Diseño de la función de energía de semblanza	62
4.5	Secuencia del algoritmo	68

Capítulo 5

RESULTADOS Y APLICACIONES	71
--	-----------

Conclusiones

.	86
-----------	----

Bibliografía

.	88
-----------	----

Apéndice

I Diseño del filtro de semblanza para evaluar análisis de velocidades	i
II Traza sísmica compleja	iii
Significado físico de la señal sísmica analítica	iii
Usos de la traza compleja	iv
III Algoritmo de apilado parcial	vi
IV Algoritmo de supresión automática de distorsión dinámica	vii

RESUMEN

En esta tesis se desarrolla un algoritmo que, basado en mediciones de energía por técnicas de coherencia, así como de clasificación de señales, tiene por objetivo evaluar y suprimir en forma automática el efecto de distorsión dinámica comúnmente conocida como "stretching", que se caracteriza por la distorsión de amplitudes como resultado de la aplicación de la corrección dinámica Normal Moveout (NMO) en los registros sísmicos de punto de reflejo común (PRC). Esta corrección es una aplicación necesaria y fundamental para alinear los eventos de reflexión.

En la actualidad no existen técnicas automáticas dentro de los paquetes de programas de procesado de datos sísmicos que eliminen el efecto del "stretching" (distorsión dinámica). Este algoritmo se puede considerar como un primer intento por automatizar la eliminación de este efecto. Se consideraron en el diseño del algoritmo las características de coherencia y amplitud predominante que sirven para la identificación y el reconocimiento de los eventos sísmicos. En los datos obtenidos en forma multicanal es posible medir la similitud o coherencia de traza a traza, o en grupos de trazas. Cuando un evento coherente se extiende en un intervalo de tiempo y de distancia son útiles las características de relaciones de energía como la semejanza que es sensible a la coherencia del evento y a la amplitud del evento dentro de ventanas de tiempo.

Existen técnicas que se basan en el análisis progresivo del borrado (MUTE), donde las trazas contenidas en un arreglo de trazas se analizan en función del cambio de la forma de onda para obtener los puntos en función de distancia-tiempo para realizar el borrado. Esta técnica tiene la característica de apoyarse en la interpretación subjetiva del geofísico.

La supresión de los primeros arribos que presentan este efecto de distorsión generalmente se realiza de una manera cualitativa y subjetiva, en base a la experiencia del analista de datos sísmicos. Cuando no se realiza un corte adecuado, estas distorsiones generan ruidos que en etapas posteriores del procesado de datos sísmicos como son; deconvolución, correcciones estáticas, migración, etc., producen efectos indeseables difíciles y costosos de eliminar. El efecto de mayor importancia se da en la pérdida de resolución para identificar las capas geológicas más someras que puedan estar asociadas con algún objetivo petrolero o geotécnico.

El objetivo del algoritmo para el borrado automático es eliminar la apreciación subjetiva, reflejándose en un proceso poderoso y útil para la eliminación de este efecto de distorsión; en base a los análisis de los parámetros obtenidos por el programa que cuantifica los puntos óptimos donde debe realizarse el corte o borrado.

La convergencia del algoritmo se realizó con el análisis de los datos obtenidos por el programa, y con la parametrización de condiciones iniciales y finales. Los registros utilizados en la evaluación del programa fueron adquiridos en la Sonda de Campeche, así como en registros de otras áreas.

Se presenta un panorama de la utilidad de aplicar técnicas digitales de coherencia multicanal. Los fundamentos teóricos de las técnicas de correlación y de las relaciones de energía, sus diferentes características sísmicas y las ecuaciones que las relacionan. El tipo de notación en las ecuaciones facilita la implementación de algoritmos para su automatización.

La aplicación de coherencia multicanal y su relación con criterios de umbral auxilian la solución en diversos problemas geofísicos. El entorno de la distorsión dinámica lo analizamos con diferentes medidas de coherencia multicanal. La energía por semblanza proporcionó mejores resultados para eliminar en forma automática la distorsión de amplitudes generado por la aplicación de la corrección dinámica NMO.

Se describe el algoritmo de supresión automática de distorsión dinámica, el condicionamiento de los datos de entrada, las diferentes pruebas preliminares que fueron auxiliares para la solución del algoritmo, el diseño de la función de semblanza y los pasos generales del algoritmo.

Los resultados obtenidos por el programa se comparan en datos reales con los obtenidos por la supresión en forma manual. Con la automatización se tienen resultados acertadamente mejores.

INTRODUCCIÓN

La geofísica de exploración, basada en el método de reflexión sísmica da lugar a la exploración sísmológica y tiene como objetivo deducir información proveniente del subsuelo tal como: tipo de litología, posiciones de los estratos reflectores, distribución de velocidades y parámetros petrofísicos, a partir de tiempos de llegada observados y de las variaciones en la amplitud, frecuencia y forma de onda.

La técnica consiste en generar ondas sísmicas y medir el tiempo requerido de viaje desde la fuente pasando por el subsuelo hasta una serie de geófonos, distribuidos a lo largo de una línea recta sobre la superficie terrestre. Los datos sísmicos provenientes del subsuelo se registran en forma digital muestreados a intervalos de tiempos regulares. Las señales muestreadas son grabadas en forma multiplexada, al aplicar el proceso de demultiplexado, es posible obtener una representación de valores muestreados por cada canal en forma secuencial respecto al tiempo, y esto es conocido como la traza sísmica.

Las llegadas de energía que varían sistemáticamente de una traza a otra pueden representar energía reflejada que se identifican como eventos de reflexión en los registros sísmicos obtenidos en campo, los tiempos de arribo de estos eventos se miden para varios grupos de geófonos respecto a la fuente sísmica.

El procesamiento de señales sísmicas se inicia con el demultiplexado de los registros obtenidos en el campo y con la aplicación de correcciones preliminares de amplitud y tiempo para corregir por varios fenómenos físicos, tales como divergencia esférica, absorción, correcciones estáticas y dinámicas por sobretiempo normal (NMO), etc.

En otra etapa del procesado, se requiere de la agrupación de trazas de un mismo punto de reflejo común (PRC). Las trazas reagrupadas en PRC son corregidas por los procesos anteriormente mencionados, se les aplica otros procesos según los objetivos estructurales o estratigráficos, posteriormente son sumadas horizontalmente para tratar de atenuar ruidos y reflejos múltiples, creando una traza similar a la de incidencia normal. De esta manera al sumar (apilamiento o "stack") una gran cantidad de trazas se puede obtener una imagen preliminar del subsuelo.

En el procesamiento de datos sísmicos las correcciones de tiempo se dividen en dos categorías estáticas y dinámicas. Las estáticas son constantes con respecto al tiempo y se aplican a los datos para compensar por los efectos de variaciones en elevación, espesor y velocidad de la capa intemperizada y el nivel de referencia, su objetivo es determinar los tiempos de reflexión que hubieran sido observados a un mismo nivel de referencia. La corrección dinámica, también conocida como corrección por sobretiempo normal (NMO), es variable con respecto al tiempo y corrige las diferencias del tiempo de viaje entre fuentes y receptores. Su objetivo es transformar una traza sísmica grabada con una distancia fuente-receptor finita, a una distancia fuente-receptor igual a cero.

Como se mencionó anteriormente, la corrección dinámica "Normal Moveout" (NMO), es aplicada al procesado de datos sísmicos de reflexión en el dominio del PRC, para transformar trazas registradas con distancias ("offset") fuente-receptor diferente de cero, en trazas que simulan haberse grabado con fuente-receptor en la misma posición, es decir, offset cero; esta transformación produce distorsiones indeseables en la traza sísmica llamada NMO-stretch (Buchholtz, 1972), también conocida en la literatura como "stretching". NMO-stretch debe ser interpretado como un alargamiento de la forma de onda y por la pérdida de resolución de los estratos superficiales. Bulchholtz 1972, da una evaluación con procesos analíticos del NMO-stretch y llega a la conclusión de que al aplicar la corrección dinámica en trazas sísmicas no es posible generar exactamente trazas con offset cero por el efecto de la distorsión dinámica. La aproximación es mejor para distancias cortas de fuente-receptor (trazas cercanas).

Dunkin y Levin, 1973, se enfocan a la obtención de la ecuación que deriva el efecto del NMO-stretching y cuantifican el efecto de la distorsión por medio de relaciones entre espectros de amplitud obtenidos a partir de sismogramas sintéticos, observan el cambio de la distorsión relacionado con frecuencias bajas, para trazas con diferentes distancias fuente-receptor, comprueban que la principal distorsión dinámica se registra en tiempos someros y distancias grandes.

Yilmaz 1987, considera y relaciona la cantidad de corrección dinámica NMO entre el tiempo de incidencia normal y evalúa su efecto en el dominio de las frecuencias. Estudios hechos a partir del análisis de atributos en la traza compleja como son frecuencia, amplitud y fase instantánea y relaciones en el dominio de frecuencia-tiempo (Cohen, 1989), proporcionan un análisis alternativo para visualizar el efecto NMO-stretch. No son necesarias las aproximaciones, y el análisis se puede realizar simultáneamente en ambos dominios. (E. Barnes, 1992) determina el efecto de la distorsión en frecuencia con relación a la variación temporal, causada por la corrección dinámica NMO, por medio de la aplicación de la traza compleja y definiciones (Yilmaz, 1987) en el dominio de la frecuencia instantánea y el espectro instantáneo de potencia.

Miller, 1992 demuestra la consecuencia de subestimar la cantidad de "stretch" cuando se aplica la corrección NMO en datos de reflexión somera.

Los diferentes enfoques de los autores citados para evaluar la distorsión dinámica NMO-stretching únicamente se cuantifica en forma analítica y visual, sin embargo, no se intenta automatizar la eliminación de su efecto en datos reales.

La distorsión debida al alargamiento debe ser suprimida o borrada (MUTE), antes de iniciar el proceso de apilado, de lo contrario distorsiona el diseño para un operador de deconvolución, en el proceso de migración se generan efectos imposibles de eliminar, en los estratos superficiales se pierde resolución, no se puede hacer correcciones estáticas apropiadas, los análisis de velocidad son fuertemente alterados. Los efectos indeseables, si no se eliminan adecuadamente, influyen enormemente en todas las etapas posteriores del procesado sísmico.

Generalmente, el problema lo resuelve el analista geofísico de una manera visual empírica a partir de registros de reflejo común (PRC) corregidos dinámicamente, seleccionando el tiempo y la traza para hacer el borrado (MUTE). En ocasiones la presencia de ruidos con baja frecuencia mezcla la señal de reflejo y el punto de corte seleccionado, no es el adecuado porque se elimina señal o se deja pasar ruido resultando la pérdida de información para las capas superficiales y en procesos posteriores como deconvolución y estáticas residuales afecta la resolución. Se ha observado en los registros sísmicos de PRC que el efecto de "stretching" se presenta a offset grandes y tiempos someros; por lo tanto, físicamente las trazas más alejada de la fuente y los primeros arribos son crucialmente los más afectados.

Los intentos por automatizar diferentes procedimientos que resuelvan problemas geofísicos en grandes volúmenes de datos se han basado en consideraciones estadísticas y de energía. Con el objetivo de dar mayor rapidez en la producción industrial de procesamiento de datos sísmicos.

El objetivo de este trabajo es tratar de eliminar la subjetividad del proceso de borrado superficial presentando un algoritmo para la supresión automática del efecto de distorsión dinámica o stretching, considerando relaciones estadísticas de energía, atributos sísmicos, así como la clasificación y análisis de la forma de la amplitud presente en la señal sísmica, suprimiendo el criterio subjetivo del intérprete geofísico.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RELACIONES DE ENERGÍA

La adquisición de datos en el campo durante una exploración por métodos sísmicos, tiene la característica de hacerse en forma multiplexada usando un determinado tipo de formato, que permite un buen control en cuanto a los arreglos geométricos de tendidos, es decir de fuentes-receptores. Los datos multiplexados consisten en una secuencia de datos en los cuales la primera muestra uno de todos los canales son grabadas, siguiendo por la muestra dos de cada canal y así sucesivamente. Esto se representa como un arreglo matricial en la figura 2.1a.

Tiempo muestreo	Canal de grabación				(i, j):	Muestras	Canal de grabación		
1	A ₁₁	A ₂₁	A ₃₁	A _{M1}		ésimo canal de grabación	1	A ₁₁	A ₁₂
2	A ₁₂	A ₂₂	A ₃₂	A _{M2}	2		A ₂₁	A ₂₂	A _{2N}
3	A ₁₃	A ₂₃	A ₃₃	A _{M3}	3		A ₃₁	A ₃₂	A _{3N}
.	ésima muestra
.
M	A _{1N}	A _{2N}	A _{3N}	A _{MN}	en tiempo	M	A _{M1}	A _{M2}	A _{MN}
(a) FORMATO MULTIPLEXADO Formato de Campo						(b) FORMATO DEMULTIPLEXADO Formato de traza secuencial			

Figura 2.1 Formato de datos sísmicos

El primer paso en procesamiento de datos sísmicos es su reordenamiento, de manera que la señal completa para cada combinación de fuente-receptor es reconstruida. El arreglo conocido como demultiplexado permite esta configuración (fig.2.1b), donde se tienen todas las muestras del canal uno en secuencia del tiempo cero, hasta el tiempo final de grabación, y así sucesivamente para los demás canales. Entonces la señal digital consiste de valores de amplitud, espaciados a cierto intervalo de tiempo, para obtener determinada resolución. También puede ser vista como la traspuesta de la matriz (fig. 2.1a), donde las columnas representan trazas sísmicas grabadas a diferentes offset para un

punto de tiro común. Después de este primer paso, los datos son convertidos a algún formato conveniente que es utilizado para las etapas posteriores del proceso. Este formato es determinado por el tipo de sistema de adquisición. Después de esta etapa se tienen los datos multicanales sísmicos en un formato conveniente para poder ser usados ampliamente en diferentes etapas de su proceso. La gran redundancia de información obtenida por la técnica del punto de reflejo común que este presente en estos arreglos de datos hace posible la aplicación de diversas técnicas digitales multicanales que utilizan relaciones de energía para realzar la señal o suprimir información no deseada.

2.1 MEDIDAS DE COHERENCIA

El concepto de coherencia involucra simplemente la conexión, o la relación de varias características entre sí. En el procesamiento de datos sísmicos frecuentemente se requiere utilizar medidas de similitud o alineamiento en tiempo de varias trazas sísmicas. La medida de correlación es una operación en el dominio del tiempo que se utiliza para medir el tiempo en el que las trazas son similares. El concepto de correlación en el dominio del tiempo es análogo al de coherencia en el dominio de la frecuencia.

Las relaciones de energía que se basan en el atributo de amplitud de la traza sísmica, tienen como principal objetivo el reconocimiento y la identificación de señales asociadas a eventos sísmicos.

La razón de utilizar semblanza y otras medidas de coherencia en datos multicanales obtenidos por los métodos sísmicos de exploración, es en gran medida por la redundancia de información que puede estar presente. Esta repetición de señal presente en los diferentes canales, es posible considerarla como una señal común en los canales que la registran, y mediante técnicas de energía la señal es realzada, extraída, delineada o simplemente ignorada. Para estas características se requiere el uso específico y correlación de datos obtenidos por los diferentes procesos de energía. En la industria se han desarrollado diversas técnicas de similitud que hacen posible que los eventos sísmicos se puedan marcar y graduar automáticamente usando como criterios medidas de coherencia como la semblanza (Poulson y Merdler, 1968; Garrota, 1971).

Para (Neidell y Taner, 1971), tres puntos de vista pueden evaluarse en cada medida de coherencia: primero, el dominio en el que se evalúa la medición; segundo, la filosofía con la que se diseña el procedimiento, como son los procesos de normalización y de la programación de medidas de coherencia; tercero, los objetivos hacia los que se debe dirigir la medición. Para el presente trabajo el propósito fue evaluar en forma automática por medio de medidas de coherencia el efecto de la

distorsión dinámica "stretching" que se provoca al aplicar la corrección dinámica NMO (Normal Moveout) a los datos agrupados en familias de punto de reflejo común.

2.1.1 DOMINIOS DE APLICACIÓN

Resulta de gran utilidad analizar en qué dominio, de tiempo o frecuencia, nos conviene aplicar determinado proceso de coherencia y así simplificar el objetivo planteado. El dominio utilizado complementa la filosofía del diseño.

Para ilustrar los dominios de aplicación, en el dominio del tiempo podemos hacer uso del coeficiente de correlación:

$$R_{xy}^2(0) = \frac{R_{xy}^2(0)}{R_{xx}(0) R_{yy}(0)}, \quad (1)$$

donde $R_{xy}^2(0)$, es el coeficiente de correlación de la serie de datos x con la serie de datos y , es posible conocer el grado de similitud entre ambos datos, así como el tiempo que existe entre un evento primario o un múltiple, el intervalo de tiempo para que una traza se parezca a la otra o el corrimiento aplicado a las correcciones estáticas residuales, etc.

Ahora, si aplicamos la misma definición en el dominio de la frecuencia, obtenemos el coeficiente de coherencia:

$$\gamma_{xy}(\omega) = \frac{|G_{xy}(\omega)|}{G_{xx}(\omega) G_{yy}(\omega)}, \quad (2)$$

donde $G_{xy}(\omega)$ es la banda de frecuencia de los crospectros de la serie de datos x y la serie de datos y . (Bendat y Piersol, 1965).

Este tipo de análisis permite diseñar filtros digitales que hacen posible una mayor resolución, eliminando ruido y realzando señal. Como se puede apreciar, la interpretación de estas medidas en los dos dominios es bastante diferente, sin embargo, es importante que la consideración de los dominios de aplicación para efectuar una medición de identificación de señal convergen a la obtención de alguna característica común que puede estar presente en un conjunto de señales, como es el tiempo de desplazamiento para que la señal tenga la mejor relación de similaridad o la frecuencia que identifica a la señal o al ruido, etc.

2.1.2 FILOSOFÍA DEL DISEÑO

Se considera a las diferentes maneras de analizar el hecho de que un problema de señal sísmica pueda tener solución mediante la aplicación y el diseño de medidas de coherencia. Los registros sísmicos multicanales permiten con gran éxito la aplicación de medidas de coherencia. Cuando se obtiene algún gráfico de estos registros existe la posibilidad de decidir que tipo de medición de coherencia es posible aplicar para el realce de la señal o la eliminación de algún efecto indeseable en los datos sísmicos, el reconocimiento gráfico facilita la solución de los objetivos del problema. La habilidad y experiencia de observar datos sísmicos así como del conocimiento de técnicas de coherencia y su programación o automatización, son elementos fundamentales en la filosofía del diseño para la aplicación de medidas de coherencia.

Algunos objetivos comunes en estudios multicanales incluyen predicción de señal, detección de desplazamiento de señales, extracción de alguna señal común, clasificación de señales y procesos de control. Es obvio que las medidas de coherencia deben proporcionar información relevante a los objetivos propuestos. Esta información puede estar basada en energía, entropía, estadística, etc. Existen valiosos diseños para considerar. Algunos de los más importantes tienen fundamentos en modelos matemáticos, principios de clasificación estadística, conceptos de energía, etc., que conducen al reconocimiento de patrones.

Es evidente que muchas de las medidas de coherencia tienen una relación muy estrecha y cada una puede ser interpretada de diferentes puntos de vista. Por ejemplo la dualidad que existe entre varianza, un concepto estadístico, y energía un principio con causas físicas. Los coeficientes de correlación normalizados son relacionados a coeficientes de regresión que puede ser interpretado en términos de modelos matemáticos.

Algunos autores han utilizado funciones de momentos y crosscorrelaciones (Kendall, 1948), conceptos de probabilidad (Green, Kelly y Levin, 1966), funciones de ambigüedad/similaridad (Neidell, 1969), medidas de señal/ruido (Simpson, 1955 y 1967), energía o entropía (Pelto, 1954), reconocimiento de patrones de reflexión (Sinvhal, 1992), y esqueletonización sísmica (Lu, et al, 1990).

Para resolver el objetivo de nuestro problema de automatización de la supresión ("mute") de la distorsión dinámica ("stretching"), la solución fue utilizar coherencia basada en semblanza en registros corregidos dinámicamente por NMO. La energía evaluada por semblanza para identificar los cambios de amplitud entre los eventos coherentes y el efecto de la distorsión dinámica resulto de gran utilidad, así como su relación con estadísticos.

2.2 CONCEPTO DE ENERGÍA EN LA TRAZA SISMICA

El concepto esta estrechamente relacionado con el teorema de *Parseval*. Si se toma en cuenta que la traza sísmica representa una secuencia de la propagación elástica de la energía y considerando el modelo convolucional de la traza sísmica, donde están presentes todos los efectos del filtrado de la tierra, es posible afirmar que la amplitud de una reflexión depende del contraste entre las impedancias acústicas de las interfaces reflectoras. También puede agruparse una o varias características comunes, tal como amplitud, fase, frecuencia etc.

Efectuando un análisis con las técnicas de *Fourier* a las amplitudes de las trazas, es posible conocer el contenido de potencia o energía de la señal.

El teorema de *Parseval* da una relación entre una señal temporal $f(t)$ y su transformada de *Fourier* $F(f)$ en el dominio de la frecuencia: en términos de energía afirma que la energía de una señal $f(t)$ calculada en el dominio del tiempo debe ser igual a la energía calculada en el dominio de la frecuencia $F(f)$

$$\text{si } \sigma = 0 \quad \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) e^{-j2\pi\sigma t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) F(\sigma - f) df, \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) F(-f) df = \int_{-\infty}^{\infty} |F(f)|^2 df, \quad (4)$$

Esta transformación describe la cantidad relativa de energía de una señal en función de la frecuencia. La cantidad $|F(f)|^2$ describe sólo la cantidad relativa de energía a varias frecuencias y la energía a una frecuencia dada es cero, por lo tanto, es el área bajo $|F(f)|^2$ lo que denota energía. La densidad espectral de una señal, representa su energía por unidad de frecuencia y muestra las contribuciones relativas de energía de los distintos componentes de frecuencia.

Una forma adicional de obtener el contenido de energía E de una función $f(t)$ acotada por un tiempo inicial y final como la traza sísmica, es por medio de la función de correlación para dos funciones idénticas que esta dada por:

$$\phi(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-\tau}^{+T} f(t) f(t - \tau) dt, \quad (5)$$

si evaluamos la función de correlación para $\tau=0$

$$\phi(0) = \bar{x}^2 = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f(t) f(t) dt = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} f^2(t) dt \quad , \quad (6)$$

por lo que se puede afirmar que el contenido de energía E de una función $f(t)$ es igual al valor de la función de autocorrelación de $f(t)$ para $t=0$. También el valor de $\phi(\tau)|_{\tau=0}$ es conocido como el valor cuadrático medio de $f(t)$.

Si en la traza sísmica se miden los valores de amplitud a intervalos de tiempo regulares y a su vez se elevan al cuadrado y se suman estos valores de amplitud, tendremos por definición el cálculo de la energía .

Si se aplica la transformada de Fourier a la función de autocorrelación es posible obtener el espectro de potencia:

$$\mathcal{F} \{ \phi(\tau) \} = | F(f) |^2 \quad , \quad (7)$$

Existe otra forma de cuantificar la energía por medio de semblanza que expresa una relación de energía de salida con energía de entrada en datos multicanales. Esta opción se consideró en este trabajo por sus características en el diseño de nuestro algoritmo para la supresión automática del efecto de distorsión dinámica.

Los espectros de potencia muestran las contribuciones relativas de energía de los distintos componentes de frecuencia. El espectro de potencia acentúa los efectos de altas amplitudes. Una manera de obtener espectros de potencia o energía es con la aplicación de la transformada de Fourier de la traza sísmica y elevando al cuadrado las amplitudes, también aplicando la transformada a la función de autocorrelación:

$$T \mathcal{F} (\text{traza sísmica}) = \frac{|\text{amp}|^2}{N \Delta t} = \text{Espectro de potencia}$$

$$T \mathcal{F} \left(\frac{\text{autocorrelación}}{N \Delta t} \right) = T \mathcal{F} (\text{autocovarianza}) = \text{Espectro de potencia}$$

2. 3 TÉCNICAS DE CORRELACIÓN

2.3.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS

Una buena medida de similaridad en datos digitales para dos formas de onda es la multiplicación de acuerdo al intervalo de muestreo, ordenada por ordenada, y la suma de los productos sobre la duración de la señal. Así, la evaluación de la similaridad entre las ondas a y b referidas en la fig 2.2, se da multiplicando la ordenada $p1$ por ordenada $q1$, $p2$ por $q2$, $p3$ por $q3$ y así sucesivamente, finalmente al sumar estos productos se obtiene la medición de la similaridad. Las formas de onda a y b son idénticas, cada ordenada positiva o negativa contribuyen a términos positivos en la suma y el resultado da similaridad.

Para el mismo proceso de las ondas b y c el producto positivo es compensado por un producto negativo, como las ondas no son similares el resultado de la suma será pequeña. Las ondas c y d son idénticas en forma, pero una esta desplazada en tiempo. Si efectuamos el proceso de multiplicación para las ordenadas r y s , la suma será pequeña, se concluye que para tiempos de desplazamiento grandes la similaridad es pequeña, cuando el tiempo de desplazamiento es cero ocurre el máximo valor de similaridad. Para datos muestreados la función de correlación esta dada por:

$$Z(kT) = \sum_{i=0}^{N-1} x(iT)h[(k+i)T], \quad (8)$$

donde

- k índice de muestras.
- T intervalo de muestreo.
- x, h funciones a correlacionarse.
- N número de muestras.

Cuando las dos funciones x, h son idénticas la correlación se conoce como autocorrelación, y no depende en sí misma de su forma de onda más bien por el contenido de frecuencias que a su vez esta definido por el espectro de amplitudes. Una variedad de formas de onda pueden ser sintetizadas asociando un espectro de amplitud en particular con una variedad de espectros de fase.

En estudios geofísicos y en especial en sismología resulta importante conocer el contenido de frecuencias de las señales sísmicas. Los métodos matemáticos de correlación lo facilitan, estableciendo la relación entre la similitud entre dos curvas, cantidades o funciones. Las técnicas de correlación más utilizadas son la autocorrelación y correlación cruzada (crosacorrelación).

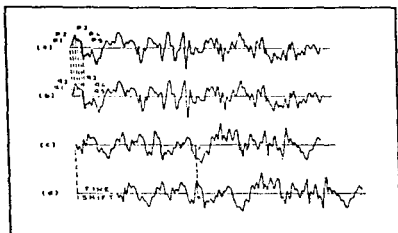
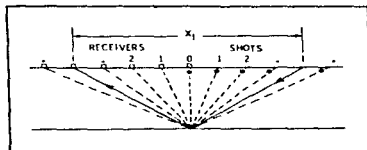


Figura 2.2

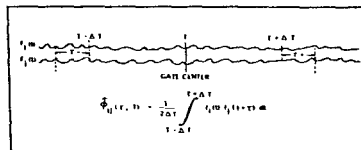
Las señales (a) y (b) son idénticas en forma y tiempo.
 Las señales (c) y (d) son idénticas en forma pero (d) esta desplazada en tiempo.
 La similitud entre (a) y (b) es mayor, mientras que en (c) y (d) es menor. (Anstey, 1964).

El modelo de correlación dinámica de (Schneider y Backus, 1968) figura 2.2.1, establece una metodología para evaluar la correlación para datos multicanales obtenidos por la técnica del PRC.



Modelo de reflexión para un PRC

Figura 2.2.1
 Modelo de correlación
 dinámica



Estimación de crosacorrelacion en un tiempo T

Las ecuaciones que relacionan cada distancia Fuente-Receptor con cada trayectoria asociada a determinada traza, se expresa como:

Offset

Trazas sísmicas

X_0	$f_0(t) = p(t) + m(t) + n_0(t)$
X_1	$f_1(t) = p(t - \tau_1) + m(t - \gamma_1) + n_1(t)$
\vdots	\vdots
\vdots	\vdots
X_i	$f_i(t) = p(t - \tau_i) + m(t - \gamma_i) + n_i(t)$
\vdots	\vdots

En este modelo, la traza i -ésima $f_i(t)$ consiste de tres componentes:

- p secuencia de reflexión de primarios
- m secuencia de reflexión de múltiples
- n Ruido (ambiental, ondas de superficie, etc.)

La autocorrelación esta definida como:

$$\bar{\Phi}_{i,j}(\tau, T) = \bar{\Phi}_{p,p}(\tau - t_p, T) + \bar{\Phi}_{m,m}(\tau - t_m, T) + \bar{\Phi}_{n_i, n_j}(\tau, T)$$

- $\bar{\Phi}_{p,p}(\tau, T)$ autocorrelación de primarios
- $\bar{\Phi}_{m,m}(\tau, T)$ autocorrelación de múltiples
- $\bar{\Phi}_{n_i, n_j}(\tau, T)$ croscorelación de ruido.

El objetivo del modelo es proporcionar una medida en el dominio de tiempo-espacio de la relación de energía entre las diferentes trazas de un PRC. Los elementos coherentes pueden ser originados por energía de primarios o múltiples que se basan sobre las velocidades derivadas de los tiempos de correlación. El resultado de la caracterización de la señal y el ruido contra el tiempo y espacio permite el diseño óptimo de filtros para la suma de trazas.

2.3.2 AUTOCORRELACION

La técnica de autocorrelación es la correlación de una función $f(t)$ consigo misma; es el grado de similitud o de correlación de una señal con ella misma desplazada en intervalos sucesivos de tiempo, y cuando el desplazamiento es cero, entonces la autocorrelación es máxima, ambas señales coinciden totalmente. En forma digital para valores de amplitud tenemos:

$$A_\tau = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_{i+\tau} \quad (\tau = 0, 1, 2, \dots, N-1), \quad (9)$$

La señal, $x_{i+\tau}$, representa una réplica de la señal x_i , desplazada por una cantidad τ , para N muestras. Los desplazamientos constantes usualmente son tomados como el intervalo de muestreo. El espectro de amplitud de la función de autocorrelación en el dominio del tiempo es equivalente al espectro de potencia de la serie o función original y es una herramienta analítica importante para señales aleatorias.

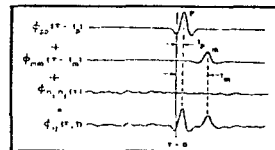


Figura 2.2.1
Modelo de correlación dinámica

El coeficiente máximo de autocorrelación ocurre en el desplazamiento cero, y representa la energía total de la señal, por lo tanto, es una de las propiedades más importantes que se obtienen de esta técnica. La autocorrelación es una herramienta muy útil para el diseño de filtros de deconvolución; se puede conocer la longitud del operador y la distancia predictiva, y también la selección de filtros en frecuencia.

En términos matemáticos, la autocorrelación describe la relación de una señal estacionaria con el desplazamiento de una réplica de ella. En cada cambio, durante el desplazamiento, las amplitudes se multiplican y éstos productos se suman, obteniéndose así, el coeficiente de correlación. La función continua de autocorrelación es:

$$\phi_{xx}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) x(t - \tau) dt \quad (10)$$

La función de autocorrelación es representada en forma gráfica como la similaridad de una forma de onda consigo misma en función del tiempo de desplazamiento. Existen evidencias de que la función de autocorrelación no depende del tipo de forma de onda, pero sí de su contenido de frecuencia.

La función de autocorrelación contiene la misma información que el espectro de potencia. Existen dos aproximaciones alternativas para obtener la función de autocorrelación: la aproximación a través del concepto de similaridad como una función del desplazamiento en tiempo y una aproximación a través de la técnica de Fourier del espectro de potencia. Las dos aproximaciones son intercambiables y equivalentes. Las gráficas de la fig.2.3 muestran el proceso de las dos aproximaciones para obtener la función de autocorrelación. La función de autocorrelación contiene todos los componentes de frecuencia de la señal a fase cero.

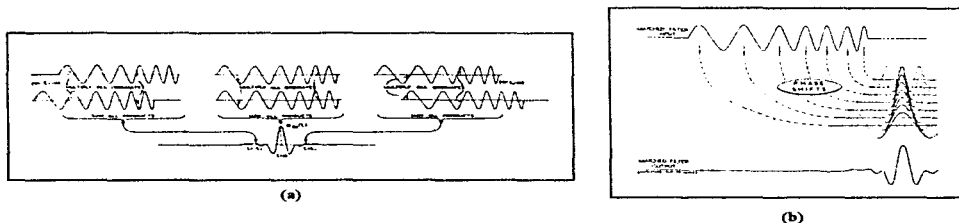


Figura 2.3

La figura 2.3a ilustra el proceso de construcción de la función de autocorrelación por similaridad. La figura 2.3b muestra la aproximación alternativa por Fourier para construir la función de autocorrelación.

2.3.3 CROSCORRELACION

La técnica de correlación cruzada es similar al proceso de autocorrelación fig. 2.4, simplemente son dos funciones diferentes que varían en el tiempo. Cuando se efectúa este proceso, la señal resultante tendrá amplitudes iguales al producto de las amplitudes de ambas señales y el contenido de frecuencia serán las comunes a las dos señales.

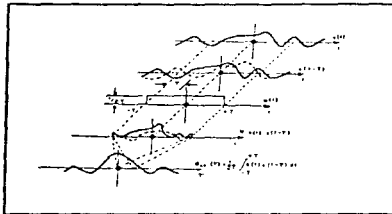


Figura 2.4

Proceso de autocorrelación para una función $x(t)$ continua acotada en una ventana de tiempo $2T$

La similitud entre convolución y croscorelación de dos señales de la misma frecuencia fundamental, es que ambos son funciones que tienen la misma frecuencia fundamental y conservan las frecuencias comunes en las dos señales dadas.

Las señales que se correlacionan se muestrean a intervalos uniformes de tiempo, dentro de una ventana en tiempo. El valor máximo se obtiene en la óptima correlación, y el mínimo en el punto de mayor diferencia.

En la fig.2.5 se tiene en la parte superior la señal estacionaria y la señal que se desplaza en tiempo; las dos señales pueden ser analizadas a través de una ventana de tiempo de ancho T , donde se evalúa la similitud de las dos señales por el método anteriormente explicado de multiplicar ordenadas y sumar productos. En la parte inferior se tiene el resultado de la similitud de las señales anteriores, como una función del tiempo de desplazamiento entre las señales. La similitud generalmente no es fácilmente reconocida visualmente en grandes volúmenes de datos, por esta razón es necesario el uso de técnicas automatizadas de correlación.

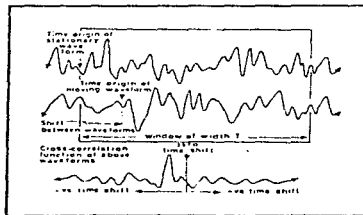


Figura 2.5

Muestra en la parte de arriba las dos trazas a ser croscorelacionadas, la traza de abajo es el resultado de la croscorelación; el máximo valor ocurre cuando hay similitud entre las dos trazas, (apenas visible al ojo).

Cuando una señal de forma conocida es transmitida en un medio y se recibe con ruido, la mejor manera de detectar la señal es croscorelacionando la señal recibida con la señal transmitida, la función de croscorelación incluye dos partes: la autocorelación de la señal transmitida (la cual es común a ambas señales) y una segunda parte que representa la croscorelación de la señal transmitida con la señal recibida inmersa en ruido. Este procedimiento es análogo cuando se utiliza una fuente sísmica de vibrador y se requiere la técnica de croscorelación para identificar la señal sísmica. La gráfica de la fig. 2.6 esquematiza este proceso.

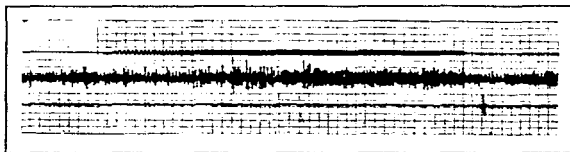


Figura 2.6
La traza superior representa la señal transmitida. La traza central muestra la contaminación de la señal transmitida con ruido. La última traza es la croscorelación de las dos anteriores, donde la señal (en forma de autocorelación) es elevada por arriba del nivel de ruido.

También la correlación cruzada permite determinar el cambio de tiempo de una traza en relación con la otra que produce el alineamiento óptimo de las dos trazas, este resultado tiene aplicaciones en el cálculo de las correcciones estáticas.

Las técnicas de correlación son de gran utilidad para la detección de señales periódicas inmersas en ruido. Existen dos métodos: el primero es aplicable si la frecuencia de la señal periódica es conocida y consiste de croscorelaciones de la señal con senoides, el segundo se aplica si la frecuencia de la señal periódica es desconocida, y consiste de la autocorelación de la señal con ruido.

En la determinación de espectros los métodos de croscorelación con senoides pueden ser usados para establecer espectros de amplitud de señales periódicas. Para señales no periódicas como señales mezcladas en ruido que son del tipo más común encontradas en la naturaleza, el mejor método para la determinación de espectros es la construcción de la función de autocorelación y su manipulación por métodos matemáticos que conducen al espectro de potencia.

En términos generales se pueden resumir las características de las técnicas de correlación: primero, la correlación funciona mejor cuando las señales consideradas presentan un amplio contenido de frecuencias, segundo, se debe considerar que la correlación da una medida promedio de la similitud entre dos formas de onda, tercero, la correlación es completamente insensible a diferencias locales de amplitudes de las dos formas de onda, cuarto, la correlación es

extremadamente sensible al alargamiento (stretching) de una de las señales. Esta característica se consideró para evaluar la distorsión de amplitudes por NMO-stretching. La fig 2.7 esquematiza estas características.

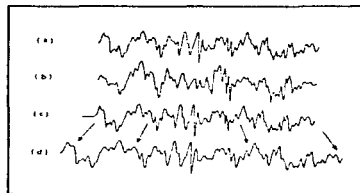


Figura 2.7
Las trazas *a* y *b* difieren en sus amplitudes locales; la correlación es relativamente insensible a este tipo de diferencias. La traza *d* es una versión alargada de la traza *c*; la correlación es muy sensitiva a este tipo de diferencias.

2. 4 UTILIZACIÓN DE LA COHERENCIA

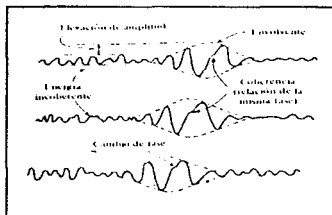


Figura 2.8
Características de los eventos sísmicos.
Sheriff y Geldart, 1991.

El concepto físico de la coherencia se da cuando es posible reconocer una señal que produce un mismo efecto en los diferentes canales que componen la adquisición multicanal de datos sísmicos. Si la señal es lo suficiente fuerte para predominar a otras energías que llegan al mismo tiempo, las trazas correspondientes a cada arreglo de detectores (geófonos) serán más o menos similares durante el intervalo en que la señal en grabada.

Esta similitud de apariencia de traza a traza se conoce como relación de coherencia, y también es una condición necesaria para el reconocimiento de cualquier evento de reflexión (Fig. 2.8). Las medidas de coherencia expresan en forma cuantitativa la cantidad de parecido o similitud de los datos multicanales

Es posible seleccionar o derivar un operador para el que se puede maximizar o minimizar un valor de coherencia, así como ingeniar un algoritmo en donde la obtención de coherencia es en sí mismo el objetivo. Alternativamente, hay que diseñar una búsqueda sistemática de rangos adecuados de parámetros que pueden ser tomados para localizar la medida de coherencia.

En los procesos iterativos es posible inicializar con convergencia a los resultados deseados. Todo el ingenio y herramientas matemáticas disponibles deben ser utilizadas en la programación de medidas de coherencia. Es evidente que las medidas de coherencia pueden relacionarse estrechamente unas con otras para interpretarse a partir de diferentes puntos de vista. Los procesos de normalización se aplican de acuerdo a los objetivos que se tengan en el uso de las medidas de coherencia.

Un proceso de normalización mantiene unitaria la máxima amplitud encontrada y enfatiza los cambios grandes de amplitudes. Aprovechando esta característica, se utilizó en nuestro algoritmo la semblanza normalizada para identificar los cambios de mayor amplitud asociados con el efecto de la distorsión dinámica

La fig. 2.9 es un esquema de representación para datos multicanales muestreados con algún intervalo Δt constante en tiempo, donde hay M canales individuales que contienen una señal coherente que sigue una trayectoria $k(i)$. Se puede considerar una ventana en tiempo de $N+1$ muestras para cada traza o canal, simétricamente alrededor de la muestra $k(i)$ en forma paralela a la trayectoria $k(i)$. Bajo este esquema dado en el dominio del tiempo, se pueden aplicar medidas de coherencia.

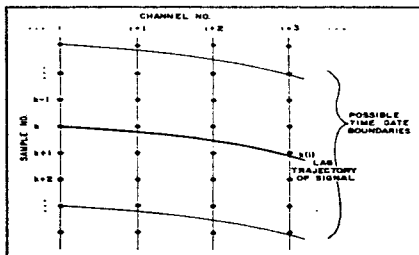


Figura 2.9
Datos multicanales muestreados
 $k(i) = k + (i - 1) \alpha$
 donde α , es una constante igual a un múltiplo entero del intervalo de muestreo.
 Neidell y Taner, 1971.

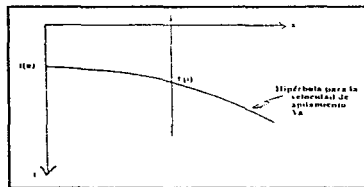
Esta forma de datos multicanales fue utilizada para implementar el desarrollo de nuestro algoritmo automático de supresión de distorsión dinámica por medio de la medida de coherencia basada en semblanza

2. 5 SUMA DE AMPLITUDES

La forma más simple de una medida de coherencia es la suma de amplitudes que describen trayectorias hiperbólicas. (Garrota y Michon, 1967; Sherwood y Poe, 1972):

$$S(i) = \sum_{i=1}^M f_i t(i), \quad t(i) = k(i), \text{ trayectoria} \quad (11)$$

donde: $f_i, t(i)$ la sumatoria es sobre el número de canales $m = 1, 2, \dots, M$ o trazas por PRC representa el valor de la amplitud de la traza i -ésima para el tiempo $t(i)$, a lo largo de la hipérbola para la velocidad de prueba :



$$t(i) = \left[t^2(0) + \frac{x_j^2}{V_p^2} \right]^{1/2}$$

En situaciones prácticas (Garrota and Michon, 1967) han representado la suma de amplitudes por:

$$C_a(t_0, V_p) = \frac{\sum_{j=-r}^{r+q} \left| \sum_{i=1}^M f_{ij} \right|}{q+1}, \quad (12)$$

donde t_0 es el tiempo de referencia al offset cero.
 V_p es la velocidad asumida.
 f_{ij} la amplitud de la muestra j -ésima de la traza i -ésima después de la aplicación dinámica normal moveout (NMO).
 $r = t_0 - q/2$
 $(q+1)$ es el número de muestras dentro de una ventana de tiempo.

Las técnicas por suma de amplitudes tienen como características: baja resolución y sensibilidad a la polaridad de la traza, pero su proceso es menos intenso que otras medidas de coherencia.

El criterio de sumatorias de amplitud se ha tomado en cuenta por su simplicidad de implementación y, en algunos tiempos, por la buena precisión obtenida en condiciones de baja relación señal-ruido. En muchas otras instancias, el criterio de crosocorrelación es preferido por su alta exactitud en condiciones prácticas. El criterio de semejanza es el más ampliamente usado.

2.5.1 NORMALIZACIÓN DE SUMA DE AMPLITUDES

Este procedimiento consiste en suma de amplitudes normalizada por su magnitud, es decir, por el valor absoluto de la sumatoria (Neidell and Taner, 1971) y se define como:

$$NS = \frac{|S(t)|}{\sum_i |f_i, t(t)|} \quad (13)$$

El efecto de normalización tiende a resaltar señales débiles, pero carece de resolución. El rango de NS es $0 < NS < 1$. Es sensible a la polaridad de la señal.

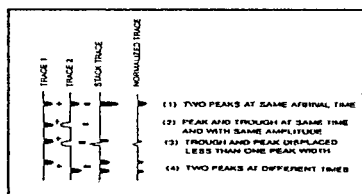


Figura 2.10
Representación del proceso de normalización en trazas sísmicas.
Gadallah, M. R., 1994.

2.6 COHERENCIA MULTICANAL BASADA EN CORRELACIÓN CRUZADA

Es un hecho que la función de correlación cruzada sólo se puede usar como una medida de la coherencia entre dos trazas. Para cuantificar la coherencia en un número mayor de trazas (canales), se considera la situación práctica de que cuando se apilan (suman) varios canales que están en fase, la amplitud resultante es grande y significa que son coherentes las señales grabadas en esos canales, y la disminución o cancelación de amplitud significa que son incoherentes.

Es por medio del cociente de la energía del apilamiento con la suma de la energía de los canales individuales como se obtiene una relación de la medida de coherencia.

Cuando f_i es la amplitud del canal individual i en el tiempo t , en consecuencia la amplitud del apilamiento en el tiempo total t será la sumatoria $\sum f_i t_i$ y el cuadrado de esta cantidad, considerando el teorema de Parseval, será la energía. La relación de energía E_i , de salida con la suma de las energías de las trazas de entrada es:

$$E_i = \frac{|\sum_i f_i t_i|^2}{\sum_i (f_i t_i)^2} \quad (14)$$

Sheriff y Geldart, 1991

2.6.1 SUMA DE CROSCORRELACION SIN NORMALIZAR

Croscorrelación es una técnica usada con mucha frecuencia como una medida de coherencia. Algunos algoritmos diseñados para análisis de velocidad emplean medidas de croscorrelación sin normalizar. Las primeras aplicaciones fueron mediante el método de correlación dinámica de Schneider y Backus (1968). El método está basado en el análisis residual de moveout después de una corrección inicial de NMO (Normal Moveout) generando resultados acertadamente mejores. En otras palabras, el método consiste en la sumatoria dentro de una trayectoria en tiempo que sigue la ruta correspondiente a la hipérbola de prueba, a través del arreglo del punto de reflejo común (PRC), la ecuación (14) es una relación de energías entre trazas sobre una ventana de tiempo y permite efectuar la correlación dinámica.

El análisis discreto con funciones de croscorrelación es importante porque las señales que se analizan son del tipo discreto y el procesado de señales discretas se realiza a través de computadoras digitales. Cuando se aplica el teorema del muestreo se puede tener la longitud de la señal muestreada a intervalos de tiempo regulares y se relaciona por medio de $L=N\Delta t$

donde:

- L tiempo o total de grabación
- N número de muestras
- Δt intervalo de muestreo

La croscorrelación sin normalizar para datos digitales entre dos canales p para una trayectoria $k(i)$ (ver la fig.2.9) está dada por:

$$\frac{1}{N+1} \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} f_{i,j} f_{i+p,j(i+p)} \quad (15)$$

donde f_p es la amplitud de la j -ésima muestra en el i -ésimo canal p . N es el número de muestras. Los límites de la sumatoria definen la longitud de la ventana de análisis en el tiempo. Este tipo de notación para la amplitud facilita la elaboración de programas y enfatiza que la trayectoria de la señal no necesita estar estrictamente a lo largo de rutas definidas por las muestras.

Para M datos multicanales, la medición de coherencia de todas las posibles sumas de croscorrelaciones debe ser más confiable que la suma para dos canales p . Se relaciona esta sumatoria de similitud por medio de:

$$\sum_{p=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-p} \frac{1}{N+1} \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} f_{ij} f_{i+p,j(i+p)}, \quad (16)$$

Existen evidencias (Neidell y Taner, 1971) de que la suma de croscorrelación sin normalizar es equivalente a la mitad de la diferencia de energía entre la energía de la señal de salida y de la energía de entrada. La traza de salida es una suma sin normalizar de las trazas de entrada a lo largo de la trayectoria de interés y en exploración sísmica se conoce como apilado de trazas o stack:

$$CC = \sum_{k=-(N/2)}^{k+(N/2)} \sum_{p=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-p} f_{i,j} f_{i+p,j(i+p)}$$

$$CC = \frac{1}{2} \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \left\{ \sum_{i=1}^M f_{i,j}(t) \right\}^2 - \sum_{i=1}^M f_{i,j}^2(t) \quad (17)$$

donde:

$$S(t) = \left[\sum_{i=1}^M f_{i,j}(t) \right]^2 \quad \text{es la energía de salida o apilamiento.}$$

$$\sum_{i=1}^M f_{i,j}^2 \quad \text{es la energía de entrada.}$$

La suma de croscorrelación tiene como característica que tiende a enfatizar fuertes eventos de reflexión y a suprimir los débiles. No es sensitiva al cambio de polaridad por el exponente al cuadrado.

2.6.2 SUMA DE CROSCORRELACION NORMALIZADA

La normalización de croscorelación es también ampliamente usada como medida de coherencia (Neidell y Taner, 1971) distinguen que en la filosofía del diseño entre una medición con fundamentos físicos y otra por mediciones de inferencias estadísticas, la diferencia se expresa en términos de los procedimientos de normalización de las funciones de croscorelación. Si se normaliza respecto a una traza se refuerza la señal de las reflexiones débiles.

La ecuación (16) puede ser normalizada de acuerdo a la siguiente relación:

$$NCC = \frac{2}{(M-1)M} \frac{\sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \sum_{p=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{M-p} f_{i,j}(t) f_{i+p,j}(t+p)}{\sqrt{\sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} f_{i,j}^2(t) \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} f_{i+p,j}^2(t+p)}} \quad (18)$$

Computacionalmente requiere de $M(M+1)(N+1)/2$ multiplicaciones dentro de la ventana de análisis. Esta proceso de normalización no es sensible a los cambios de amplitud RMS de traza a traza.

En notación estadística esta expresión se relaciona como:

$$NCC = \frac{2}{(M-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j>i} \frac{R_{ij}(0)}{(R_{ii}(0) R_{jj}(0))^{1/2}} \quad (19)$$

donde:

$$R_{ij}(0) = \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} f_{ij}(t) f_{ij}(t) \quad \text{es la croscorelación entre la } i\text{-ésima traza y la } j\text{-ésima traza.}$$

$$R_{ii}(0) = \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} f_{ij}^2(t) \quad \text{es la autocorelación dela } i\text{-ésima traza.}$$

Se puede desarrollar una normalización alternativa en función del contenido de energía:

$$NCC = \frac{\frac{1}{N+1} \frac{2}{M(M-1)} \frac{1}{2} \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \left\{ \left[\sum_{i=1}^M f_{ij}(t) \right]^2 - \sum_{i=1}^M f_{ij}^2 \right\}}{\frac{1}{N+1} \frac{1}{M} \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \sum_{i=1}^M f_{ij}^2}$$

$$NCC = \frac{\sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \left\{ \left[\sum_{i=1}^M f_{ij}(t) \right]^2 - \sum_{i=1}^M f_{ij}^2 \right\}}{(M-1) \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \sum_{i=1}^M f_{ij}^2}, \quad (20)$$

Computacionalmente, esta expresión requiere solamente $(M+1)(N+1)$ multiplicaciones para operar sobre la ventana de análisis. Considerando la normalización por relaciones de energía, esta medida de coherencia es muy sensible a los cambios de amplitudes RMS de traza a traza.

En notación estadística esta expresión está dada por:

$$NCC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M R_{ij}(0)}{(M-1) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M R_{ij}(0)}, \quad (21)$$

Esta expresión es una normalización de energías por medio de sumas de croscorrelaciones y autocorrelaciones.

La normalización estadística varía en el rango de $-1 < S < 1$.

Robinson y Treitel, 1980, emplean esta normalización estadística con funciones de autocorrelación y croscorrelación que no son sensibles a las variaciones de amplitud entre los canales.

La normalización de energía es preferida a la normalización estadística debido a su poder de controlar las variaciones de amplitud en las trazas de entrada, así como su superioridad computacional. El proceso de croscorrelación normalizada tiende a enfatizar señales débiles más que

la normalización de suma de amplitudes. Las funciones de crosocorrelación podrían ser o no sensitivas al cambio de amplitudes en trayectorias de tiempo, esta sensibilidad depende del procedimiento de normalización.

2.7 COHERENCIA BASADA EN LA SEMBLANZA

Otra cantidad útil para mediciones de coherencia multicanal es el concepto de semblanza, que tiene analogía con la coherencia multicanal, pero con la característica de aplicarse en ventanas variables en tiempo donde es posible conocer la continuidad que presenta un evento sísmico en tiempo y espacio. Existen diferentes métodos y fórmulas para la aplicación de semblanza.

Cuando se ha utilizado alguna medida de coherencia multicanal y se ha identificado alguna trayectoria de señal, el siguiente proceso es la extracción o el realzado de esta señal. Una simple composición de sumatoria a lo largo de esta trayectoria es empleado como una técnica para enfatizar la señal. Una cantidad física de gran importancia para este propósito es la relación de energías de salida/entrada. El coeficiente de semblanza es definido como la normalización de la relación de energía, donde la traza de salida es una simple composición de la suma de las trazas de entrada.

En la aplicación de diferentes algoritmos, los valores calculados por semblanza han demostrado que es una herramienta poderosa en el reconocimiento de señales. Cuando el valor es grande, existe un evento coherente, también la magnitud de la semblanza es muy sensible a la amplitud del evento. Los eventos con buena relación señal-ruido, presentan una magnitud grande de semblanza, y los de baja relación valores pequeños. Precisamente estas propiedades de la semblanza se analizaron en diferentes registros sísmicos y los resultados proporcionaron ideas para implementar nuestro algoritmo de eliminación automática para la distorsión dinámica de amplitudes.

2.7.1 NORMALIZACIÓN DE SEMBLANZA

Siendo una cantidad más significativa que la coherencia multicanal por crosocorrelación normalizada, la semblanza normalizada (Neidell y Taner, 1971) indica la relación de la energía total del apilamiento, en una ventana de longitud t , asociada al período de la señal, con la suma de la energía de las trazas componentes dentro de la misma ventana de tiempo.

En términos matemáticos, S_c , es el coeficiente de semejanza y está relacionado por medio de:

$$S_c = \frac{\sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \left\{ \sum_{i=1}^M f_{ij(i)} \right\}^2}{M \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \sum_{i=1}^M f_{ij(i)}^2} \quad (22)$$

En notación estadística:

$$S_c = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M R_{ij}(0)}{M \sum_{i=1}^M R_{ii}(0)} \quad (23)$$

En la cual la semejanza también es equivalente al retraso cero de la crosscorrelación de la suma de trazas dividida por el retraso cero de la autocorrelación de las trazas componentes:

S_c está relacionada a la crosscorrelación normalizada por $S_c = [(M-1)NCC+1] / M$

Para un modelo lineal simple de señal-ruido, el coeficiente de semejanza puede ser igual a la relación de energía de la señal con la energía total, bajo esta suposición la suma del ruido en todos los canales a cualquier tiempo es cero. Para el j -ésimo incremento de tiempo y en el canal i -ésimo, el modelo es:

$$f_{ij(i)} = S_{j(i)} + n_{i,j(i)} \quad (24)$$

donde $S_{j(i)}$ es la señal y $n_{i,j(i)}$ es el ruido. En términos de la expresión (22) y del modelo (24) tenemos:

$$S_c = \frac{\sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \left[M^2 S_{j(i)}^2 + 2 S_{j(i)} \sum_{i=1}^M n_{i,j(i)} + \left(\sum_{i=1}^M n_{i,j(i)} \right)^2 \right]}{M \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \left[M S_{j(i)}^2 + 2 S_{j(i)} \sum_{i=1}^M n_{i,j(i)} + \sum_{i=1}^M n_{i,j(i)}^2 \right]}$$

$$S_c = \frac{M \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} S_{j(i)}^2}{M \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} S_{j(i)}^2 + \sum_{j=k-(N/2)}^{k+(N/2)} \sum_{i=1}^M n_{i,j(i)}^2} \quad (25)$$

El segundo y tercer término en el numerador y segundo término del denominador son igual a cero. La ecuación (25) es precisamente la relación de energía de la señal de entrada a la energía total sobre la ventana de tiempo seleccionada.

La energía de semblanza tiende a proporcionar alta resolución para eventos fuertes en contraste con el criterio de la suma de amplitudes.

El proceso de normalización de energía de semblanza produce mayor sensibilidad a las diferencias de amplitud en los diferentes datos multicanales, razón por la cual se consideró como una posible solución en la programación del borrado automático con gran éxito.

En general, las medidas de coherencia expresan en forma cuantitativa la semejanza de los datos contenidos entre los diferentes canales de grabación. Por este hecho y en relación con determinados criterios de energía, estadísticos, etc., es posible complementar los criterios cualitativos basados en la habilidad de interpretación del geofísico.

APLICACIONES DE RELACIONES DE ENERGÍA EN REGISTROS SÍSMICOS

3.1 MÉTODO DEL PUNTO DE REFLEJO COMÚN

La adquisición de datos sísmicos se realiza en coordenadas de fuente receptor (s, r). Después de las primeras etapas preliminares del procesamiento de señales: demultiplexado, eliminación de ruidos, recuperación de amplitudes, etc., el procesamiento continua con la reagrupación a coordenadas de punto medio común-offset (m, h). A este arreglo generalmente se le conoce como ordenamiento en familias de punto de reflejo común (PRC)¹ y representa la geometría de los tendidos de adquisición empleados en campo con el método del PRC. La fig.3.1 es un esquema de referencia para las coordenadas.

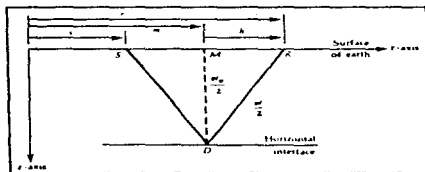


Figura 3.1
Esquema del punto de reflejo común PRC y las
coordenadas utilizadas en la adquisición de datos
sísmicos para una trayectoria típica SDR. M es el punto
medio común.
Robinson, E. A., 1980.

El método PRC es una técnica que consiste en detectar el mismo punto del subsuelo varias veces, con el objetivo de obtener multiplicidad de datos y diferencias en las distancias de grabación (fuente-receptor). Con este método se emplean varias trayectorias para obtener un punto medio común de reflejo en el subsuelo, como se muestra en la fig.3.2 Cada una de las trayectorias de cada registro se refleja en el mismo punto del subsuelo, y es grabada por diferentes trazas; este conjunto de trazas es el punto medio común o en forma generalizada es el PRC.

1 También conocido como: "Common Depth Point" o CDP

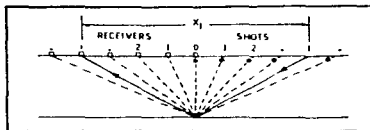


Figura 3.2
Modelo de punto de reflejo común
 (Common Depth Point)
 Schneider y Backus, 1968.

Después de obtener las trazas sísmicas en arreglos de PRC es necesario hacer ajustes en tiempo por correcciones estáticas y dinámicas junto con otros procesos, de esta manera, las trazas del mismo PRC pueden ser sumadas (apiladas) para generar una sola traza por PRC y su característica es que la señal coherente se conserva por estar en fase mientras el ruido aleatorio se elimina. Cuando se apila una gran cantidad de trazas es posible obtener una imagen preliminar del subsuelo.

La cobertura del subsuelo para cada disparo, es la mitad de la longitud del tendido. El procedimiento para obtener la cantidad de cobertura múltiple en el subsuelo, es considerando que la multiplicidad es el número disponible de trayectorias que tienen un punto de reflejo común y corresponde a la mitad del número de estaciones entre los detectores utilizados en el campo por tendido geométrico. La expresión general para la multiplicidad de cualquier movimiento de tendido es:

$$M = NS / 2n,$$

donde: M Multiplicidad de trayectorias (previamente definida).
 N Número de detectores en el tendido.
 n Número de estaciones que avanza el tendido en la superficie
 S Número de fuentes por tendido. (Mayne, W. H., 1962).

A la distancia entre la fuente y el receptor que capta la energía de reflexión se le denomina *offset* y a la traza sísmica se le conoce como traza fuente-receptor.

3.2 DETERMINACIÓN GEOMÉTRICA DEL NORMAL MOVEOUT (NMO)

Normal Moveout, denotado como NMO o Δt_{NMO} , es la corrección más importante de tiempo. La figura 3.1 representa la geometría de un punto PRC. Con un sólo reflector horizontal. Por simplicidad se asume la velocidad V constante, para poder analizar el tiempo en términos de la longitud de la trayectoria.

Donde $t(x)$ es el tiempo doble de viaje, es el tiempo de viaje en los puntos S a D , D a R . El tiempo sencillo de viaje de S a D es equivalente al de D a R y se representa como $V_t / 2$. El tiempo

doble de viaje al offset cero es el tiempo doble asociado con el punto medio común M ; esto es, el tiempo de M a D y de regreso a M . En la fig. 3.1, el triangulo DMR tiene la relación:

$$\left(\frac{Vt(x)}{2}\right)^2 = \left(\frac{Vt(0)}{2}\right)^2 + h^2 \Rightarrow \left(\frac{t(x)}{2}\right)^2 = \left(\frac{t(0)}{2}\right)^2 + \frac{h^2}{V^2}$$

Esta ecuación esta expresada en tiempos sencillos. Frecuentemente es relacionada con tiempos dobles de viaje para offset X entre fuente-receptor, entonces la trayectoria del tiempo de viaje es:

$$\text{si } h^2 = \left(\frac{x}{2}\right)^2,$$

$$x \quad \text{offset}$$

$$t^2(x) = t(0)^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (26)$$

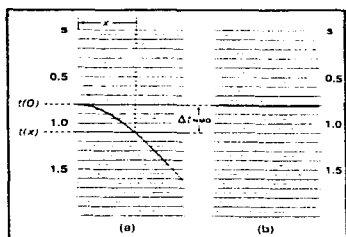


Figura 3.3
a) Muestra el efecto hiperbólico por la relación de offset y
b) al aplicar la corrección NMO, que involucra convertir $t(x)$ con offset diferente de cero a $t(0)$ con offset igual a cero.

Yilmaz, O., 1987.

Si $t(x)$ es el tiempo de viaje a lo largo de la trayectoria entre la posición de fuente receptor, X es el offset (distancia) entre fuente-receptor. V es la velocidad del medio arriba del reflector. La diferencia entre el tiempo asociado a un offset $t(x)$ y el tiempo doble a un offset cero $t(0)$ definen la corrección NMO o de tendido, la relación es:

$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t(0) \quad (27)$$

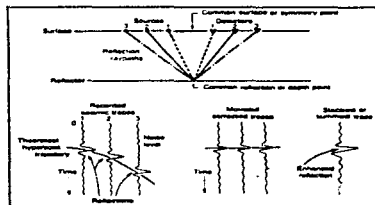


Figura 3.4
Ilustra el método de PRC o CDP que es la base para el análisis de la velocidad sísmica. Para tres trayectorias se muestra el efecto hiperbólico, su corrección de trazas por NMO, y el apilado de las tres trazas para realizar la señal.

World Oil, 1984.

y NMO es el tiempo extra requerido para que el pulso de reflexión de la trayectoria de offset X se transforme en trayectoria de offset cero. Para este modelo tenemos la expresión:

$$\Delta t_{NMO} = t(0) \left\{ \left[1 + \left(\frac{x}{V_{NMO} t(0)} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (28)$$

La fig 3.3 esquematiza los tiempos $t(0)$ y $t(x)$ en su forma hipérbolica y su corrección por Δt_{NMO} para alinear el evento de reflexión. En la figura 3.4 se representa el efecto de la corrección NMO para varias trazas

3.3 USO DE CORRELACION EN CORRECCIONES ESTÁTICAS

Cuando los registros PRC han sido corregidos dinámicamente por NMO (Normal Moveout) y se observa que existen desalineamientos de traza a traza en los reflejos sísmicos, es necesario corregir estas anomalías de tiempo con la aplicación de las correcciones estáticas que harán posible el alineamiento de los reflejos.

Las anomalías temporales son consecuencia de diferentes factores, como son: variaciones en elevación del terreno, espesor y velocidad de la capa intemperizada ("weathered layer") y subintemperizada. Estas correcciones se aplican para compensar por estos efectos con relación a un nivel de referencia. Tales anomalías distorsionan la estructura y estratigrafía presente en el subsuelo, además de que pueden producir pseudo-estructuras que no son reales. Son un factor muy importante que se debe considerar durante el procesado de los datos para obtener una buena interpretación sísmica.. En la fig 3.5 se observa el efecto de estas distorsiones en tiempo.

La corrección estática considera un modelo donde los principales efectos que causan las variaciones en los tiempos de reflexión han sido eliminados. Determina los tiempos de reflexión que hubieran sido observados si todas las medidas hubieran sido tomadas a un nivel de referencia plano sin material intemperizado o de baja velocidad.

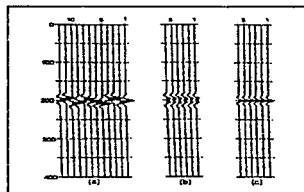


Figura 3.5
Distorsión de ondículas
(a) Punto medio común sin estáticas
(b) Trazas apiladas sin correcciones estáticas
(c) Trazas apiladas después de aplicar estáticas.

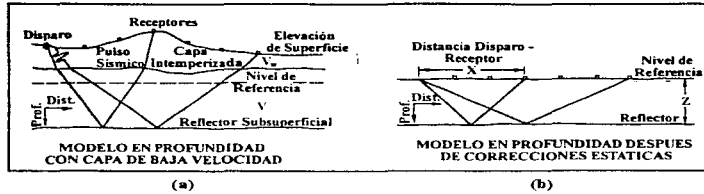


Figura 3.6
 a) Modelo de factores que afectan a las correcciones estáticas.
 b) Modelo con la suposición de las correcciones estáticas.
 Jam et al., 1982

El método consiste en calcular el tiempo vertical a nivel de referencia (tiempo de reemplazo) en las localidades de las fuentes y receptores, entonces la corrección estática aplicada a una traza es la suma o resta de los tiempos de reemplazo de la fuente y receptor asociados a esa traza. El desplazamiento estático constante en tiempo de una traza sísmica resultará en el registro como si las fuentes y receptores hubieran sido desplazados verticalmente al nivel de referencia. La fig.3.6 representa el modelo para el calculo de correcciones estáticas

Las correcciones estáticas se dividen en tres grupos principales: estáticas de campo, estáticas de refracción y estáticas residuales. Las estáticas de campo determinan el tiempo de retardo empleando tiempos verticales de pozo, velocidad de la capa subintemperizada y en ocasiones el espesor y velocidad de la capa de intemperismo. Existen dos etapas de correcciones: a nivel de disparo y de éste, a nivel de referencia. Las estáticas de refracción determinan el espesor de la capa de intemperismo y la velocidad de la capa subintemperizada. Son estáticas de periodo largo.

Las estáticas residuales emplean tiempos de reflexión para corregir estáticas de período corto por las diferencias en tiempo de reflexión y no en relación en tiempos absolutos como lo es el primer grupo mencionado. Compensan por variaciones de velocidad y espesor de las capas someras, alinean reflexiones primarias en las trazas de familiar de PRC. El método consiste en corregir por NMO, determinación de tiempos residuales y descomposición por métodos de croscorelación.

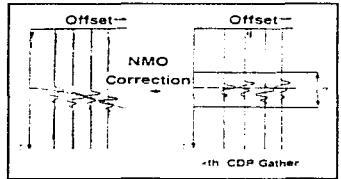


Figura 3.7
 Muestra que al corregir los datos por NMO existen desplazamientos en tiempo entre las diferentes trazas, este efecto se corrige por aplicar las correcciones estáticas.
 Yilmaz, O., 1987.

3.3.1 CORRELACION EN ESTATICAS RESIDUALES

En este tipo de correcciones se hace uso de técnicas de correlación con el objetivo de encontrar el tiempo óptimo para corregir por los efectos de variaciones de la velocidad y espesor de las capas someras asociadas a efectos de intemperismo. Normalmente cuando se aplican las correcciones estáticas de campo y dinámicas (NMO) no es posible obtener un alineamiento perfecto de las trazas. La obtención de datos con la técnica del PRC proporciona redundancia de información que permite el análisis estadístico de diferencias de tiempo para la solución del problema de estáticas. Así como se ve en la fig.3.7 Es necesario que antes de apilar las trazas, esta pequeña variación sea corregida.

Estas correcciones se deben aplicar antes de apilar las trazas de un mismo punto de reflejo común para obtener el máximo apilado de ellas. Se seleccionan ventanas en tiempo para su aplicación, considerando el comportamiento estructural que presenten los registros sísmicos.

El método básicamente consiste en analizar las trazas de un registro de PRC, para obtener como primer paso una traza promedio con la mezcla de todas las trazas o una traza central con un determinado porcentaje en relación a las trazas restantes. Esta traza promedio se correlaciona al ir desplazando la traza patrón respecto a la otra traza, se obtienen valores individuales de la correlación y el tiempo que tenga el máximo valor de correlación se fija como la correlación estática residual de esa traza. Este procedimiento se realiza para todas las agrupaciones de trazas en PRC.

La función de correlación cruzada en la práctica se obtiene realizando pequeños desplazamientos en tiempo para evitar correcciones inadecuadas. Valores de corrección en el procesado de datos varían de 12 a 18 [mseg], si la frecuencia de la señal sísmica esta en el rango de entre 20-30 [Hz]. Con estos valores se ha observado que se evitan sobrecorrecciones. El tiempo de desplazamiento "shift", puede ocasionar la eliminación de rasgos estratigráficos, por tanto, este proceso no se recomienda cuando existen fallas o fuertes echados, al menos que se considere la disminución de la tolerancia en la corrección del tiempo residual.

La mayoría de los métodos realizan tres funciones principales: corrección por sobre tiempo normal (NMO), determinación de tiempos residuales; residual de estáticas de fuente y receptor, residual de estructura o buzamiento, residual de sobretiempos normal. En la selección de ventana de correlación (long. h, fig 3.7) se deben considerar la influencia de la relación señal-ruido, así como los rasgos estructurales. La ventana debe cubrir una zona de tiempo donde los eventos primarios predominen.

En el cálculo de estáticas residuales la croscorrelación se emplea para estimar tiempos relativos entre trazas. La fórmula general para evaluar los valores de amplitud en la croscorrelación es:

$$C(\tau) = \frac{\sum f_2(t) \cdot f_1(t+\tau)}{(\sum f_2^2 \cdot \sum f_1^2(t))^{1/2}}, \quad (28)$$

donde:

τ : Desplazamiento relativo entre trazas.
 $f_1(t), f_2(t)$: Trazas sísmicas

Al desplazarse una de las trazas sísmicas en relación a la otra se encontrara un valor máximo de correlación τ_m y será el tiempo de desfaseamiento entre ambas trazas que se deberá aplicar para tener la mayor similitud. La forma de interpretación considera que si la traza $f_2(t)$ está en la posición correcta, entonces se deberá aplicar una corrección estática igual a $-\tau_m$ a la traza $f_1(t)$. Se conoce que la máxima amplitud C_m representa una buena medida estadística entre $f_1(t)$ y $f_2(t)$. De diferentes estudios, se sabe que si τ_m es diferente de cero y C_m es igual a uno, entonces las dos trazas son idénticas excepto por un desplazamiento en tiempo. Cuando C_m está en el rango de $0 < C_m < 1.0$, la similitud no es perfecta.

Para evaluar los corrimientos de tiempo se combina el proceso de croscorrelación con el criterio de minimización de energía, y consiste en el planteamiento de:

$$\sum_{11}^{12} [F_1(t+\tau) - F_2(t)]^2 = E^2 \Rightarrow \sum_{11}^{12} F_1^2(t+\tau) - 2 \sum_{11}^{12} F_1(t+\tau) F_2(t) + \sum_{11}^{12} F_2^2(t) = E^2,$$

$$\sum_{11}^{12} [F_1^2(t+\tau) + F_2^2(t)] - 2 \sum_{11}^{12} F_1(t+\tau) F_2(t) = E^2.$$

y se puede concluir que la amplitud más grande de correlación se asocia al mínimo error E. (Fig. 3.8)



Figura 3.8
 Autocorrelación para determinar la amplitud más grande de correlación que se asocia al desplazamiento τ mínimo necesario para alinear el evento de reflexión.

Para ilustrar el procedimiento, consideramos cuatro trazas (Fig. 3.9):

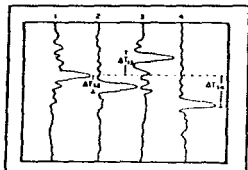


Figura 3.9
Representa la posición de los incrementos en tiempo necesarios para alinear el evento de reflexión.

$$\begin{aligned} \Delta T_{12} &= T_1 - T_2 & \Delta T_{21} &= T_2 - T_1 \\ \Delta T_{13} &= T_1 - T_3 & \Delta T_{23} &= T_2 - T_3 \dots, \text{etc.} \\ \Delta T_{14} &= T_1 - T_4 & \Delta T_{24} &= T_2 - T_4 \end{aligned}$$

$$\Delta T_{ij} = T_i - T_j \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta T_{12} \\ \Delta T_{13} \\ \Delta T_{14} \\ \Delta T_{23} \\ \Delta T_{24} \\ \Delta T_{34} \end{bmatrix}$$

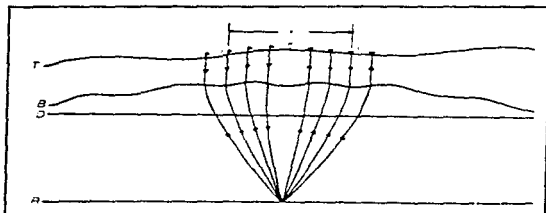


Figura 3.10
Modelo de estáticas consistente con la superficie, donde T es la topografía del terreno, B es la base de la capa interperisismo, D datum al cual se efectúan las correcciones estáticas, R es el receptor, J el índice de estación de disparo, i es el índice de la estación del receptor, k la localización del punto medio, Xi j offset entre fuente-receptor.
Yilmaz, O., 1987.

La solución es por mínimos cuadrados es de la forma:

$$A^T AX = A^T b \quad \text{Ec. normales,}$$

Resolviendo el sistema se encontrara el mínimo corrimiento constante de tiempo necesario que alineará el evento. Generalizando para cualquier número de trazas:

$$T_n = \sum_{m=1}^N \Delta T_{m,n} \quad (30)$$

Lo único que requerimos es calcular las cros correlaciones.

3.3.2 CORRELACIÓN EN ESTÁTICAS CONSISTENTES CON LA SUPERFICIE

Las estáticas residuales basadas en el método de correlación (Wiggins, et al., 1976) tienen un amplio concepto geofísico, generalmente la determinación por medio de un algoritmo automático se basa en un modelo consistente con la superficie. La fig. 3.10 representa los elementos asociados y la ecuación que define un modelo de tiempos residuales es:

$$S_j + R_i + G_{kh} + M_{kh} X_{ij}^2 = T_{ijh} \quad (31)$$

el tiempo T_{ijh} es el tiempo doble de la traza "i, j" al horizonte h, S_j es el tiempo residual asociado a la posición de la fuente j, R_i es el tiempo residual asociado al receptor i, k índice de la localización del punto medio $k = (i+j)/2$, G_{kh} se asocia a los cambios de tiempo debidos a la posición de la estructura geológica la diferencia de tiempos dobles entre un PMCref y el PMCK al horizonte h. $M_{kh} X_{ij}^2$ es la corrección dinámica residual asociada al horizonte h.

Este modelo considera dos suposiciones: las estáticas residuales sólo dependen de la posición en superficie de la fuente y el detector, y de que las trayectorias de los rayos en la capa intemperizada son verticales. La solución a esta ecuación se basa en criterios de minimización de energía en función de correlaciones cruzadas asociadas con el método de mínimos cuadrados.

Se debe minimizar la energía como:

$$E = \sum_{\psi} (t_{\psi} - t'_{\psi})^2 \quad (32)$$

donde t_{ψ} Tiempos calculados.
 t'_{ψ} Tiempos observados.

Las etapas en la solución del problema son:

- Estimación de T_{gh}
- Descomposición de T_{gh} en sus componentes individuales.
- Aplicación de los términos S , y R , estimados a los registros PMC antes de NMO.

De acuerdo a lo anterior, el proceso consiste en sustituir (31) en (32) y minimizar la energía del error E con respecto a cada uno de los parámetros:

$$\frac{\partial E}{\partial S_1} = \frac{\partial E}{\partial R_i} = \frac{\partial E}{\partial G_i} = \frac{\partial E}{\partial M_k} = 0 \quad (33)$$

3.4 USO DE SEMBLANZA EN ANÁLISIS AUTOMÁTICO DE VELOCIDAD

La velocidad es la variable más importante en la prospección sísmica. El conocimiento apropiado de la velocidad permite calcular la posición de los reflectores a partir de los tiempos de viaje registrados. La velocidad puede ser determinada a partir de medidas sísmicas de las variaciones del tiempo de arribo y el offset. Las medidas de velocidad están basadas en el modelo simple para un reflector horizontal. (ver ec. (26)).

El procedimiento para determinar los valores de velocidad V (de apilamiento) para cada tiempo vertical t_0 está basado en medidas de energía por coherencia y semblanza (vistas en el capítulo 2). La similaridad de traza en un PRC puede ser usada como una medida de coherencia. Recordando que si $f_{i(t)}$ es la amplitud de la traza individual i al tiempo t y si existen M trazas en el registro de PRC, i varía de 1 a M y se supone que el tiempo t sigue alguna trayectoria. En el análisis de velocidad esta trayectoria corresponde a una hipérbola para algún valor particular de V . La trayectoria al tiempo t depende del índice de la traza i .

La amplitud del apilado de la trayectoria está dada por $\sum f_{i(t)}$ donde la suma es sobre $i = 1, 2, \dots, M$. El cuadrado es la energía instantánea de la suma para la trayectoria en particular. La energía instantánea para cada traza de la trayectoria es $f_{i(t)}^2$ y de las trazas de entrada es $\sum f_{i(t)}^2$, la relación de la trayectoria E_i es:

$$E_i = \frac{\text{energía instantánea de la traza}}{\text{energía instantánea de la entrada}} = \frac{(\sum_{i=1}^M f_{i(t)})^2}{M \sum_{i=1}^M f_{i(t)}^2}$$

La idea esencial del análisis automático de velocidad consiste en aprovechar la relación señal-ruido obtenido por el método de PRC y las trayectorias hiperbólicas que presentan los eventos de reflexión. Se han implementado técnicas digitales que en forma automática reconocen las trayectorias hiperbólicas en función de la energía cuantificada por las semblanzas.

El método de (Taner y Koheler, 1969) implementa el uso del principio de una técnica de correlación dentro de un agrupamiento de trazas sísmicas PRC, también usan este principio en su análisis de velocidades.

El método por espectro de velocidad (Taner y Koheler, 1969), emplea la técnica de correlación mostrada en la fig. 3.11. Donde se mide la semblanza para las traza de entrada x_1, x_2, \dots, x_n , de un PRC. Las cuales contienen información redundante y por lo que es posible estimar alguna cantidad de energía que la represente (Schneider y Backus, 1968). Las reflexiones provenientes de algún punto de reflejo común aparecen como una trayectoria hiperbólica.

De la fig.3.11, se puede observar la energía de reflexión como una función de dos variables, tiempo-distancia. Es posible modelar matemáticamente este comportamiento de la energía de reflexión en ese dominio por medio de trayectorias hiperbólicas. Así mismo, es posible desplegar esta energía de reflexión en un dominio más conveniente para su interpretación el de tiempo de incidencia normal-velocidad R.M.S. De esta manera se pueden elegir los pares de puntos que forman una función de velocidad para corregir por NMO.

Para este objetivo, Taner y Koheler (1969) diseñan un filtro multicanal de semblanza normalizada y mide la energía de la señal común presente sobre todos los canales asociados a trazas sísmicas, de acuerdo a algún patrón especificado de retraso. En la fig.3.12, se presenta una forma esquemática. Se describe en el Apéndice I.

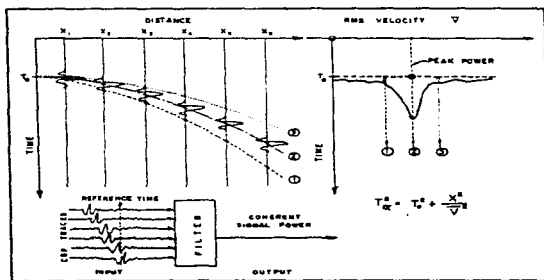


Figura 3.11
Representa un esquema de un PRC para la búsqueda de velocidades. La trayectoria 2 presenta el máximo de semblanza asociado a la mayor energía. Taner y Koheler, 1969.

Después del alineamiento de los datos de entrada respecto a un patrón hiperbólico de retraso suministrado, un filtro digital es calculado para cada traza en la que en forma automática se selecciona el evento común a todas ellas. Posteriormente se apilan para dar una mejor estimación de la señal de entrada, en este proceso se asocia un valor máximo de semblanza, esta trayectoria representa la función del mejor evento de reflexión. La estimación es calculada por una relación en la suma de los valores de amplitud elevados al cuadrado dentro de una ventana de tiempo alrededor de del tiempo de referencia y su relación de energía es entonces mostrada en el desplegado del espectro de velocidades.

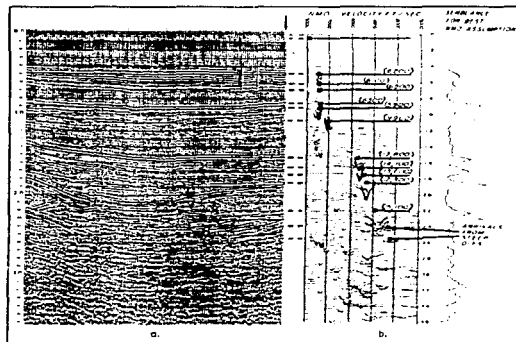


Figura 3.12
Espectro de velocidad y su interpretación

Sucesivamente cada traza es desplazada una cantidad correspondiente a la distancia x , pasada al filtro de semblanza y entonces la energía es desplegada con relación a su correspondiente $t(0)$ y V_n como se muestra en la fig.3.11. El pico en el espectro indica el arribo de energía de reflexión asociada con coordenadas $(t(0), V_n)$.

El espectro es calculado sobre el traslapamiento de las trayectorias de tiempo para intervalos de velocidad muy cerrados, el desplegado final contiene los resultados del análisis de todos las reflexiones, primarias, múltiples, y otros tipos de energía coherente.

El espectro de energía para el análisis de velocidad representa la búsqueda para todas las velocidades con tiempo constante de incidencia normal. En el espectro se representa como una sucesión de curvas o trazas a determinados tiempos de reflexión. En cada tiempo, las curvas representan las sumas de los valores de correlación entre trazas a los diferentes valores de velocidad seleccionada. La función de de semblanza es normalizada para darle una presentación gráfica adecuada. La fig. 3.12 muestra el espectro y su interpretación.

El espectro de velocidades es una herramienta poderosa para la identificación de reflexiones primarias y velocidades de apilamiento. Información importante de litología puede ser obtenida mediante un estudio cuidadoso de este espectro.

3.5 APLICACIÓN DE COHERENCIA EN DISEÑOS DE FILTROS

3.5.1 FILTRO LOCAL POR COHERENCIA

El filtrado multicanal considera la información coherente que puede estar presente en determinada cantidad de trazas sísmicas. Se diseña y aplica en diferentes formas según el tipo de ruido coherente que se deba eliminar o bien el realce de la señal coherente. Se aprovecha la característica lineal que presenta el ruido coherente para poder seguirse en una cantidad determinada de trazas. En los registros sísmicos se pueden observar como energía que viaja en forma horizontal y energía que llega al tendido más o menos verticalmente. El ruido coherente incluye ondas superficiales, refracciones, ruido causado por motores, etc.; todo el que describe alguna forma definida de propagación.

Si el ruido tiene energía diferente de la señal, el filtrado de frecuencia se utiliza adecuadamente. Si se traslapan con el contenido de frecuencia de la señal útil el filtrado por frecuencia es limitado. Por lo tanto, en el diseño de técnicas digitales de filtrado es importante considerar tres propiedades importantes: coherencia, dirección de viaje y repetibilidad.

La metodología para un filtro de coherencia local (Houston L.M. y Potter J.R., 1992), es relativamente simple. Después de que los datos han sido corregidos por NMO, y sobre una ventana determinada de tiempo se considera que el ruido coherente ha sido alineado, puede ser altamente correlacionable y puede diferenciarse de la señal útil. Un conjunto de trazas consecutivas se separan para delimitan pequeñas ventanas en tiempo. En cada una de estas ventanas se calcula una

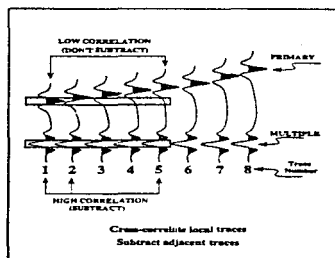


Figura 3.13
Esquema que muestra los principios
básicos de un filtro de coherencia local.
Houston y Potter, 1992.

crosscorrelación normalizada. La fig. 3.13 muestra los elementos de un filtro de coherencia local. El coeficiente de correlación C_k , efectúa una estimación dentro de las ventanas de la existencia de ruido coherente o de señal. Una vez establecido los valores de C_k , se relaciona con una función θ que auxilia el límite de discriminación para la señal-ruido. Si el valor de correlación está por arriba de un criterio de discriminación o umbral, las trazas asociadas al ruido son eliminadas en la ventana considerada. Si la correlación está por debajo de ese criterio no se elimina la señal. La función θ relaciona estos criterios. Mientras la crosscorrelación se calcula con trazas cercanas pero no necesariamente consecutivas (p.ejemp. traza 1 y traza 5), la función θ es ejecutada con trazas continuas (p. ejem. traza 1 y traza 2). Estas características de discriminación del filtro permiten que la intensidad de la atenuación se pueda maximizar.

Existen dos consideraciones básicas: una es que la señal y el ruido tienen diferentes velocidades aparentes en el espacio $t-x$, y puede permitir su respectiva separación, la otra implica que la energía sísmica coherente varía suavemente, y considera la hipótesis de que las señales en canales consecutivos son extremadamente similares o coherentes (Wang, 1990).

El proceso puede ser descrito con las siguientes ecuaciones que describen la notación de la traza sísmica:

$Z_j(t)$ es la amplitud de la traza j en el tiempo t .

Si los datos tienen la corrección NMO, se alinea el ruido coherente, el filtro de coherencia local tiene como expresión:

$$Z_j(t) = Z_j(t) - \theta (C_k - C_T) Z_{j+1}(t) , \quad (34)$$

donde θ es la función de discriminación. C_k es el término de crosscorrelación en la ventana de tiempo; es el número de medidas de similitud de señales cercanas sobre una determinada ventana. C_T es la correlación del umbral (Threshold), indica la presencia de ruido coherente local. C_k es determinado sobre ventanas en tiempo que no se traslapan (t_1 a t_2 , t_2 a t_3 , etc.):

$$C_k = \frac{2 \sum_{t=t_1}^{t_2} Z_j(t) Z_{j+m}(t)}{\sum_{t=t_1}^{t_2} Z_j^2(t) + \sum_{t=t_1}^{t_2} Z_{j+m}^2(t)} . \quad (35)$$

El índice de la traza m es un entero tal que j y $j+m$ indican trazas no cercanas, pero si trazas en una localidad. Los valores de m dependen de los datos.

La función θ esta definida por:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

el rango de C_k esta dado por $-1 \leq C_k \leq 1$

3.5.2 FILTRO DE SEMBLANZA DIRECCIONADO

La aplicación y el diseño (Reiter, et al, 1993) de filtro de coherencia considera en términos generales dos pasos, el primero inicia con una estimación de dirección de viaje (buzamiento) entre trazas sísmicas y la segunda la determinación estadística de valores que puedan substituir el valor identificado como señal o ruido (para realizarlo o suprimirlo) por el valor original.

El número de trazas consideradas establecen la ventana simétrica de apertura del filtro, que selecciona cada traza a ser filtrada y el filtro es aplicado para cada muestra. La manera de identificar el buzamiento de la trayectoria asociada a la señal, es por medio de efectuar un barrido en un rango de Moveouts dentro del límite asociado a esa pendiente.

Como medida de energía para la identificación de esta trayectoria se utiliza el criterio de semblanza para cuantificarla y se selecciona la que coincida con el valor máximo de semblanza. Este tipo de análisis es similar al propuesto por la técnica de Taner y Koheler, (1969).

Los valores a lo largo de esta trayectoria identificada por semblanza y asociada a la energía máxima se relaciona con un filtro estadístico en función de la mediana, se sortean los valores de menor a mayor, se selecciona el valor medio y lo reemplaza por el valor original. la salida del filtro es por tanto, insensible a las altas amplitudes asociadas al ruido. También puede suprimirse energía incoherente que este fuera de la trayectoria del evento en función de las medidas máximas de semblanza.

3.5.2.1 ESTRUCTURA DEL FILTRO DE SEMBLANZA DIRECCIONADO

La estructura del filtro de semblanza se ilustra en la fig. 3.14. La entrada del filtro requiere un conjunto de trazas M centradas alrededor de la traza a ser filtrada. Si se proporciona un valor de M impar, las trazas son simétricas respecto a la traza a ser filtrada. Un rango de velocidades limitan el conjunto de trayectorias que serán analizadas por el filtro, son definidas por un rango de velocidad mínima V_{\min} y velocidad máxima V_{\max} , y definen un filtro de paso de banda.

La ecuación de semblanza (ver ec. 36) es calculada para un conjunto de trayectorias N_p regularmente espaciadas dentro de la zona de paso de banda para una ventana de muestras alrededor de la traza central y donde es localizado el máximo de semblanza se designa como la

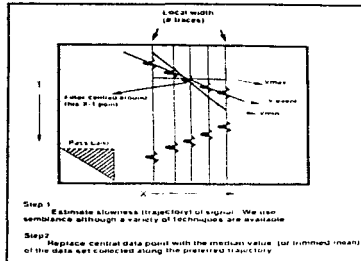


Figura 3.14
 Ilustra la estructura de un filtro mediano guiado por semejanza. La entrada al filtro consiste de un conjunto de trazas locales centradas alrededor de la traza a ser filtrada. Una trayectoria pasabanda es seleccionada y la semejanza se calcula dentro de la ventana de paso de banda. Un filtro mediano es aplicado a las trayectorias donde el máximo de semejanza fue localizado.

Reiter et al, 1993.

velocidad del evento V_{even} . Los datos muestreados a lo largo de la trayectoria definida por la V_{even} , entran a un filtro estadístico por mediana, el cual regresa el valor mediano.

Como un resultado, las señales coherentes dentro de esta ventana son enfatizados, mientras aquellos con trayectoria fuera de la ventana son suprimidas. Entonces el filtro es desplazado a la siguiente muestra en tiempo de la misma traza, se posiciona la traza central a ser filtrada y se rearreglan las muestras de las demás trazas.

La estimación de señales relacionadas con trayectorias representan los primeros pasos del diseño de filtros por coherencia. Implementación de semejanza es uno de muchos posibles métodos para la estimación de velocidades. Reiter, Toksoz, Purdy, 1993, hacen uso de semejanza por medio de:

$$P_{\text{even}}(X_k, T_j) = \max_{i=1}^{N_p} \left\{ \frac{\sum_{k=1}^M \phi(X_k, T_j + P_i X_k)^2}{M \sum_{k=1}^M \phi^2(X_k, T_j + P_i X_k)} \right\}. \quad (36)$$

La traza sísmica se representa por $\phi(X_k, T_j)$ siendo X_k una localización discreta del receptor y T_j una muestra discreta en tiempo. La ecuación (36) es evaluada para N_p trayectorias P_i , P_{even} es la trayectoria seleccionada con la máximo valor de semejanza.

Después que ha sido determinada una trayectoria preferente del evento, el filtro mediano es aplicado a lo largo de la trayectoria. En la práctica, los datos son muestreados en tiempo, y una interpolación entre las muestras en tiempo es necesario para calcular el valor de semejanza y el filtro mediano.

La selección de parámetros como el ancho de apertura del filtro M depende del muestreo espacial y temporal de los datos de entrada y de las características del ruido a ser suprimido. El filtro mediano se define como el punto medio de un reordenamiento de datos ordenados de menor a mayor:

$$S_{\text{median}} = S((M-1) / 2 + 1),$$

donde $S(1) < S(2) < S(3), \dots, S(M)$ representa el sorteo de los datos.

Una alternativa es el operador "alpha-trimmed mean" (Watt y Bednar, 1983). Tiene la ventaja que el usuario especifica el rechazo de determinado número de trazas, y puede calcular el valor medio de las demás trazas, para posteriormente sustituir las trazas rechazadas por el promedio calculado.

3.6 SUMATORIA DE AMPLITUDES PARA SUPRESIÓN DE RUIDOS

Básicamente las trazas sísmicas están compuestas de información y ruido. En esencia, el ruido oscurece la información y complica el procesamiento y la interpretación de las trazas sísmicas.

Existen diferentes técnicas estadísticas para la supresión de ruido que se identifica por tener altas energías (Shon y Yamamoto, 1992), la interpretación de la máxima desviación estándar así como de la varianza de la traza sísmica, pueden ser usados como criterios para decidir el valor de umbral máximo a partir del cual se deba suprimir la energía asociada al ruido. Estos criterios son usados para realzar la relación de señal a ruido (S/N).

El método estadístico conocido como "trimmed mean stack" es una técnica (Haldorsen y Farmer, 1989) que utiliza un determinado número de trazas y permite eliminar algunas de estas trazas asociadas a la energía del ruido, calcula el valor medio y substituye estas trazas por este valor. Este procedimiento produce secciones apiladas sin las altas amplitudes contaminadas de la energía del ruido.

La eliminación de ruido por algoritmos automáticos (Pokhriyal, et al, 1993) consideran la interpretación estadística de la media en relación a los máximos valores de amplitud contenidos en una ventana en tiempo. Realiza los cálculos sobre las muestras de la traza sísmica, identifica el valor máximo de amplitud, así como de su correspondiente valor promedio.

3.6.1 SUPRESIÓN AUTOMÁTICA DE ALTA ENERGÍA USANDO PROCEDIMIENTOS DE SUMA (STACK)

El proceso de apilamiento (stack) de grupos de PRC generalmente suprime determinados tipos de ruido, sin embargo, cuando los ruidos presentan determinado buzamiento, son transitorios y aparecen como impulsos de altas frecuencias o el ruido aleatorio se hace predominante, este proceso no los puede suprimir. Los eventos de alta energía aparecen en los registros cuando la señal es débil y se observan en los registros sísmicos como eventos lineales con buzamiento, o también como secuencias de impulsos.

Los impulsos contenidos en registros de PRC pueden aparecer como energía fuertemente coherente en la sección sísmica apilada.

Para su eliminación Naess (1979), utiliza un proceso interactivo llamado "superstack". Primero calcula promedios separados de muestras positivas y negativas, después las muestras mayores de estos promedios son reemplazadas por los promedios, estos valores son usados para el proceso de apilado.

Doyle et al., (1985) y Lynn et al., (1987) implementan el apilado diversificado ("diversity stack") que reduce significativamente el efecto de la interferencia del ruido. En el apilado diversificado los valores de las muestras son pesadas por el inverso de la atenuación de energía de cada traza. Este proceso incluye una versión escalada de muestras de alta amplitud.

El proceso de "trimmed mean stack" fue originalmente propuesto por Watt y Bednar (1983). Es robusto y al mismo tiempo es un algoritmo muy simple. Se especifica un porcentaje de valores extremos ha ser rechazados antes de su promediado.

El apilado de familias de PRC da una estimación de la media en la distribución de los valores de las muestras, después de la aplicación de las correcciones estáticas y dinámicas. La fórmula convencional es:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i , \quad (37)$$

donde M es el valor de apilado en un tiempo en particular, S_i es el valor de muestra corregida y N es el número total de muestras. Asume que se han ordenado todas las muestras de menor a mayor, los valores extremos están asociados a las muestras más pequeñas y más grandes respectivamente. Si no se incluyen en el proceso del promedio, no afecta el cálculo del valor M , para distribuciones simétricas o normales.

La estimación de la media, derivada de una distribución cortada (trimmed) es llamada "trimmed mean" o "alpha-trimmed mean" y el proceso de apilado se llama "trimmed mean stack" y se representa como:

$$\text{TRIMMED MEAN} = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k/2+1}^{N-k/2} S_i \quad , \quad (38)$$

donde k , es el número de muestras rechazadas, $k/2$ sobre cualquier lado de la distribución. S_i son las muestras ordenadas en valores ascendentes. La sensibilidad del proceso depende de la relación de muestras contaminadas con ruido.

Una vez de aplicado el método existen relaciones para medir el ancho de la distribución del ruido, como la desviación estándar σ_{nc} sin contaminación de ruido:

$$\sigma_{nc} = \frac{\sigma_a}{\sqrt{N}} \quad , \quad (39)$$

donde N representa el apilamiento o numero de trazas y a la desviación estándar de nivel de ruido ambiental.

Los algoritmos automáticos de supresión de ruido (Shon y Yamamoto, 1992), deben considerar la aplicación de umbrales o criterios estadísticos para seleccionar puntos a partir de los cuales se deba suprimir la energía asociada al ruido.

El método de umbral " threshold method" considera que debajo de un umbral especificado, los datos son borrados, y arriba de ese umbral los datos no son afectados, esto es:

$$x_i = \begin{cases} x_i & \text{si } |x_i| \geq k \cdot |A| \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad ,$$

donde A es la máxima amplitud en la traza, y k es el nivel de umbral dentro del rango $0 \leq k \leq 1$. Para muchas interpretaciones geológicas los datos por debajo de un cierto nivel de amplitudes no son necesarias, entonces un filtro de umbral aplicado apropiadamente preserva la señal con información, mientras remueve los datos asociados con ruido. Si la energía es definida como :

$$E = \sum (x_i)^2 \quad , \quad (41)$$

donde x_i valor de amplitud

Se pueden considerar y evaluar relaciones de los datos con su energía respecto a una escala del umbral. Este comportamiento se relaciona de manera gráfica para ver el porcentaje óptimo de los datos al ser rechazados o admitidos.

Para encontrar un umbral apropiado, el criterio de máxima desviación estándar puede ser usado. La desviación estándar es calculada usando las amplitudes arriba del nivel de umbral, y su expresión es:

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{(N-1)} \right]^{1/2} \quad (42)$$

donde i es el i -ésimo dato, y N es la longitud de la traza. Así, la desviación estándar es relacionada a la raíz cuadrada del promedio de energía. Encontrando el máximo valor de la desviación estándar, por arriba del nivel de umbral, intercambiando el valor del umbral es similar a la maximización del promedio de energía de la traza sísmica. El propósito es encontrar el nivel de umbral que de la máxima distancia entre la media de los datos y los valores por debajo de este nivel pueden ser borrados para el procesamiento e interpretación de datos.

También se puede usar como criterio de umbral o discriminación el valor de la media y relacionarse a los anteriores y tiene como expresión:

$$\mu = \sum |x_i| / (N-1), \quad (43)$$

donde i es el i -ésimo dato y N es el número de datos por arriba del umbral.

Las figuras 3.15 muestran la aplicación de las relaciones estadísticas como "threshold" en relaciones con amplitudes-energía para determinar la cantidad de datos para su eliminación.

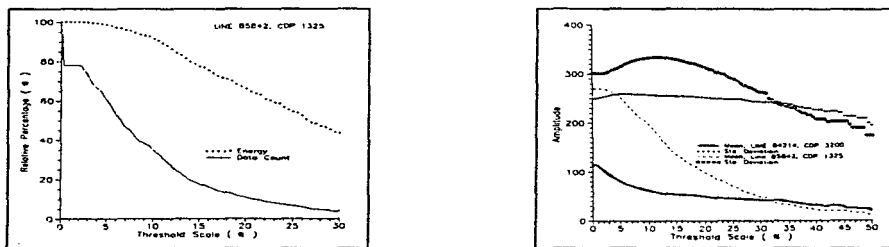


Figura 3.15

Estas figuras muestran que dentro de ciertos niveles, un óptimo umbral puede ser usado sin pérdida de información sísmica. En a) se tiene el contenido de energía y el porcentaje de muestras arriba del umbral seleccionado, para un 30% de muestras le corresponde un umbral del 12% y una energía correspondiente al 90%. En b) se tienen los parámetros estadísticos de las amplitudes contra el umbral, la máxima desviación estándar en el CDP 3200 ocurre a un 5% de la escala del umbral, para el CDP 1325 ocurre al 12% (Shon, 1992).

La calidad de un proceso de datos sísmicos, puede ser medido por la relativa facilidad de su interpretación. La decisión subjetiva del intérprete depende entre otras cosas, de la amplitud relativa y de la continuidad lateral de los eventos sísmicos.

Continuidad lateral es una propiedad que depende de dos dimensiones, mientras la amplitud relativa depende de una o dos dimensiones, es decir, la continuidad lateral es determinada en la sección sísmica (distancia-tiempo), y la distancia de amplitud relativa puede ser medida en relación a una sola traza. Algunos autores (Shon, 1990), se han enfocado a la medición de la amplitud relativa en cada traza sísmica. El cálculo de varianza se ha implementado para medir la amplitud relativa de cada traza. La varianza se considera como la medida de dispersión de amplitudes; es calculada sobre una longitud de ventana en tiempo en cada traza y se expresa como:

$$\sigma_j^2 = \sum_{i=(j-1) \cdot N+1}^{j \cdot N} [x_i - \bar{x}]^2 / (N - 1), \quad (44)$$

donde σ_j^2 es el valor de la varianza en la j -ésima ventana, i es el i -ésimo dato, N es la longitud de la ventana y \bar{x} es la media de la j -ésima ventana. (Yamamoto et al., 1991).

La técnica de Pokhriyal, (1992), considera que los datos sísmicos primeramente deben tener el proceso de recuperación de amplitud verdadera, seguido por una equalización, deconvolución y si es necesario, aplicar filtros de paso de banda. El propósito del algoritmo es la supresión de ruido aleatorio presente en los datos de entrada. El promediado de las muestras S_{av} para cada traza es evaluado, para mantener el nivel apropiado de amplitudes de reflectores fuertes, el valor de threshold S_t es definido como:

$$S_t = S_{av} * F, \quad (45)$$

donde F es un factor de escala que se decide de la curva inversa de ganancia aplicada para recuperar la amplitud verdadera del reflector, es decir, S_t es una versión escalada de S_{av} . Una vez que S_t es determinado para una traza, los valores individuales son modificados, por dividir la longitud total de los datos contenidos en la ventana de tiempo; depende de la calidad de los datos y de la zona de interés. Si el máximo valor de la muestra dentro de esta ventana es S_{wmax} , entonces la multiplicación del factor F_w para la ventana se define como:

$$F_w = S_t / S_{wmax} \quad (46)$$

Las muestras de valores en la ventana, son entonces multiplicados por F_w , y son reemplazados por nuevos valores.

3.7 EL ENTORNO DE LA DISTORSIÓN DINÁMICA: ALARGAMIENTO NMO

Existen diferentes estudios que analizan el efecto de la distorsión dinámica alargamiento NMO. Buchholtz, (1972) llega a la conclusión, que al efectuar la corrección dinámica NMO a las trazas sísmicas, no es posible generar exactamente trazas con offset cero, ya que se genera una distorsión de la señal. Por lo tanto, las trazas corregidas pueden ser solamente una aproximación a una traza real de offset cero. La aproximación es mejor para offset pequeños. Sugiere que para eliminar la distorsión de la señal, es necesario aplicar a las trazas un borrado o MUTE, que depende de dos variables: tiempo y offset.

Dunkin y Levin, (1973) derivan la ecuación para evaluar cuantitativamente la distorsión alargamiento NMO. Discuten que la cantidad de alargamiento depende de t_0 , la separación de fuente-receptor, velocidad, y la relación con que varía la velocidad con t_0 . Analizan los espectros de amplitud y observan que el espectro es alterado por algún factor de estiramiento. Además el pulso stretching es equivalente a un escalamiento lineal de frecuencias producido por la corrección NMO.

Yilmaz, O., (1987) afirma que como un resultado de la corrección NMO, ocurre una distorsión en frecuencias, particularmente para eventos someros y offset grandes, y se conoce como alargamiento NMO. La forma de onda con período dominante T es alargado a un período T' . El alargamiento es una distorsión en frecuencias en el cual los eventos son cambiados a bajas frecuencias y puede ser evaluado como:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_{\text{NMO}}}{t_0}, \quad (47)$$

donde f es la frecuencia dominante, Δf es el cambio en frecuencias, y Δt_{NMO} está dada por la ecuación (27). A partir de la expresión para evaluar el alargamiento es posible calcular porcentajes para eliminar la distorsión.

Barnes, A. E. (1992), Determina que la corrección NMO introduce distorsiones no lineales en el contenido de frecuencias en datos de reflexión sísmica. Estas distorsiones son descritas por las transformaciones correspondientes a frecuencias instantáneas y espectro instantáneo de potencia, proporcionando simultáneamente mediciones en tiempo y frecuencia, que pueden ser utilizados para determinar los cambios en el ancho de banda del espectro. Se determina una ecuación para evaluar el borrado (mute).

Miller, R, D., (1992) evalúa el efecto de la distorsión dinámica para datos de reflexión sísmica con objetivos someros mediante porcentajes aritméticos de supresión automática del mute. La selección de un inapropiado borrado de alargamiento NMO en reflexiones someras puede degradar excesivamente el espectro y amplitudes en secciones apiladas de CDP perdiendo características estratigráficas. Un borrado correcto del stretch puede estabilizar las espectros de amplitudes para reflexiones someras. Enfatiza que se debe tener bastante cuidado de hacer un adecuado mute para no perder la resolución en las capas superficiales, sobre todo en objetivos geotécnicos. Concluye que un óptimo stretch para reflexiones someras alrededor de 50 [m] es generalmente menor del 20%. Este tipo de pruebas no son prácticas cuando se tiene un gran volumen de datos, ya que son de prueba visuales de ensayo-error.

Todos estos autores se enfocan a evaluar la distorsión de alargamiento NMO, por el contrario, nosotros nos proponemos medir estas distorsiones por medio de alternativas de relaciones de energía e implementar un algoritmo que de forma automática elimine esta distorsión de amplitudes con criterios geofísicos, desde un punto de vista más práctico y de aplicación en el procesado de grandes volúmenes de datos.

El estiramiento de la señal corregida con NMO está dado por la rapidez con que varía la relación de t y se puede evaluar como:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt(0)} \Delta t(x) &= \frac{d}{dt(0)} \left(\sqrt{t(0)^2 + \frac{x^2}{V^2}} - t(0) \right) , \\ &= t(0) \left(t(0)^2 + \frac{x^2}{V^2} \right)^{-1/2} - 1 , \end{aligned}$$

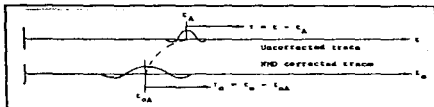
si $t(x) = \left(t(0)^2 + \frac{x^2}{V^2} \right)^{1/2}$:

$$\begin{aligned} &= \frac{t(0) - t(x)}{t(x)} , \\ \frac{d}{dt(0)} \Delta t(x) &= - \frac{\Delta t(x)}{t(x)} , \end{aligned} \quad (48)$$

Las figuras 3.16 ejemplifican el efecto de la distorsión dinámica alargamiento NMO en datos PRC reales y la aplicación del mute para suprimir los primeros arribos con efecto del stretching.

En un registro sísmico corregido por NMO es posible calcular su espectro de energía para cuantificar la relación del cambio de frecuencias. Esta cantidad de distorsión en frecuencias afecta los cálculos automáticos de velocidades, correcciones estáticas, migración, así como en la selección de parámetros apropiados de deconvolución, etc., que repercutirán en la resolución de los datos.

(a)



$$t_A \Rightarrow f: \text{ frecuencia antes de NMO}$$

$$t_{NA} \Rightarrow f': \text{ frecuencia después de NMO}$$

$$\Delta f = f - f'$$

$$\frac{\Delta f}{f} = - \frac{\Delta t}{T}$$

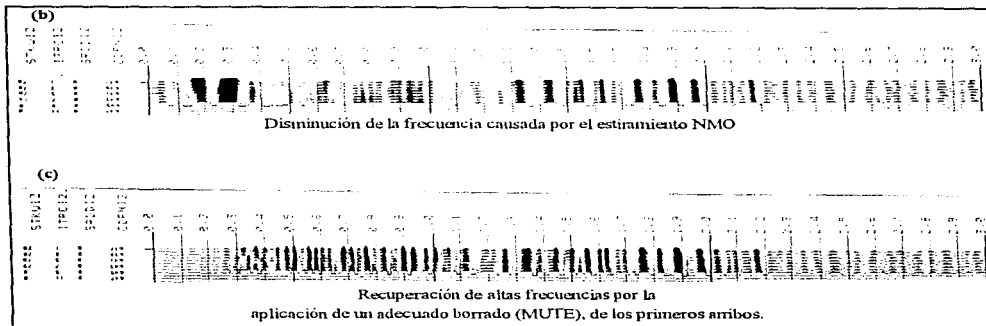


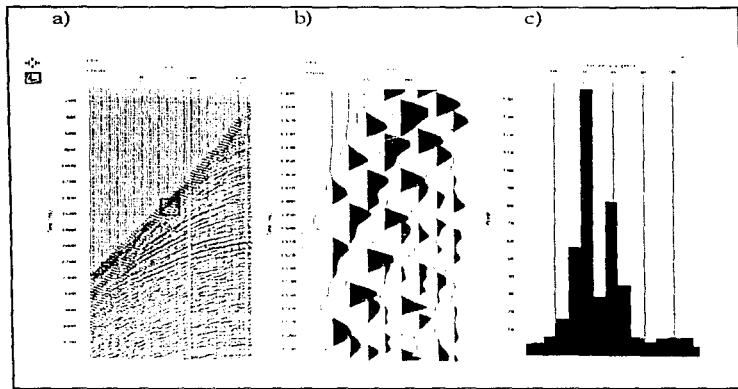
Figura 3.16

- (a) Stretching de un pulso por la corrección NMO.
- (b) En datos reales se observa el efecto de la distorsión por stretching, principalmente entre 0.1 y 2.0 [s].
- (c) Los mismos datos con la aplicación de un MUTE, se observa la recuperación de altas frecuencias entre 0.2 y 2.0 [s].

En los datos que utilizamos para implementar el algoritmo de supresión automática del stretching evaluamos sus espectros de energía en offset cercanos, medios y lejanos para verificar la distorsión de frecuencias. En los siguientes gráficos se muestra parte de estas pruebas.

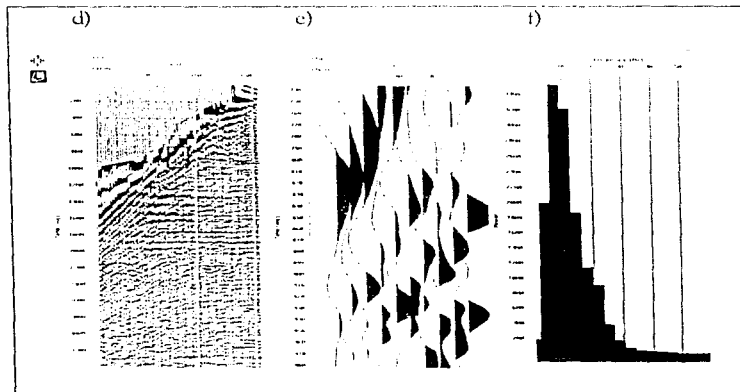
Con el gráfico G1 en a) se tienen los datos de PRC sin corregir dinámicamente por NMO, el rectángulo delimita la zona de análisis entre 1.4 y 1.6 [s] para offset medios. En b) es la amplificación de las trazas dentro de la ventana de tiempo. En c) se tienen los espectros de energía donde se resalta la frecuencia característica por arriba de los 20 [hz.].

Gráfico G1



Para el gráfico G2 en d) se observa la aplicación de la corrección por NMO y su consecuente distorsión de amplitudes. Como los primeros arribos y los eventos se han movido de posición, la ventana de análisis se localiza ahora entre 0.8 y 1.0 [s]. En e) se tiene el efecto del alargamiento de amplitudes (stretching) de las trazas corregidas por NMO. El espectro de energía f) denota el cambio de frecuencias características a menos de 10 [hz.]. Si se compara con el espectro en c) la relación ha bajado aproximadamente el 50 por ciento. Esto es la causa de la pérdida de resolución para los eventos superficiales.

Gráfico G2



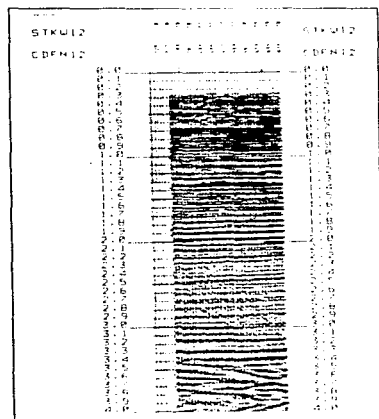
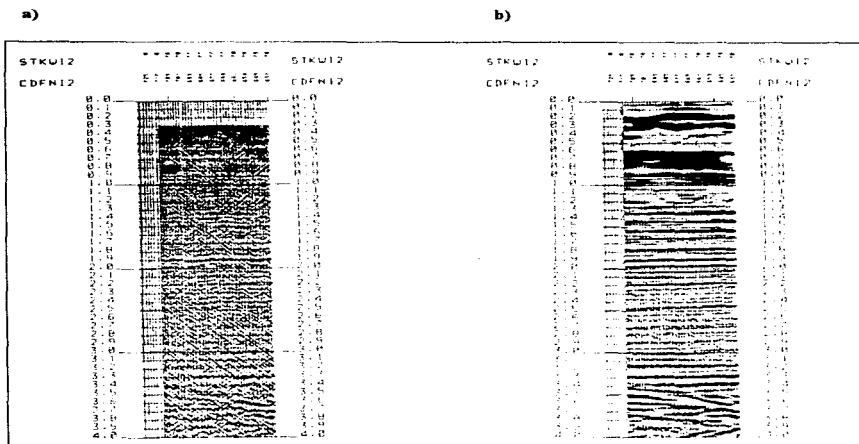


Gráfico G3

genera pérdidas de resolución para las capas someras. Este problema puede ser resuelto al borrar (MUTE) apropiadamente las zonas con distorsión fuerte.

En los gráficos G3 se muestra el apilado de varios PRC: en a) se apilan sin corregir por NMO. En b) se aplico la corrección por NMO (necesaria y fundamental) y se observa el efecto de la distorsión de amplitudes con la consecuente pérdida de resolución hasta 2.0 [s.].

Para c) se aplico un borrado para suprimir el efecto de la distorsión; se tiene mayor resolución para los eventos superficiales. Por lo tanto, con la correcta aplicación del borrado se tendrá mejor identificación de los eventos someros.

El efecto mayor del alargamiento de la onda ocurre a offset grande, los eventos someros son fuertemente alterados esto

Las siguientes gráficas son el resultado de aplicar estos porcentajes aritméticos de supresión del stretching.

Los gráficos de G4 son los resultados obtenidos por Miller, (1992). Espectros normalizados (Fig. G 4.1) muestran el efecto de la distorsión hacia bajas frecuencias, según el porcentaje de eliminación del stretch. Así, estos porcentajes aplicados a los PRC y su sección apilada correspondiente Fig. G 4.2: en a), b) y c) se puede observar como afecta la supresión en la resolución de los eventos superficiales.

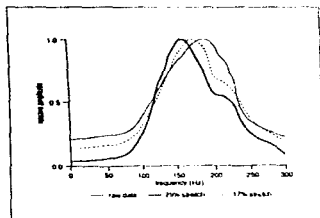


Gráfico G 4.1
Espectros Normalizados (Miller, R. D., 1992).

Existen programas de correcciones NMO que admiten un porcentaje del stretching y en forma automática borran el efecto según el porcentaje requerido. No considera un fundamento geofísico, solamente aritmético. El inconveniente es que no es una forma óptima de considerar el mayor número de trazas sin deformación.

También ha sido una razón para usar las medidas de energía con criterios geofísicos en el diseño del algoritmo como una solución óptima a este problema, con resultados excelentes.

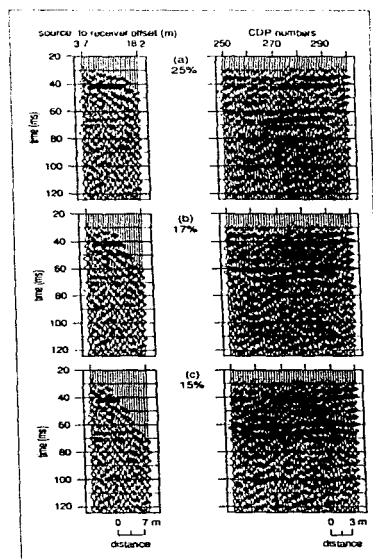
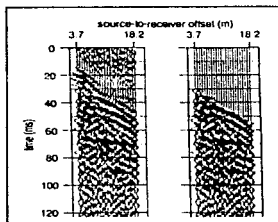


Gráfico G 4.2
Porcentaje de supresión aritmética de "stretching".
(Miller, R. D., 1992).

ALGORITMO PARA LA SUPRESIÓN AUTOMÁTICA DE DISTORSIÓN DINÁMICA EN REGISTROS SÍSMICOS

4.1 CONDICIONAMIENTO PARA LOS DATOS DE ENTRADA

El condicionamiento de los datos en familias de PRC se enfoca a la aplicación correcta de procesos básicos de eliminación de ruidos y de recuperación de amplitudes como son: corrección por divergencia esférica, corrección por absorción, procesos consistentes con la superficie, etc. Así mismo, los parámetros adecuados de deconvolución y de ser necesario, la correcta aplicación de filtros que permitan la eliminación de ruidos. En términos generales todos estos procesos se usan en la obtención de una buena relación señal-ruido para mejorar la resolución en las etapas posteriores de procesamiento.



Aplicación de tiempos de inicio "SERUIME"

Es necesario considerar la aplicación de tiempos de inicio por traza o velocidad para eliminar la presencia de ruidos ambientales previos a las llegadas de los primeros arribos. Estos condicionamientos son útiles para la eliminación de amplitudes anómalas que puedan alterar la sensibilidad de la función de energía por semblanza. Los datos de entrada para el algoritmo son registros sísmicos en PRC corregidos dinámicamente por NMO. Sin el porcentaje de supresión de muestras que atenuen el efecto de distorsión dinámica alargamiento NMO, con el objetivo de proporcionar los valores altos de amplitud que permitan tener un contraste de valores de amplitud entre los reflejos y el efecto de distorsión dinámica, de esta manera se tendrá mayor sensibilidad

en la función de semblanza para detectar en que valores de amplitud se localiza el cambio de contraste y asignarse por número de traza. Es importante utilizar funciones de velocidad apropiadas para alinear los eventos de reflexión; se debe tener cuidado de no perder el alineamiento porque cuando se usan velocidades bajas producen sobrecorrección: eventos arriba de su posición horizontal.

Las velocidades altas producen bajocorrecciones: eventos abajo de su posición horizontal. El uso de velocidades apropiadas es conveniente cuando se desea analizar por ventanas de tiempo el grado de coherencia de los eventos. El análisis por energía de semblanza se realiza apropiadamente cuando la velocidad es la correcta y los eventos se pueden seguir en ventanas de tiempo. El efecto de la distorsión dinámica se puede analizar de manera correcta cuando la velocidad es la adecuada, de lo contrario la función semblanza podría dar resultados incorrectos.

4.2 PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Se hicieron pruebas programando las funciones de crosscorrelación normalizada, coherencia simple, energía de semblanza, suma parcial de amplitudes, atributos sísmicos y relaciones estadísticas para clasificación de señales. La función de energía de semblanza en relación con parámetros estadísticos y con la búsqueda de cambios de gradientes, presentó mejores características para la automatización del algoritmo que tiene como objetivo eliminar el efecto de la distorsión dinámica de las amplitudes.

Por otra parte, es posible hacer un análisis estadístico dentro de ventanas de tiempo para evaluar el contraste de amplitudes que sea útil para clasificar la señal de acuerdo a criterios de clasificación de señales como la media, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, coeficiente de ruido y un número mayor de parámetros estadísticos. Con este tipo de análisis es posible reducir el gran volumen de datos y efectuar un análisis más detallado en determinadas zonas de interés. Son la base de las técnicas para el reconocimiento automático de patrones de reflexión. (Sinvhal, et al, 1992; Ronquillo, 1991).

Para el caso del programa de suma parcial de amplitudes (Apéndice III), fig. 4.1 la entrada son registros de PRC corregidos dinámicamente con el efecto total del alargamiento NMO. La salida genera una serie de apilados parciales incrementándose progresivamente según la multiplicidad de trazas contenidas en el registro de PRC.

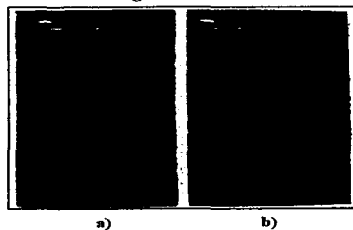


Figura 4.1
Datos obtenidos por el programa de apilado parcial
(Apéndice III)
a) datos de entrada
b) datos de salida con suma parcial.
El cambio de la forma de onda se observa con el
cambio de color.

$$x(i, j) = \frac{1}{j} \sum s(i, j) \quad (49)$$

donde:

- $j = 1, 2, \dots, M$
- $i = 1, 2, \dots, NM$
- M es la multiplicidad (número de trazas)
- NM el número total de muestras
- $s(i, j)$ es la amplitud de la traza grabada al offset j -ésimo
- $x(i, j)$ es el apilado parcial de amplitudes

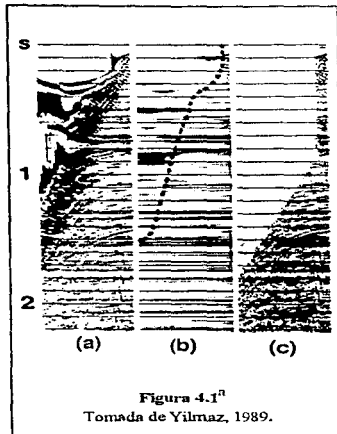
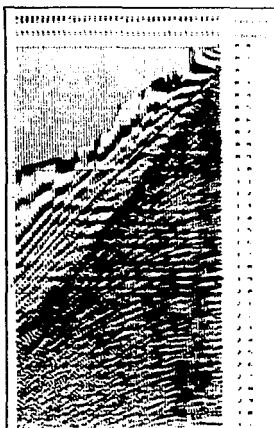


Figura 4.1^a
Tomada de Yilmaz, 1989.

El número de trazas de salida es igual a las de entrada. En la fig. 4.1^a se observa que: en (a) son los registros de PRC corregidos dinámicamente con el efecto total del alargamiento NMO, en (b) es la salida de las sumas parciales $x(i, j)$. La primera traza localizada a la derecha es la misma que la contenida en el registro original, la segunda es la suma de las dos trazas cercanas en el registro original y así sucesivamente hasta la última traza que se obtiene de la suma total de las trazas del registro original, en (c) se presenta un corte convencional exagerado. Con este tipo de registro se puede obtener una zona para el corte de la distorsión dinámica. El objetivo es visualizar el cambio de la forma de la onda y en ese punto marcar el corte. El inconveniente de esta técnica es que requiere la interpretación visual del intérprete Geofísico para ubicar el cambio de carácter de la onda. Por lo tanto se tendrá una cantidad de interpretaciones en función del número de intérpretes que la realicen

Se diseñó una ventana en tiempo para analizar estadísticamente los datos obtenidos por el programa de suma parcial de amplitudes, también se le aplicaron a estos datos la técnica de la traza compleja para obtener los atributos sísmicos para buscar alguna relación entre los diferentes parámetros como son: fase instantánea, frecuencia instantánea y la envolvente de amplitud en relación a estadística, para intentar automatizar el cambio del carácter de la onda. El resultado de la clasificación de la señal no proporcionó una forma cuantitativa que permitiera localizar el cambio automático del carácter de la onda. Los resultados fueron útiles para adaptar la ventana en la función de semblanza.

El motivo de analizar los datos sísmicos de PRC por ventanas de tiempo es el hecho de que en cada ventana se puede calcular varias propiedades estadísticas de la traza y mediante un desplazamiento uniforme se puede analizar la longitud total de la traza. También con la finalidad de aprovechar las ventajas que presentan algunas técnicas de coherencia diseñadas en tiempo, como la energía de semblanza, que es útil para analizar datos multicanales que presentan eventos coherentes que se extienden en intervalos de tiempo y distancia. Los eventos de reflexión presentan la característica de ser continuos en tiempo y distancia. El efecto de la distorsión dinámica que presentan estos eventos al corregirse dinámicamente por NMO, hace posible que se pueda aplicar ventanas de tiempo y cuantificar por relaciones de energía.



Amplificación del registro para la ventana de análisis por semblanza

Figura 4.2

En esta figura se tienen los dos registros sobrepuestos, al fondo se observa (zona más oscura), el registro sin corregir dinámicamente con los eventos hiperbólicos, en el primer plano (zona más clara) se observan los eventos horizontales corregidos por NMO.

Las líneas definen la zona de verificación para los valores de semblanza

Considerando las características de las funciones de coherencia, se programó la función de crosscorrelación normalizada en ventanas de tiempo deslizables en tiempo y offset, para verificar la sensibilidad al cambio de amplitudes asociadas al alargamiento NMO, los resultados obtenidos (Ver capítulo 5, fig. 5.1) presentaron una mayor variación para localizar los cambios de pendiente que pudieran asociarse a los cambios de amplitud y su vez relacionarlos al efecto de la distorsión dinámica. Aún con la aplicación de técnicas de suavizamiento la variación no disminuye.

Simultáneamente se aplicó un análisis estadístico para tratar de enfocar la variación de la pendiente y los resultados obtenidos no determinaron con precisión la zona de distorsión dinámica. Por otra parte, la coherencia simple no proporciona la variación continua para analizar por ventanas

de tiempo la señal, solamente cambios muy locales y puede usarse como apoyo para verificar el contraste en las proximidades del cambio de amplitudes asociadas al efecto de alargamiento NMO.

Es importante enfatizar que desde un principio el principal interés de nuestro objetivo fue programar la función de energía de semblanza y analizar sus resultados. Esto tiene fundamento por la utilidad que ha tenido esta función en la solución de diversos problemas geofísicos. La idea se complementó con analizar los anteriores tipos de funciones de coherencia para relacionar los resultados con los obtenidos por la semblanza y de esta manera tratar de tener más elementos que nos permitieran automatizar nuestro método automáticamente. Por ejemplo en el apilado parcial de amplitudes se puede visualizar el cambio del carácter de la señal en la zona de distorsión de amplitudes.

Los resultados obtenidos por semblanza (Ver capítulo 5, fig. 5.4), comprueban las características de sensibilidad a los cambios de amplitudes y a la continuidad de los eventos. Primeramente se relacionaron estas características con el registro de PRC para verificar la zona de máxima distorsión de amplitudes. La correspondencia entre ambos datos en el dominio del tiempo-offset (núm. de traza) coincidió en la mayoría de los casos en la zona de distorsión.

Una vez que los cambios de mayor pendiente en la función de semblanza coincidía con la mayor distorsión de amplitudes, con estos primeros resultados se pensó en encontrar métodos o técnicas de apoyo para tratar de automatizarlos. Como la semblanza es sensible a la continuidad de eventos, cuando existe una interrupción repentina, la función indicará ese cambio, por lo que fue necesario restringir o limitar los cambios de pendiente. Para este fin, se consideró un método de umbral estadístico con criterios básicos pero funcionales que permitieron clasificar estadísticamente a la semblanza. Se asignaron límites de clasificación para identificar la zona de distorsión dinámica.

Se observó que sobreponiendo los gráficos de PRC antes de aplicar la corrección dinámica por NMO sobre los datos de PRC corregidos dinámicamente y con el efecto de la distorsión dinámica alargamiento NMO, los tiempos asociados a los primeros arribos del registro sin corregir por NMO pueden establecer un límite inferior que delimita una zona para la verificación de los resultados obtenidos por el programa y evaluar el corte del borrado de la distorsión de amplitudes. El tiempo inicial y final es fácilmente identificable en estos registros. Se necesitó efectuar una subrutina para interpolar estos tiempos y así tener valores continuos en tiempo muestra a muestra para hacer posible la comparación con los valores de semblanza. En la fig. 4.2 se tienen los dos registros sobrepuestos y la línea punteada delimita los tiempos de los primeros arribos, la línea continua podría ser un límite superior; ambas líneas definen una zona para verificar los resultados del algoritmo.

4.3 DESPLIEGUES DE ESPECTROS DEL ALGORITMO

En la fig. 4.3a se tiene un despliegue de energía por semblanza obtenidos por el programa, con el eje vertical en tiempo y el horizontal en número de trazas, se puede interpretar en forma similar al espectro de velocidades; uniendo pares de puntos de offset-tiempo que tienen valores altos de semblanza, por el contorno del color naranja o verde del espectro. Al igual que el espectro de velocidades, se requiere experiencia para una interpretación de buena calidad y es una de las razones para la automatización del algoritmo.



Figura 4.3

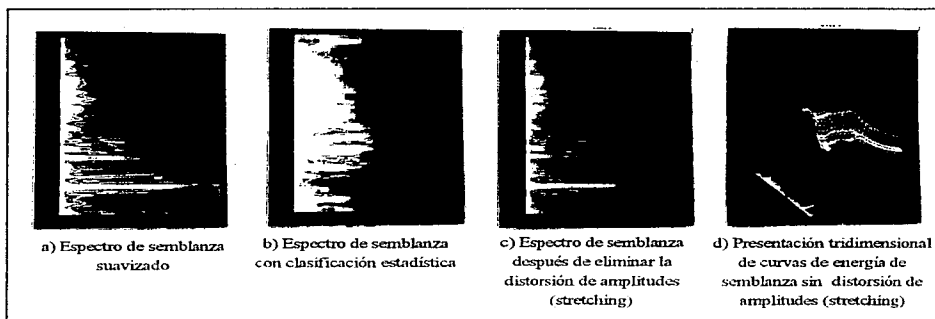


Figura 4.4

La fig. 4.3b es una presentación tridimensional de las funciones de energía por semblanza con un barrido continuo de tiempo por ventanas hasta el tiempo total de análisis del registro de PRC. La fig. 4.3c es la función de crosocorrelación y en comparación con la fig. 4.3a presenta variaciones mayores. La fig. 4.4a es el espectro suavizado de semblanza, la fig. 4.4b es con clasificación estadística y se observa un contraste más fuerte entre los valores máximos y mínimos. La fig. 4.4c es la función de semblanza sin el efecto de la distorsión dinámica (con mute) en la parte superficial se presenta el mayor cambio de energía, se puede observar el incremento de los valores en la relación de energía en comparación de la fig. 4.4a que tiene el efecto de la distorsión dinámica (sin mute). La figura 4.4d son las funciones continuas de semblanza con pendiente más suave y sin el efecto de la distorsión.

4.4 DISEÑO DE LA FUNCIÓN DE ENERGÍA DE SEMBLANZA

La función de energía de semblanza se diseñó en ventanas de tiempo con longitud relacionada al periodo característico de la señal, deslizable verticalmente de acuerdo al intervalo de muestreo de la señal y considerando constante cada longitud, se desliza horizontalmente desde la primera traza con offset mínimo hasta el total de trazas relacionadas con el offset máximo, y se obtiene un valor de semblanza por cada traza. El total de valores dentro de la ventana definen la función de semblanza.

Una vez de recorrer todas las trazas nuevamente se corre la ventana en tiempo y offset y así sucesivamente hasta el final del tiempo de análisis. La primera traza tendrá el valor máximo de semblanza (autocorrelación) y a medida que recorre las trazas, la semblanza será sensible a la continuidad de eventos coherentes o del contraste de amplitudes que existan dentro de la ventana de tiempo de aplicación, sus valores tienden a disminuir. Con este tipo de corrimiento de ventana la energía de semblanza queda en función de tiempo-número de traza. Se obtiene una función de semblanza para cada corrimiento de la ventana en tiempo y offset total.

También se implementó una subrutina para poder evaluar en forma automática el cambio más significativo de pendiente de la función de energía por semblanza mediante la técnica de la derivada. Se estableció un criterio para localizar puntos crecientes en tiempo-núm.de traza (offset). Una vez que se reconoce un cambio de pendiente, se guarda en una variable y a partir de esta localización se procede a buscar el siguiente cambio de pendiente hasta el tiempo final de análisis.

Este corrimiento de ventanas en tiempo es con la finalidad de tener una mayor redundancia de información y asegurar el análisis continuo muestra a muestra de la señal. Esta idea se comparte con la de Taner y Koheler (1969), en los resultados de su algoritmo se obtiene un espectro continuo

muestra a muestra o *scan* para el análisis de velocidades; se seleccionan pares de puntos de tiempo y velocidad que definen una función de velocidad, y se aplican para corregir dinámicamente los eventos por NMO. Las características de sensibilidad de la semblanza a eventos coherentes y a cambios de amplitudes se comprobaron analizando el cambio de pendiente de la función y su relación con las trazas asociadas al alargamiento NMO del registro sísmico de PRC. En los primeros análisis de los datos obtenidos por el programa, se observó que el cambio más significativo de pendiente en la función de semblanza coincidía en la mayoría de los casos en tiempo y núm.de traza en relación a la zona de distorsión dinámica del registro de PRC.

Se analizó el espectro de semblanza (fig. 4.3a) mediante el trazo de una línea uniendo máximos de semblanza en función de tiempo-núm. de traza (similar a la interpretación de los análisis de velocidades) y se verificó que existe una gran correspondencia con la zona de distorsión dinámica. Puede considerarse una opción nueva para la eliminación del efecto de alargamiento NMO, en forma manual, sin embargo, nuestra aportación consiste en automatizar el efecto.

Para fines de automatizar el proceso de borrado que es nuestro objetivo, se tuvo que pensar en diferentes técnicas y criterios que ayudaran en la identificación automática de los puntos de máxima pendiente. Los que mejor funcionaron fue el suavizamiento, clasificación estadística y la búsqueda de pendientes por derivadas de tres a cinco puntos. Se combinaron diferentes criterios prácticos usados en el borrado manual y que consisten en seleccionar puntos de tiempo-offset en forma creciente. Se adaptó este criterio en la subrutina de búsqueda de cambios de pendiente (subroutine maximo).

El algoritmo incluye subrutinas de normalización y suavizamiento (subrutine norma y smooth) con opción de aplicarse a la función de semblanza. La utilidad es que permite eliminar variaciones de pendientes en trazas cercanas y enfatiza los cambios de pendientes en trazas con offset mayores. Cuando la señal tiene una buena relación señal-ruido, el suavizamiento debe hacerse con pocos puntos y cuando no la hay debe de incrementarse los puntos de suavizamiento. Resulta de gran utilidad cuando se aplica el procedimiento para encontrar de forma automática el cambio de pendientes.

Simultáneamente en el corrimiento vertical y horizontal de cada ventana de tiempo de semblanza $st(nt)$ se realizó un análisis estadístico con el objetivo de localizar el contraste cuantitativo del cambio de amplitudes y relacionarlo con el cambio de pendientes de la función de energía de la semblanza.

481	2163.44	53	1.00000
481	2163.44	54	0.
481	2163.44	55	0.
481	2163.44	56	1.00000
481	2163.44	57	1.00000
481	2163.44	58	1.00000
481	2163.44	59	1.00000
481	2163.44	60	1.00000
481	2163.44	61	1.00000
481	2163.44	62	1.00000
481	2163.44	63	1.00000
481	2163.44	64	1.00000
481	2163.44	65	2.00000
481	2163.44	66	1.00000
481	2163.44	67	1.00000
481	2163.44	68	1.00000
481	2163.44	69	2.00000
481	2163.44	70	0.
481	2163.44	71	2.00000
481	2163.44	72	1.00000
481	2163.44	73	1.00000
481	2163.44	74	1.00000
481	2163.44	75	1.00000
481	2163.44	76	2.00000

Ventana-Tiempo-Traza-Clasificación
Muestra de datos con clasificación
obtenida con el flujo de la figura 4.5.

FLUJO DE ASIGNACIÓN PARA LA CLASIFICACIÓN
ESTADÍSTICA DE LA SEÑAL

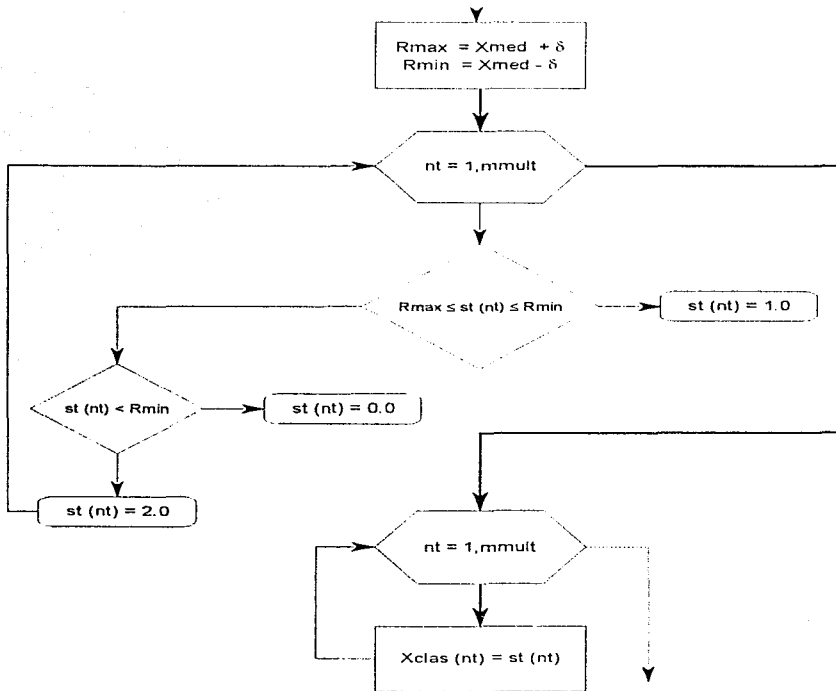


Figura 4.5
Flujo de Asignación para la Clasificación Estadística de la Señal

Se definieron rangos para clasificar la señal de acuerdo a la media y la desviación estándar (Mendenhall, 1981), así como la relación con el coeficiente de variación y el coeficiente de ruido. Los valores de clasificación se definen como $R_{MAX} = \text{media} + \delta$ y $R_{MIN} = \text{media} - \delta$, donde δ , puede tomar los diferentes valores de dispersión: desviación estándar, varianza, coeficiente de ruido o coeficiente de variación.

El rango de valores menores R_{MIN} asociados al valor de la media menos su desviación estándar o coeficiente de variación se relacionan con los valores de la función de semblanza y el efecto de distorsión dinámica. El diagrama de flujo de la fig. 4.5 muestra el procedimiento para clasificar la señal. De esta manera, por técnicas estadísticas es posible reconocer en forma automática el contraste mayor entre las amplitudes de una señal coherente y la distorsión dinámica. Esta idea de relacionar semblanza con criterios estadísticos puede servir como una base para desarrollar técnicas de reconocimientos de patrones de reflexión sísmica o para extraer alguna característica de interés.

Se analizaron visualmente las gráficas de las funciones de semblanza en relación con el tiempo y el número de traza. El cambio mayor de pendiente en la mayoría de los casos coincide con el cambio de amplitud asociada al efecto de alargamiento NMO, por lo tanto, es posible identificar la zona de trazas donde existe el cambio de pendientes así como el tiempo en que la semblanza presenta ese cambio. Así en forma sucesiva, se identificaron estas características para posteriormente implementarlas en una subrutina que identifica en forma automática el cambio de pendiente.

207	15.74	05	15
208	15.72	05	15
209	15.76	05	15
210	15.74	05	15
211	15.74	05	15
212	15.78	05	15
213	15.52	07	13
214	15.56	07	13
215	15.60	06	14
216	15.74	05	15
217	15.78	05	15
218	15.72	05	15
219	15.76	05	15
220	15.72	05	15
221	15.68	05	15
222	15.68	05	15
223	15.62	05	15
224	15.56	05	15
225	15.52	05	15
226	15.60	05	15
227	15.56	05	15
228	15.52	05	15
229	15.52	05	15
230	15.52	05	15
231	15.52	05	15
232	15.52	05	15
233	15.52	05	15
234	15.52	05	15
235	15.52	05	15
236	15.52	05	15
237	15.52	05	15
238	15.52	05	15
239	15.52	05	15
240	15.52	05	15
241	15.52	05	15
242	15.52	05	15
243	15.52	05	15
244	15.52	05	15

Ventana-Tiempo-Traza promedio
Muestra de datos obtenidos por el programa para la traza promedio

Se utilizó la técnica para encontrar la derivada o cambio de gradiente de tres a cinco puntos. El procedimiento se realizó de la siguiente manera:

Una vez que se obtiene la función de semblanza, se aplica el procedimiento de la derivada para localizar el cambio más significativo de la pendiente, como la semblanza se aplica en un intervalo de tiempo, simplemente se asigna el cambio al número de traza, este valor se almacena en una variable ($\text{imax}(j)$), así a partir de cada valor encontrado, se reinicia la búsqueda del siguiente cambio significativo de pendiente en las funciones restantes de semblanza. De esta manera, se obtienen pares de puntos crecientes en tiempo y distancia (número de traza).

Para fines de enfatizar dentro de cada ventana de tiempo la traza asociada con la máxima pendiente ($\text{imax}(j)$) se procedió a calcular una traza promedio por cada longitud de ventana en tiempo (40 [ms]) o cada 10 muestras identificada como la variable $\text{imax2}(j)$ para reducir el volumen de los datos a analizar. Una vez terminado el análisis de la longitud total entre el tiempo inicial y final, se localizaron en el registro de PRC todas las parejas de puntos tiempo-traza para verificar la zona de supresión del efecto alargamiento NMO.

Los datos obtenidos por el programa definen con bastante exactitud la zona más óptima para suprimir el efecto de la distorsión dinámica.

Después de obtener los datos de semblanza con la técnica de búsqueda de gradiente con la traza promedio y la de clasificación estadística de señales, se analizaron estos datos en los registros sísmicos de PRC y se observó que existe una zona de solución para establecer el borrado automático del efecto alargamiento NMO.

Debido a que la función de semblanza es sensible a los cambios de amplitud se tuvo que pensar en delimitar la zona de distorsión para asegurar que los cambios máximos de semblanza estuvieran enfocados al efecto de distorsión dinámica. (subroutine strtime).

Esta zona tiene como límite inferior ($imt(j)$) la trayectoria definida por los tiempos de los primeros arribos en los registros de PRC antes de corregirlos dinámicamente, donde es fácil reconocer el tiempo inicial y final de la trayectoria. El límite superior ($mt2(j)$) lo define una trayectoria paralela, simplemente retrasada un cierto intervalo de tiempo (-100[ms]).

Estos tiempos se utilizan para efectuar una interpolación y tener en forma continua todos los valores de tiempo que definen las trayectorias. Entonces el procedimiento consiste en comparar el valor promedio de la ventana $imax2(j)$ con el límite inferior $imt(j)$ y el límite superior $mt2(j)$. Este proceso está en el algoritmo en el apéndice IV.

En la fig. 4.2 la línea punteada define los primeros arribos y la continua marca la línea paralela retrasada un intervalo de tiempo. También se puede considerar una línea que inicie en el mismo tiempo inicial de los tiempos de los primeros arribos y un tiempo final menor al del tiempo final de los primeros arribos para obtener una zona en forma de abanico para verificar la solución final de los máximos de semblanza.

El diagrama de flujo de la fig. 4.6 muestra la etapa de verificación del valor de semblanza y los límites establecidos en la zona de solución.

FLUJO DE VERIFICACIÓN DEL VALOR DE SEMBLANZA

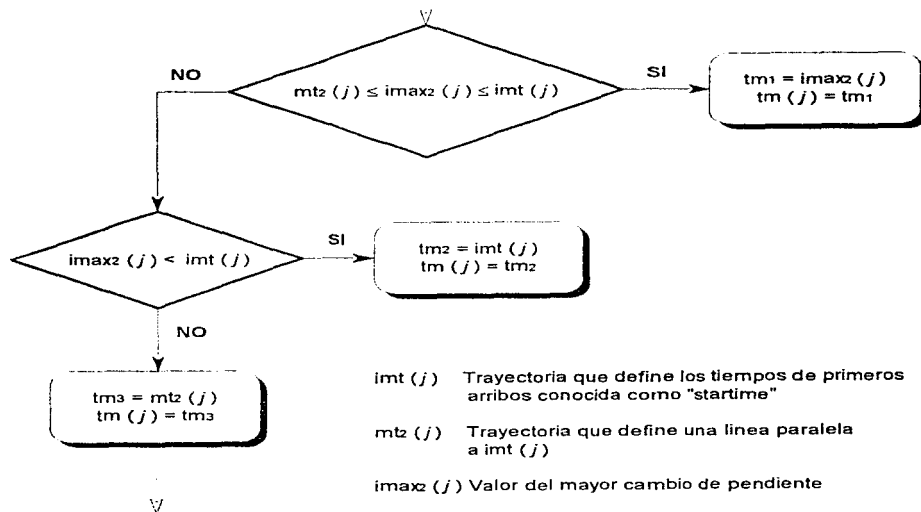


Figura 4.6
Flujo de Verificación del Valor de Semblanza

4.5 SECUENCIA DEL ALGORITMO

El procedimiento del algoritmo consiste en realizar los siguientes pasos:

PROCESO DE LECTURA

- a) Lee datos sísmicos en PRC, corregidos dinámicamente sin factor de corte del efecto de la distorsión dinámica ó alargamiento por NMO.
- b) Número de muestras por traza.
- c) Máxima multiplicidad (número de trazas por PRC)
- d) Longitud de la ventana de correlación [ms].
- e) Número de puntos de suavizamiento.
- f) Tiempo inicial de análisis [ms].
- g) Tiempo final de análisis [ms].
- h) Intervalo de muestreo [ms].

PROCESO DE CALCULO DE DATOS

- i) Abre una ventana en tiempo (su longitud se asocia al periodo de la señal)
- j) Calcula los valores de semblanza dentro de la ventana para cada traza.
- k) Por cada corrimiento de ventana en tiempo y su correspondiente recorrido desde la traza con offset mínimo hasta el offset máximo, determina la función de semblanza
- l) Suaviza la señal.
- m) Calcula parámetros estadísticos para la clasificación de la señal dentro de la ventana y asigna un valor de clasificación a cada traza.
- n) Calcula la variación de la pendiente en la función de semblanza, y el cambio mayor se asigna al número de traza correspondiente.
- o) Combina los parámetros estadísticos con la variación de la pendiente y asigna a la traza sísmica el cambio de pendiente y un valor de clasificación que se asocia al efecto de la distorsión dinámica.
- p) Avanza la ventana de tiempo muestra a muestra, con su correspondiente offset.

- q) Calcula una traza promedio en la longitud de la ventana de correlación.
- r) Realiza una interpolación lineal en la trayectoria asociada con los tiempos iniciales y finales de los primeros arribos y una trayectoria interpolada paralela a la anterior con un retraso en tiempo Δt (-100 [ms]).
- s) Verifica que la solución este dentro del límite inferior establecidos por la trayectoria de tiempos asociados a los primeros arribos y un límite superior de -100 [ms] respecto a esta trayectoria.

SALIDA DE DATOS

- t) Genera una matriz de semblanza.
- v) Genera una matriz de clasificación.
- x) Genera un vector solución de tiempo-traza (offset) sin el efecto de la distorsión dinámica.

El diagrama de flujo de la fig. 4.7 muestra en términos generales la secuencia del algoritmo para la supresión automática de distorsión dinámica.

FLUJO GENERAL DEL ALGORITMO

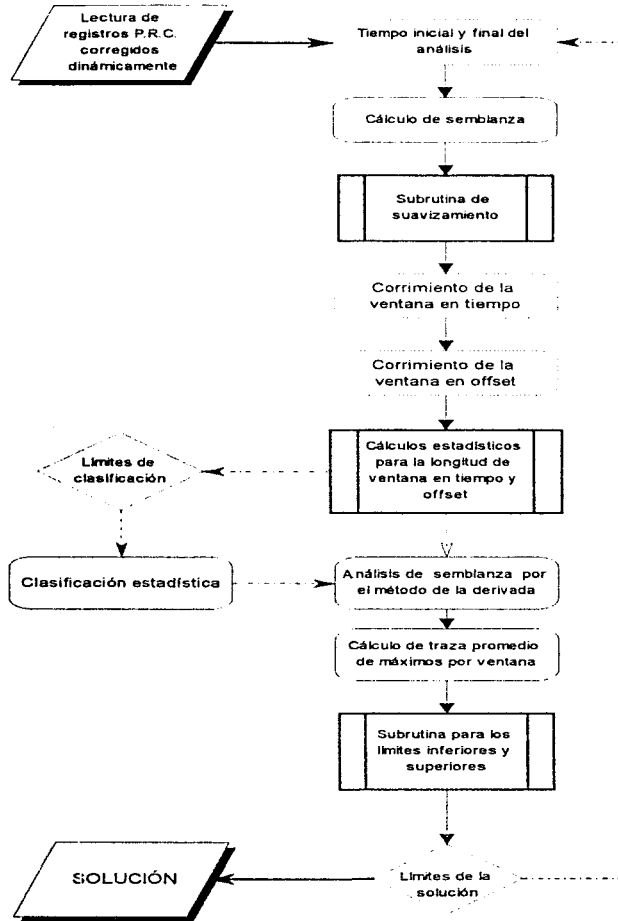


Figura 4.7
Flujo General del Algoritmo

RESULTADOS Y APLICACIONES

La función de energía de semblanza presenta formas suaves en relación a la función de croscorrelación que tiene formas más abruptas. Cuando se suaviza la función de energía de semblanza es posible localizar los cambios de mayor pendiente, para la croscorrelación estos cambios no se pueden localizar por su mayor variación, En la fig. 5.1a y 5.1b se puede ver el contraste entre las dos funciones, la función de croscorrelación varía más y a 2.1 [s] no tiene estabilidad como la función de semblanza, no es sensible al contraste de amplitudes buscadas.

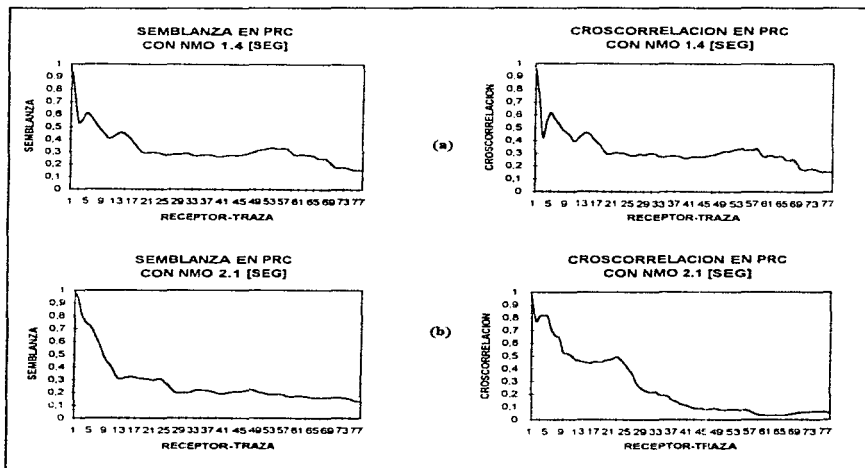


Figura 5.1
Comparación entre semblanza y croscorrelación

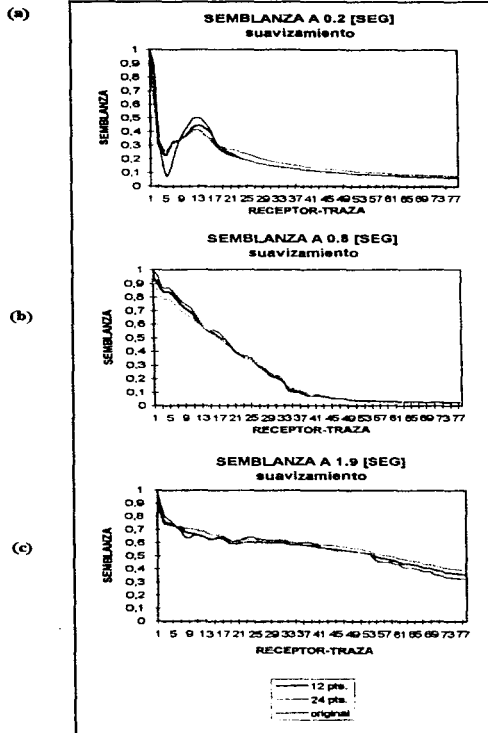


Figura 5.2
Suavizamiento de semblanza

La fig. 5.2a, b, c, presentan el efecto del suavizamiento en función del número de puntos utilizados (12 pts y 24 pts) para suavizar. En el registro sísmico de familias de punto de reflejo común fig. 5.3 se puede observar que al tiempo de 1.9 [s] existe un evento de reflexión muy enfatizado, los valores de semblanza para este tiempo permanecen altos y con un cambio de pendiente mayor aproximadamente en la traza 65. Se observa que cuando existe un evento con alta coherencia se requiere menos suavizamiento.

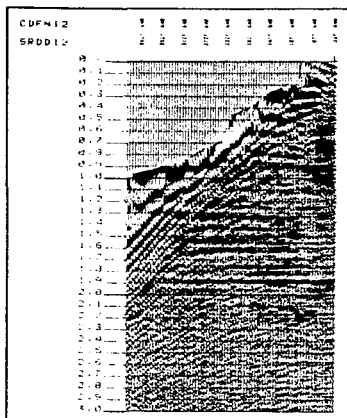


Figura 5.3
Registro de PRC con NMO

La clasificación estadística para la función de semblanza establece límites para clasificar la señal según el grado de coherencia, por lo que si analizamos las relaciones de la media con los valores de dispersión como varianza y desviación estándar, en una ventana que contenga un evento de reflexión habrá poca dispersión y cuando exista un cambio brusco del alineamiento del evento aumentará la dispersión.

Si se asignan valores a estos cambios en la función de energía de semblanza los valores iguales a cero indican un contraste mayor de amplitudes, también se relacionan con el cambio de pendiente.

En los gráficos de las fig. 5.4 se muestran la función de semblanza y los respectivos valores de clasificación para diferentes tiempos. Es interesante observar los diferentes cambios de pendiente en los gráficos de semblanza y los valores de clasificación:

Para 0.2 [s] el cambio está en la traza 5 y el valor de clasificación es cero, para 0.4 [s] el cambio de pendiente se localiza en la traza 8 con valor de clasificación cero, para 0.5 [s] el cambio es en la traza 19 y su clasificación es cero, en 0.7 [s] la pendiente cambia en la traza 27 con clasificación cero y así sucesivamente se pueden analizar los gráficos hasta antes de 1.9 [s].

En 1.9 [s] se puede verificar en el registro de la fig. 5.3 que existe un evento de alta coherencia y en los gráficos que se están analizando los valores de semblanza son mayores en relación a los anteriores valores de tiempo, el cambio de pendiente es más suave y se localiza aproximadamente en la traza 05 con clasificación cero.

Para 2.1 [s] si se observa nuevamente el registro de la fig. 5.3 no hay presencia de algún evento de reflexión y el efecto de la distorsión dinámica casi es nula, la función de semblanza presenta valores bajos y con una tendencia constante y no existe el cambio fuerte de pendiente como se puede ver en los gráficos de tiempos menores donde el efecto de la distorsión dinámica es mayor.

Este hecho pone en evidencia la relación entre el cambio de pendiente y la distorsión dinámica. Se puede relacionar el gráfico de 2.1 [s] con el de 1.9[s] para mostrar como la semejanza es sensible a eventos coherentes y no hay contraste de amplitudes la función proporciona valores bajos con tendencia constante y sin cambio de pendiente.

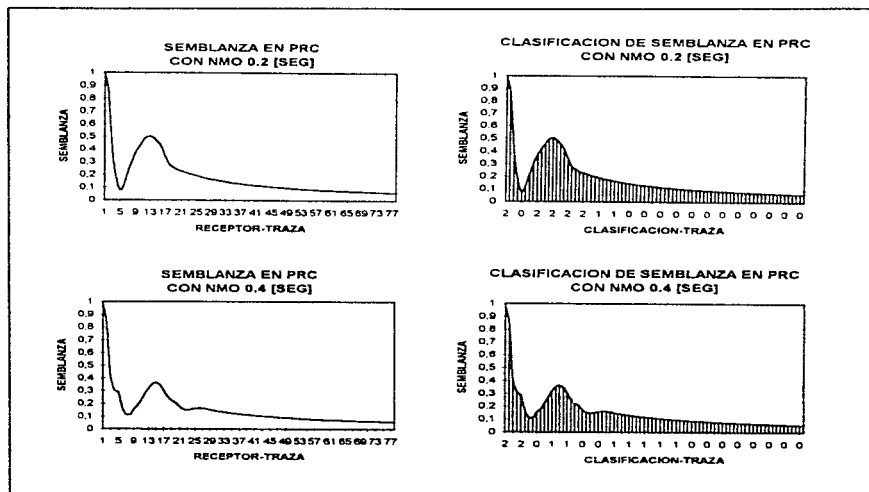


Figura 5.4
Gráficos de clasificación estadística en diferentes tiempos, cont.

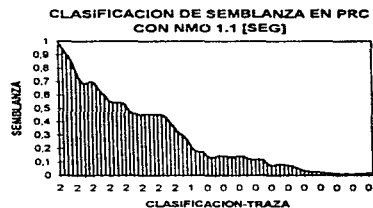
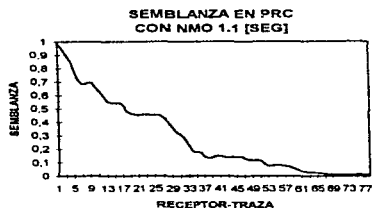
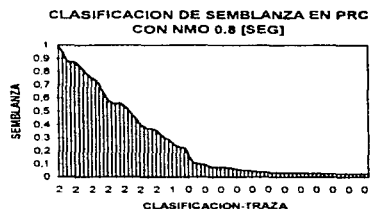
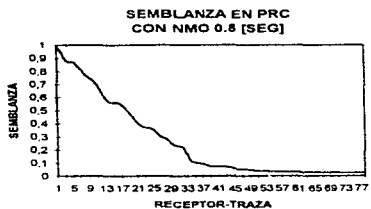
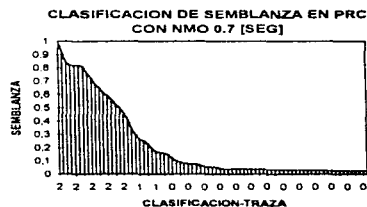
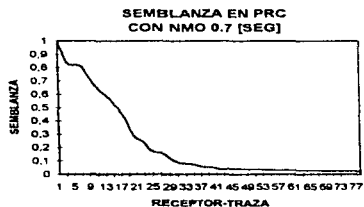
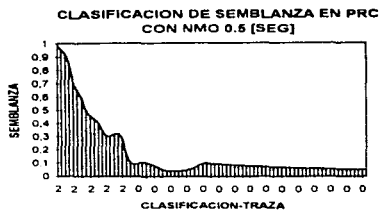
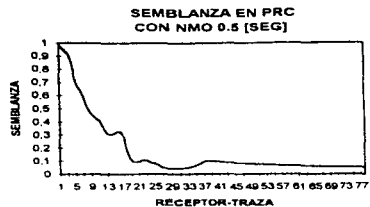


Figura 5.4
Gráficos de clasificación estadística en diferentes tiempos, cont.

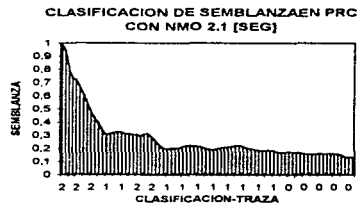
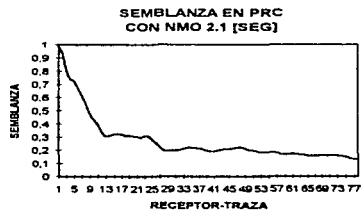
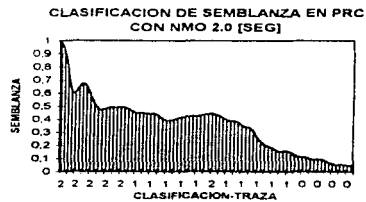
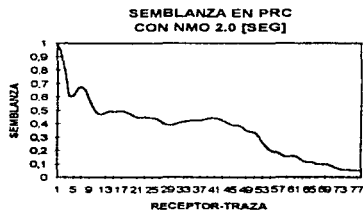
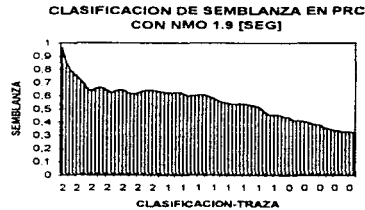
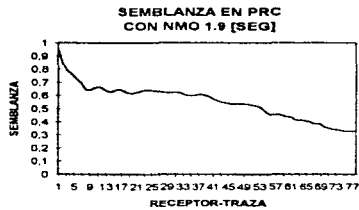
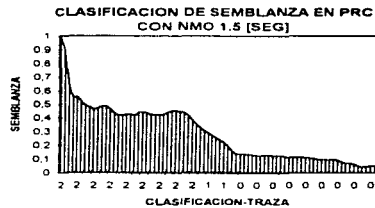
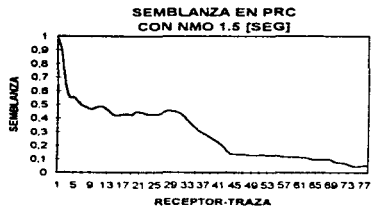


Figura 5.4
Gráficos de clasificación estadística en diferentes tiempos

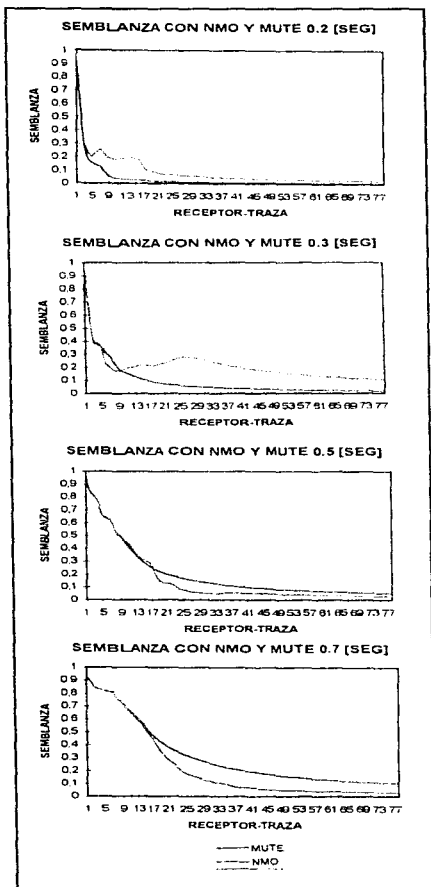


Figura 5.5

Gráficos de Semblanza - Mute a diferentes tiempos, cont.

Para evidenciar el efecto del cambio de pendiente en relación al efecto de la distorsión dinámica NMO-stretching, se graficaron simultáneamente la función de energía por semblanza con el efecto de la distorsión dinámica que se identifica con la línea punteada y en color azul [NMO] y la función de energía pero sin el efecto del NMO-stretching, en línea continua y en color rojo [MUTE]. Las gráficas de las figuras 5.5 muestran estas relaciones.

Para 0.2 [s] es claro el comportamiento de la curva mute con respecto a la curva nmo; como se han eliminado las amplitudes asociadas al NMO-stretching la curva mute es más suave y el cambio de pendiente ya no se asocia al contraste de amplitudes entre el efecto de distorsión y la coherencia de la señal, simplemente marca el límite de la mayor coherencia del evento. La curva mute casi es asintótica con el eje de receptor traza.

En 0.7 [s] la curva mute aumenta en relación a la de nmo por la eliminación de un número mayor de términos asociados a la distorsión de amplitudes, esto ocurre también para 0.8 y 1.1 [s].

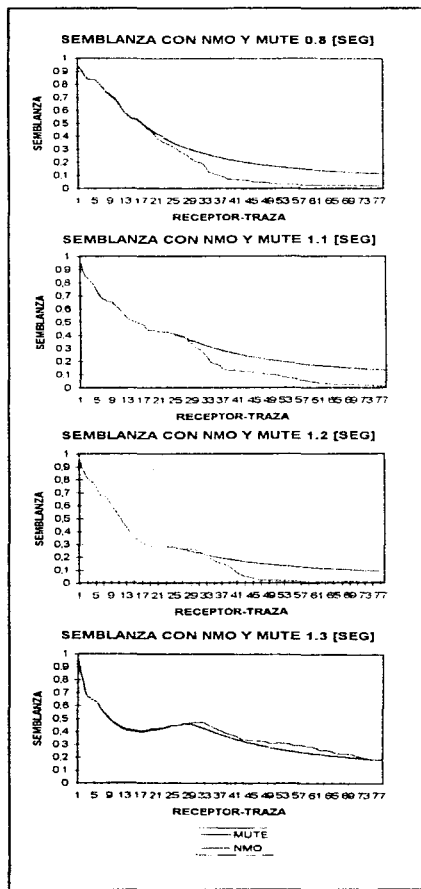


Figura 5.5
Gráficos de Semblanza - Mute a diferentes tiempos, cont.

Para 1.3 [s] la diferencia entre las dos curvas es menor debido a que hay un buen alineamiento de un evento de reflexión, el cambio entre estas curvas coincide con el contraste de amplitudes y observando el registro de la fig. 5.3 coincide en la traza 33.

En el mismo registro de la fig. 5.3 a 1.9 [s] existe un buen evento de reflexión y en relación con estos gráficos las curvas de nmo y mute se mantienen casi paralelas, el efecto de distorsión dinámica ha disminuido considerablemente, razón por la que casi no cambian.

Es interesante observar que para 2.1 [s] en el registro de la fig. 5.3 no se observa algún evento de reflexión y el efecto del NMO-stretching ha desaparecido, en los gráficos de nmo-mute las curvas coinciden idénticamente, no existe el cambio de pendiente y los valores de nmo y mute permanecen casi constantes. Es un resultado que presenta con claridad la falta de contraste de amplitudes y su relación con la distorsión dinámica. En forma similar ocurrió con la clasificación estadística.

Con estos gráficos se comprueba la relación entre el contraste de amplitudes entre los eventos de reflexión y el efecto del NMO-stretching.

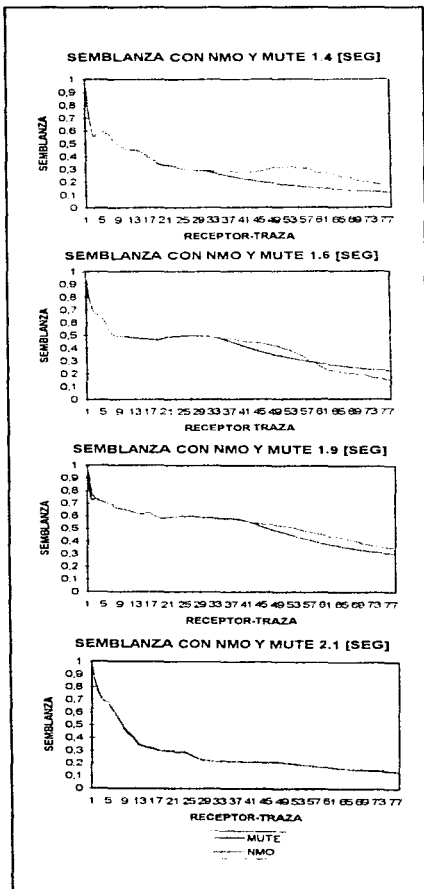
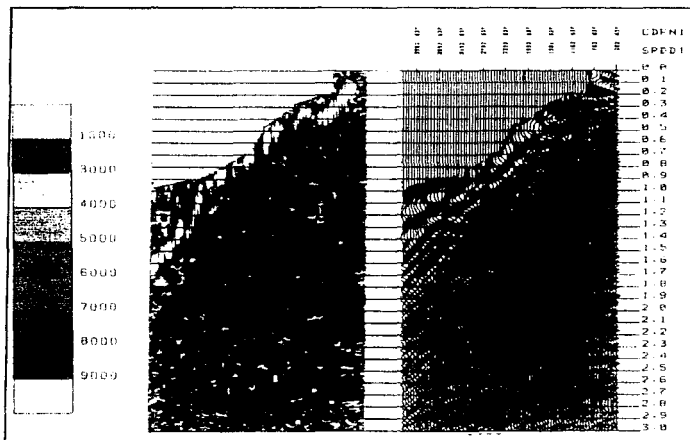


Figura 5.5

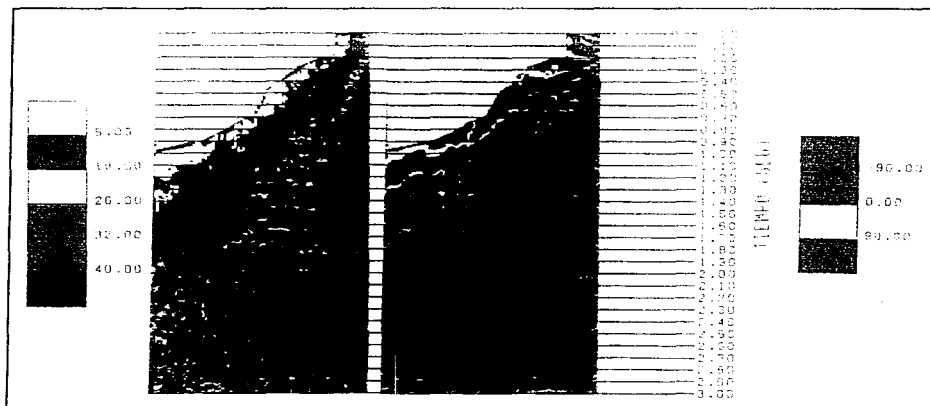
Gráficos de Semblanza - Mute a diferentes tiempos.

Para el mismo registro de la fig. 5.3 se aplico la técnica de la traza compleja (Apéndice III) para calcular los atributos sísmicos de fase instantánea, frecuencia instantánea y envolvente de amplitud, para tratar de identificar la distorsión de NMO-stretching. Los resultados del registro con atributos son las figuras 5.6 a, b, c.

El atributo que mejores resultados tiene es el de envolvente de amplitud, fig. 5.6a, visualmente puede localizarse la distorsión de amplitudes, pero para efectos prácticos se requiere implementar su automatización y comparar con la energía de semblanza para tener un algoritmo más poderoso.



a) Atributo de envolvente de amplitud



c) Atributo de frecuencia instantánea

b) Atributo de fase instantánea

Figura 5.6
Atributos de la traza sísmica compleja

Los resultados del algoritmo para el borrado de la distorsión dinámica son puntos en función de tiempo y offset. Se aplicaron en los siguientes datos reales para realizar comparaciones con el borrado seleccionado visualmente. Las diferentes comparaciones están en las gráficas de la figura 5.7a, b, c, d.

Los registros de la fig. 5.7 son datos sin corregir dinámicamente por NMO. En la parte superior de la figura 5.8a se tiene los registros sísmicos con la aplicación de la corrección dinámica NMO, donde se observa con claridad el efecto de la distorsión de amplitudes por el efecto NMO-stretching. La distorsión es mayor a offset lejanos (literal SRDDI2). En la parte inferior de la figura 5.8b se tienen algunos PRC apilados, la pérdida de los eventos someros se observa antes de 2.0 [s]. El efecto mayor de la distorsión se observa entre 0.1 y 1.0 [s].

Los registros de la fig. 5.9a es una aplicación de la supresión de la distorsión dinámica hecha visualmente con su respectivo apilado de puntos de reflejo común, relativamente se ha obtenido mejor resolución para identificar los eventos someros de reflexión cuando se ha eliminado la distorsión dinámica.

En la parte superior de la figura 5.9a, se tienen los registros de PRC con un borrado realizado visualmente, el corte ha eliminado trazas con información, es tan fuerte el corte que ha borrado por debajo de los 3.0 [s]. En la parte inferior de la figura 5.9b, se tiene una sección apilada de PRC y se observan amplitudes grandes que enmascaran los eventos superficiales (0.7 [s]). Parcialmente se tiene resolución para identificar los eventos someros.

En la parte superior de la figura 5.10a se tienen los registros de PRC con la aplicación de los datos obtenidos automáticamente por el algoritmo. Se observa la eliminación correcta de la distorsión de amplitudes. Se tiene una mayor cantidad de trazas con offset mayores y sin distorsión hasta 2.3 [s]. En la parte de la figura 5.10b se tiene mayor resolución y continuidad de los eventos superficiales. La mayor resolución se observa entre 0.3 y 2.0 [seg.]. Estos resultados tienen mejor resolución que los datos de la figura 5.9a. Por ejemplo los registros de la figura 5.9b el corte del borrado llega por abajo de los 3.0 [s] y con los datos obtenidos por el programa llega el corte a 2.3 [s]. Los resultados de la figura 5.10b muestran que los datos obtenidos por el programa resuelven en forma excelente la eliminación de la distorsión de amplitudes.

APLICACIÓN DE RESULTADOS

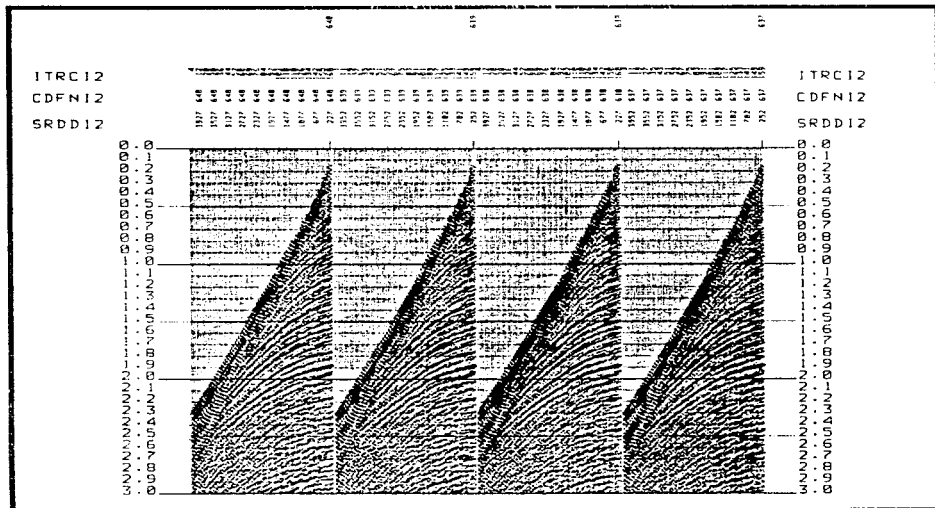
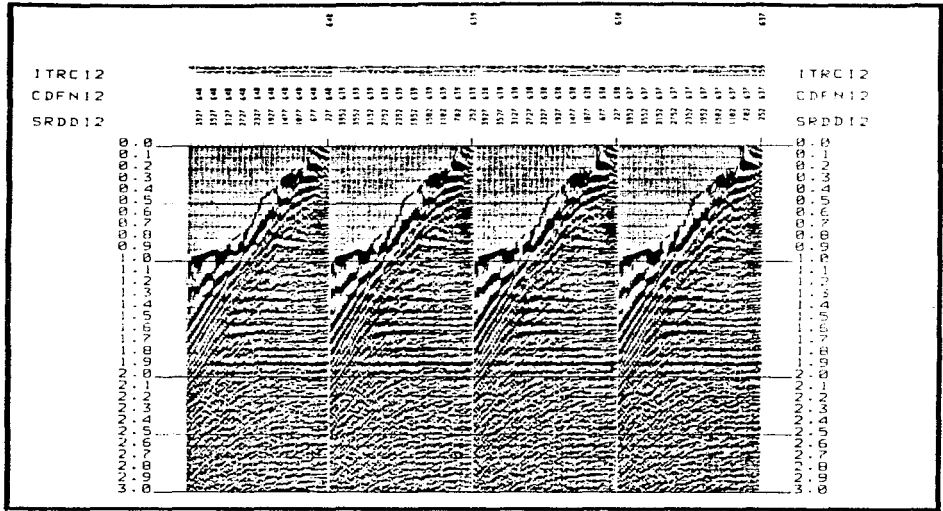


Figura 5.7

Datos sin corregir dinámicamente por NMO. Se observan los eventos de reflexión en forma hiperbólica.

APLICACION DE RESULTADOS

a)



b)

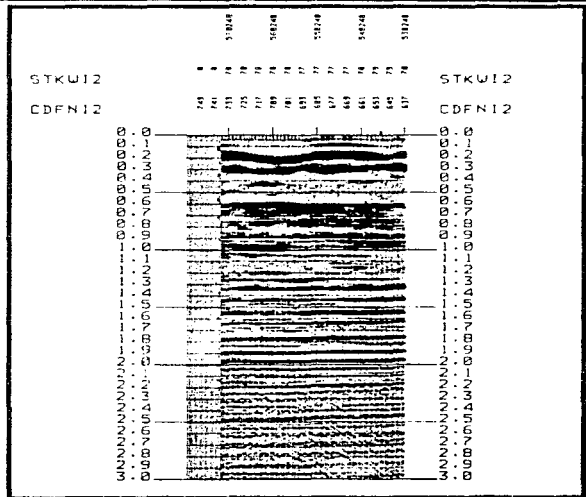
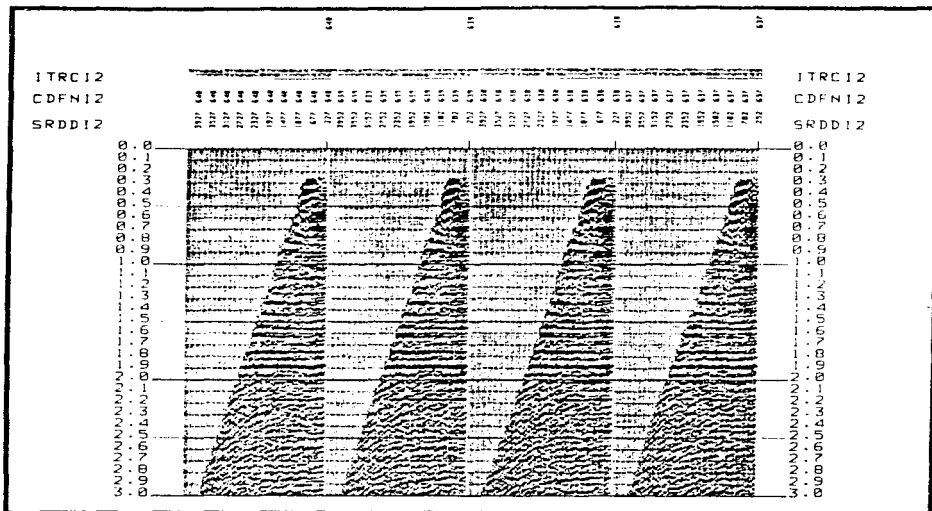


Figura 5.8

- a) Efecto de alargamiento de amplitudes
- b) Apilado de PRC sin eliminar el efecto de distorsión dinámica

APLICACIÓN DE RESULTADOS



b)

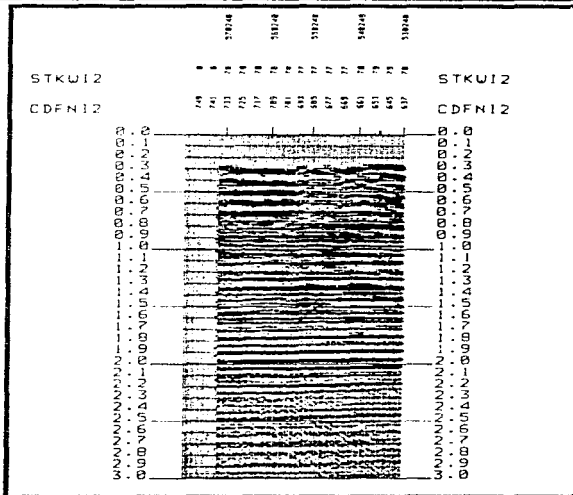
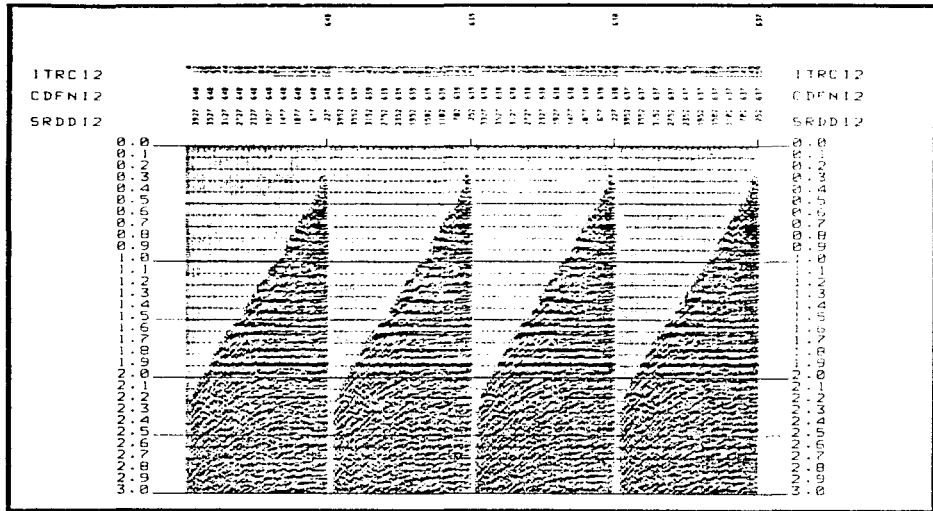


Figura 5.9

- a) Borrado manual de la distorsión
b) Apilado de PRC con una resolución regular para identificar los eventos de reflexión someros

APLICACIÓN DE RESULTADOS



b)

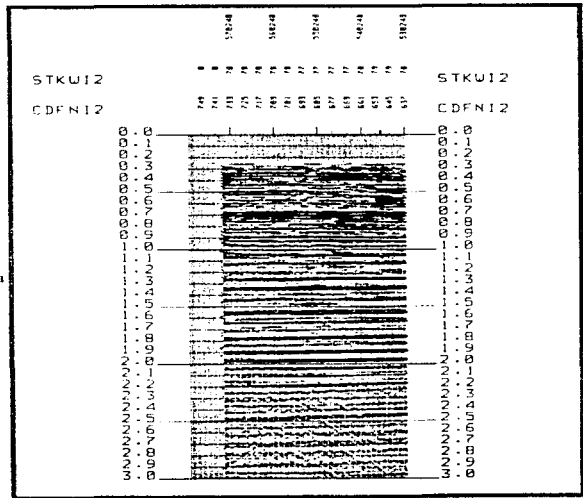


Figura S.10
a) Bando automático de la distorsión
b) Apilado de PRC con una resolución excelente para identificar los eventos de reflexión someros

CONCLUSIONES

La adquisición digital de los datos sísmicos en forma multicanal hace posible la aplicación de relaciones de energía y de parámetros estadísticos para el análisis y la solución de diferentes problemas geofísicos. Como los datos se graban en el dominio del tiempo los análisis con relaciones de energía se aplican directamente.

Estos análisis presentan gran versatilidad porque sus características se pueden interpretar y relacionar entre sí con diferentes criterios y herramientas matemáticas para complementar sus características de detección, realce o supresión de alguna parte de la señal.

En la programación de alguna relación de energía, se debe evaluar las diferentes características que las identifica y verificar en los resultados las propiedades de interés que se necesite resaltar. En esta etapa se tendrá una solución parcial en la programación.

En ocasiones el análisis de los resultados para identificar las características de las relaciones de energía y de su programación no se presenta en forma sencilla, por lo que es necesario el establecimiento de criterios de umbral que auxilian el enfoque de las características buscadas.

Cuando se necesite programar alguna propiedad de las relaciones de energía, se debe considerar que por sí misma no resuelve el objetivo de su automatización. Por lo que una vez detectada la característica debe extraerse de los datos en combinación con diferentes técnicas y medidas de energía. Su mayor importancia y utilidad radica en que establece el módulo principal del programa.

Para complementar la identificación de las características sísmicas : polaridad, continuidad de eventos, cambios de amplitud, etc., es de gran utilidad considerar criterios de límite que condicionen la solución del problema. En esta etapa se realiza una gran cantidad de pruebas que estarán basadas en la habilidad y conocimiento de diferentes técnicas matemáticas y de programación. Para un problema en particular existe la posibilidad de aplicar y relacionar una gran variedad de medidas de energía. Es útil considerar toda la información disponible de aplicaciones en las que han obtenido buenos resultados, porque ahorran tiempo en la planeación de la programación.

Los eventos se pueden marcar y graduar automáticamente utilizando criterios de coherencia como la semblanza. La relación de energía por semblanza es de gran utilidad para reconocer eventos con buena coherencia, además de ser muy sensible a los cambios de la amplitud en los eventos sísmicos, como quedo demostrado en el análisis de los resultado obtenidos por el programa.

La relación de semblanza combinada con criterios estadísticos, aplicada en ventanas de tiempo muestra a muestra podrá ser de gran utilidad para la implementación de técnicas de reconocimiento automático de patrones de reflexión en la interpretación geológica de secciones sísmicas.

Con el análisis de los resultados obtenidos por el programa se ha comprobado que es posible el establecimiento de criterios que permiten la automatización para la supresión de la distorsión dinámica provocada por la aplicación de la corrección dinámica NMO a los registros sísmicos de PRC. Se observó en los gráficos de semblanza con MUTTE y NMO que la confiabilidad de los resultados depende principalmente de las relaciones señal a ruido que se tengan en los registros y del contraste de amplitudes asociadas entre la distorsión dinámica y los eventos de reflexión.

Los algoritmos usados en la industria para la eliminación de la distorsión de alargamiento NMO requieren la interpretación de los datos de forma visual, hecho que limita la solución a procesos subjetivos de experiencia y juicio. Por el contrario, el algoritmo que desarrollamos se presenta como una herramienta alternativa para automatizar la supresión de la distorsión de alargamiento NMO. La interpretación la realiza el programa en forma óptima en base con criterios cuantitativos de la función de energía de semblanza con relación en técnicas estadísticas y de identificación de cambios de pendientes. El intérprete simplemente puede supervisar la solución final del borrado.

Como la semblanza es sensible a la continuidad de los eventos y al cambio de amplitud, es posible que la sensibilidad se localice en una zona fuera de la distorsión de amplitudes, por lo que es necesario que la sensibilidad correspondiente al cambio de amplitud se localice en la zona de límite correspondiente a la distorsión de amplitud. Se puede seguir experimentando con las fronteras establecidas por el límite inferior y superior para la verificación de los valores de semblanza, para optimizar la solución del programa. El programa fuente que se propone está realizado en el lenguaje de programación Fortran y puede ser adaptado a algún paquete de procesamiento sísmico para utilizarlo en la producción de grandes volúmenes de datos.

Cuando se aplicó la traza sísmica compleja a los registros sísmicos de PRC, se observó que los atributos sísmicos que mejor identifican la zona de distorsión dinámica es el atributo de envolvente de amplitud que se asocia a la máxima energía de la señal: enfatiza la zona de la distorsión dinámica y el de fase instantánea distingue la continuidad de los eventos. Sin embargo estas características se aprecian en forma visual con desplegados de color. Analizando la tabla de valores del atributo de amplitud se podrá diseñar alguna técnica para suprimir los valores altos de amplitud.

BIBLIOGRAFÍA

- Anstey, N. A., 1964, Correlation techniques- a review. *Geophysical Prospecting*, v. 12, p. 355-382.
- Aspiroz, R., 1969, Detección Automática de Reflejos Sísmicos. Universidad Rice, Houston, Texas.
- Barnes, A. E., 1992, Another look at NMO stretch: *Geophysics*, v57, p. 749-751.
- Bendat, J.S. y Piersol, A.G. (1965) Measurement and analysis of random data : Nueva York, Wiley.
- Bodine, J. H. 1986. Waveform analysis with seismic attributes, *Oil & Gas Journal*, June 9, 59-63.
- Bois, P y la Porte, M. 1970 Pointe automatique : *Geophys. Prosp.*, 18, 489-504
- Buchholtz, H., 1972, A note on signal distortion due to dynamic (NMO) corrections: *Geophysics Prosp.*, v.20, 395-402.
- Cohen, L., 1989, Time-frequency distribution -A review: *Proc. IEEE*, 77, 941-981.
- Dunkin, J. W., and Levin, F. K., 1973, Effect of normal moveout on a seismic pulse: *Geophysics*, v. 38, p. 635-642.
- Douze, E. J., and Laster, S. J., 1979, Statistics of semblance: *Geophysics*, v44, p. 1999-2003.
- Doyle, M., Lynn, W., Marschall, R., and Larner, k., 1985, A discussion of seismic acquisition apes : example of shot noise from other crews : 55 th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 530-532.
- Farnbach, J. S., 1975. The complex envelope in seismic signal analysis, *Bull. Seismic Soc. Am.* 65, 951-962.
- Foster, M, R., and Guinzy, N, J., 1967, The coefficient of coherence: its estimation and use in geophysical data processing: *Geophysics*, v 32, p. 602-616.
- Fitch, A, A., 1979, Developments in geophysical exploration mehtods-1, Applied science publishers ltd, London. p. 20-34
- Gadallah, Mamdovh R, 1994, Reservoir seismology: geophysics in nontechnical language. Pennwell Publishing Company. Tulsa, Oklahoma.

- Garotta, R., and Michon, D., 1967, Geophys. Prospecting, 15, p 584.
- Garotta, R., 1971. Selection of seismic picking based upon the dip, move-out and amplitude of each event: Geophys. Propsp., 19, 357-370.
- Green, P. E., Kelly, E. J., and Levin, M. J., 1966, A comparison of seismic array processing methods : Geophys. J. of R.A.S., v. 11, p. 67-87.
- Haldorsen, J. B., and Farmer, P. A., 1989, Suppression of high-energy noise using an alternative stacking procedure: Geophysics, v54, p. 181-190.
- Houston, L. M., and Potter, J. R., 1992, Multiple suppression using a local coherence filter: 62nd annual international SEG meeting/ New Orleans.
- Kendall, M. G., 1948, The advanced theory of statistics, v. 1 and 2 : London, Griffin Co. Ltd.,
- Lynn, W., Doyle M., Lerner, K., and Marshall, R., 1987, Experimental Investigation of Interference from other seismic crews: Geophysics, 52, 1501-1524.
- Lu, Shin-ye., and Cheng, Yoa-chou, 1990, An iterative approach to seismic skeletonization: Geophysics, v.55, p. 1312-1320.
- Mayne, W. H., 1962, Common reflection point horizontal stacking techniques: Geophysics, v.27, p. 927-938.
- Mendenhall, et al., 1981. Mathematical statistics with applications Scnd. Ed. P.W.S. Publisher.
- Miller, D. R., 1992 Normal moveout stretch mute on shallow-reflection data. Geophysics, v.57, p. 1502-1507.
- Naess, O. E., 1979, Superstack- an iterative stacking algorithm : Geophys. Prosp., 27. 16-28.
- Neidell, N. S., 1969, Ambiguity functions and the concept of geological correlation : Preprint, Computer Applications Symposium, AAPG, Dallas.
- Neidell, N. S., and Taner, M. T., 1971, Semblance and other coherency measures for multichannel data: Geophysics, v. 36, p. 482-497.
- Paulson, K.V. y Merdler, S.C., 1968, Automatic seismic reflection picking : Geophysics, 33.
- Pelto, C. R., 1954, Mapping of multicomponent system : J. of Geol., v. 62, p. 501-511.
- Pokhriyal, S. K., 1992, An Efficient Algorithm for Automatic Seismic Data Editing : 62nd Ann. Internat.

- Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts.
- Pokhriyal, S. K., Nautiyal, A., and Gupta, O. P., 1993, A new algorithm for automatic editing of noisy seismic data: 62nd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. geophys., Expanded Abstracts.
- Reiter, E. C., Toksoz, M. N., and Purdy, G. M., 1993, A semblance-guided median filter: Geophysical Prospecting, v. 41, p. 15-41.
- Ronquillo, J.G. (1991). Determinación de los coeficientes de reflexión y transmisión de las ondas sísmicas en función del ángulo de incidencia. Informe final, Proyecto CAO-6513, Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), pp1-107.
- Robinson, E. A. and Treitel 1980, Geophysical signal analysis. Prentice-Hall signal processing series.
- Schneider, W. A., and Backus, M., 1968, Dynamic correlation analysis: Geophysics, v.33, p.105-126.
- Sheriff, R. E. y Geldart, L. P., 1991: Historia, teoría y obtención de datos, Exploración Sismológica Vol. 1; Procesamiento e Interpretación de Datos, Exploración Sismológica Vol. II, Editorial Limusa.
- Sherwood J. W., and Poe, P. H., 1972, Continuous Velocity estimation and seismic wavelet processing: Geophysical, v.37, p. 769-787.
- Shon, H., 1990, Seismic multiple deconvolution using the multipulse model : Thesis, Duke Univ.
- Shon, H., and Yamamoto, T., 1992, Simple data processing for seismic section noise reduction: Geophysics, v. 57, p. 1064-1067.
- Simpson, S. M., Jr., 1967, Traveling signal-to-noise ratio and signal power estimates: Geophysics, v.32, p. 485-493.
- Simpson, S. M., Jr., 1955, Similarity of output traces as a seismic operator criterion : Geophysics, v. 20, p. 254-269.
- Sinvhal, A., and Sinvhal, H., 1992, Seismic modelling and pattern recognition in oil exploration: Kluwer Academic Publishers.
- Society of Exploration Geophysicist, 1990. Velocity Analysis on Multichannel Seismic Data. Geophysics reprint series No. 12.
- Taner, M. T., and Koheler, F., 1969, Velocity spectra-digital computer derivation and applications of

- velocity function: *Geophysics*, v. 34, p. 859-881.
- Taner, M. T., Koheler, F., and Sheriff, R. E., 1979, Complex seismic trace analysis: *Geophysics*, v. 44, p. 1041-1063.
- Vinther, Rikke., et.al., ?, Seismic texture classification: A computer-aided approach to stratigraphic analysis: University of Copenhagen.
- Wang, H., 1990, Noise elimination by the use of vector resolution: *Geophysics*, v.55 p. 1191-1201.
- Watt, T., y Bednar, J. B., 1983, Role of the alpha-trimmed mean in combining and analyzing seismic common depth-point gathers : 53rd Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 276-277.
- Wiggins, R. A., Larner, K. L., and Wisecup, R. D., 1976, Residual statics analysis as a general linear inverse problem : *Geophysics*, 41, 922-938.
- Word Oil, January 1984, Vol.198 No.1.
- Yamamoto, T., Shon, H., and Goodman, D., 1991, High-resolution subbottom imaging using a reflection system : Seismic/ radar section interpretation by data transformation : Proc. IEEE Oceans, 91, 425-429
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing, in Doherty, S.M., Ed., Neitzel, E. B., series Ed., Series: Investigations in geophysics, no. 2: Soc. Expl. Geophys.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de una formación profesional.

El tener como director de tesis al M.C. Jorge Mendoza Amuchástequi fue para mí muy motivante, mi más sincero agradecimiento por su valiosa colaboración y apoyo brindado.

Un especial agradecimiento al gerente de Prospección Geofísica del Instituto Mexicano del Petróleo, M.C. Héctor Palafox Rayón y al Ing. José Jaime Ruiz Hernández por todo el apoyo brindado.

Asimismo, quiero expresar un amplio reconocimiento a M.C. Carlos Ortiz Alemán, M.C. Juan Brandi Purata, M.C. Andrés Tejero Andrade, M.C. Rodolfo Marines y M.C. Rubén Rocha, por sus objetivas críticas y atinadas sugerencias.

Un franco agradecimiento a mis compañeros de Sismología del Instituto Mexicano del Petróleo.

APÉNDICE I

DISEÑO DEL FILTRO DE SEMBLANZA PARA EVALUAR ANÁLISIS DE VELOCIDADES

Se asume que el número de trazas $f_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) corresponden a diferentes valores de x , todos conteniendo la señal común $S(t)$ del mismo reflector pero arribando a diferentes tiempos. Si el tiempo de retraso es τ_i y si todas las trazas contienen sólo la señal, el tiempo de retraso puede ser encontrado teóricamente como la solución de un problema de maximización:

$$E(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M) = \sum_i \left[\sum_j f_i(t + \tau_i) \right]^2, \quad \text{I.1}$$

Entonces el máximo de $E(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M)$ es obtenido para $\tau_i = t_i$. Si se agrega ruido a la señal $S(t)$ que contiene las trazas, el criterio de maximización $E(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M)$ puede ser usado para proporcionar la estimación de los tiempos de arribo de la señal coherente.

En lugar de la función definida en 1.1 la suma de croscorrelaciones entre pares de trazas con tiempos de retraso variable puede ser usada:

$$C(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M) = \sum_t \sum_{i,j} f_i(t + \tau_i) f_j(t, \tau_j), \quad \text{I.2}$$

La suma interior se desarrolla sobre los índices de los pares (i, j) . Las ecuaciones E y C son relacionadas por:

$$2C = E - \sum_i \sum_i f_i^2(t), \quad \text{I.3}$$

Una forma normalizada de la función E es conocida como la semblanza, y se considera la gran utilidad de esta función.

$$P(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M) = \frac{E}{M \sum_i \sum_i f_i^2(t)}, \quad \text{I.4}$$

La función P varía en el rango de $0 < P < 1$. Con el efecto de normalización el coeficiente de semblanza da una medida de la coherencia, independiente del número de trazas consideradas, es

decir, la función P no cambia si el conjunto de trazas $f(t)$ son remplazadas por $f(t)$, para cualquier valor del escalar. Es importante considerar que la semejanza es sensitiva a la variación de amplitud en el conjunto de trazas a diferencia de la cocorrelación normalizada.

Para la aplicación en la identificación de velocidades, el tiempo de retraso se considera el valor de la aproximación de la ecuación $t^2(x) = C_1 + C_2 x^2 + C_3 x^4 + C_4 x^6 + \dots$, con dos términos C_1 asociado al tiempo doble de incidencia normal $t(0)$ y C_2 la velocidad rms V_n .

Así, se tiene una forma sencilla de calcular los valores para las relaciones de E , C o P , como funciones de V y la selección del valor de V proporciona el máximo buscado.

APÉNDICE II

TRAZA SÍSMICA COMPLEJA

SIGNIFICADO FÍSICO DE LA SEÑAL SÍSMICA ANALÍTICA

El análisis en tiempo de una traza sísmica como una señal analítica se conoce como traza sísmica compleja. Es una técnica de transformación que proporciona gran utilidad en problemas de interpretación. El análisis de las trazas complejas se puede usar en convolución, correlación, coherencia y otros procesos para facilitar la interpretación de la señal. A partir de la traza compleja se puede separar información de amplitud, frecuencia, fase, polaridad, en función del tiempo y son conocidos como atributos sísmicos. (Taner et al., 1979). La traza sísmica se puede representar como la parte real de la función compleja, es expresada como:

$$f(t) = A(t) \cos \theta(t) .$$

y el espectro de cuadratura de la señal $f(t)$ es la parte imaginaria está dada por:

$$f^*(t) = A(t) \operatorname{sen} \theta(t) .$$

Entonces la señal analítica puede definirse como la representación compleja en tiempo de $F(t)$ así:

$$F(t) = f(t) + i f^*(t) ,$$

El término $f^*(t)$ depende únicamente de $f(t)$ y se calcula mediante la transformada de Hilbert (Bracewell, 1978) que relaciona la expresión:

$$f(t) = 1/\pi t * f(t) .$$

entonces:

$$F(t) = [f(t) + i/\pi t] * f(t) .$$

La señal analítica $F(t)$ se representa como una señal en el espacio complejo de un vector que cambia continuamente de longitud y dirección, generando una espiral irregular. La parte real e imaginaria se representan por la proyección de los vectores en el plano real e imaginario.

Con el análisis de la señal analítica se puede obtener la envolvente de amplitud que es la parte moduladora de la amplitud de la señal. Contiene la contribución más importante de energía de la señal. La envolvente está dada por $A(t)$ y se define como la amplitud de la señal analítica y es independiente de su fase:

$$A(t) = [t^2(t) + f(t)]^{1/2},$$

$A(t)$ Amplitud instantánea.

$$\text{y } \theta(t) = \arctan \left[\frac{f^*(t)}{f(t)} \right],$$

$\theta(t)$ Fase instantánea.

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt},$$

$\omega(t)$ Frecuencia instantánea.

Estas ecuaciones se calculan para cualquier valor puntual de muestras.

Una traza sísmica representa el movimiento de las partículas respecto a su posición de equilibrio e involucra la energía cinética y entonces la traza sísmica real $f(t)$ es una medida de esta energía. El movimiento de la partícula en el medio elástico almacena energía potencial. Una partícula en movimiento y reposo contiene estas energías. La traza de cuadratura $f^*(t)$ puede ser vista como una medida de la energía potencial, como consecuencia $A(t)$ es proporcional a la raíz cuadrada de la energía total; por esta razón representa la energía máxima de la señal.

La traza sísmica compleja no cambia las propiedades de amplitud, fase, y frecuencia en datos apilados; es simplemente una forma para hacer más fácil la interpretación de secciones apiladas. Son cantidades que se calculan punto a punto.

USOS DE LA TRAZA COMPLEJA

Los atributos sísmicos de amplitud, fase, frecuencia y polaridad son definidos como las propiedades de una traza sísmica. Una interpretación estratigráfica de datos sísmicos relaciona los cambios de atributos con las condiciones geológicas del subsuelo. Por ejemplo cambios menores de amplitud y fase frecuentemente diagnostican cambios de litología, espesor de yacimientos, contenido de porosidad, etc., se relacionan para calibrar las condiciones del subsuelo con los datos sísmicos. Una interpretación sísmica estratigráfica se basa en la interpretación de variaciones pequeñas de

patrones de reflexión para la interpretación e identificación de facies sísmicas y determinación de ambientes de depósito.

Existen diferentes características para interpretar los atributos sísmicos entre los cuales tenemos:
Para la envolvente de amplitud; es independiente de la fase, la máxima amplitud reflectiva puede ocurrir en lugares diferentes donde la amplitud es máxima de la traza sísmica real. Es útil para evaluar acumulaciones de gas.

La fase instantánea; es independiente de la envolvente de amplitud, enfatiza la continuidad de los eventos de reflexión. Como es un valor puntual en tiempo su interpretación es diferente al concepto de fase en función de frecuencia. Un mismo color se le asigna a las crestas, valles y cruces por cero en los desplegados de fase. Las gráficas de fase facilitan el marcado de eventos coherentes débiles. Se utiliza para analizar fallas, discontinuidades, acuíferos, eventos con diferentes buzamientos.

La frecuencia instantánea; también es un valor puntual de tiempo. El carácter de la frecuencia proporciona una buena herramienta de correlación litológica, cambia gradualmente en función de los espesores y litología. tiende a caracterizar los patrones de interferencia que resultan de reflectores muy cercanos entre sí. Los cambios hacia bajas frecuencias se han observado en acumulaciones de gas en arenas.

En la polaridad aparente; es sensitiva a la calidad de los datos. Asume un reflector único, ondícula de fase cero y no ambigüedad a la inversión de fase. Distingue algunas veces entre diferentes tipos de puntos brillantes; contactos gas-aceite, gas-agua.

APÉNDICE III

PROGRAMA DE APILADO PARCIAL

```
dimension s(800,640),x(800,640)
open(10,file='reyna1')
open(20,file='pstrkr1')
nr=1
nt=78
nm=750
nstk=750
do k=1,nr
  do j=1,nt
    read(10,*)(s(i,j),i=1,nm)
  end do
  do i=1,nm
    do j=1,nt
      acum=0.0
      kont=0
      do jj=1,j
        acum=acum+s(i,jj)
      end do
      c Se realiza el proceso de pilado parcial
      x(i,j)=acum/j
    end do
  end do
  do j=1,nt
    do i=1,nstk
      if(s(i,j).eq.0.0)then
        x(i,j)=0.0
      end if
    end do
    write(20, '(8f10.1)')(x(i,j),i=1,nstk)
  end do
end do
end
```

APÉNDICE IV

PROGRAMA DE SUPRESIÓN AUTOMÁTICA DE DISTORSIÓN DINÁMICA

```
dimension g(1000,640),st(640),st2(1000,640),cn(640),cn2(1000,640)
dimension xclass(1000),clas2(800,640),imax2(1000)
real fac,prom
integer imaximo(1000),imt(1000),mt2(1000)
integer fx1(1000),fx2(1000),lmi(1000),imax2(1000)
character*20 filin,filout,filout2,filout3,filout4,filout5
print *, 'numero de muestras/traza ?'
read *,nm
print *, 'long. de la ventana de correlacion [mseg.] ?'
read *,ven
print *, 'numero de puntos de suavizamiento ?'
read *,npts
print *, 'tiempo inicial de analisis ? [mseg.]'
read *,slr
print *, 'tiempo final de analisis ? [mseg.]'
read *,stp
print *, 'intervalo de muestreo ? [mseg.]'
read *,dt
print *, 'archivo de entrada ?'
read *,filin
print *, 'archivo de salida ?'
read *,filout
c print *, 'archivo de salida de croscorrelacion ?'
c read *,filout1
print *, 'archivo de salida para los maximos?'
read *,filout2
print *, 'archivo de clasificacion de semejanza?'
read *,filout3
print *, 'matriz de clasificacion de semejanza?'
read *,filout4
c print *, 'lit ytraza promedio en ventana de 40 mseg ?'
c read *,filout5
print *, 'traza entre fx1 y fx2?'
read *,filout6
open(10,file=filin)
open(20,file=filout)
c open(30,file=filout1)
open(40,file=filout2)
open(50,file=filout3)
open(60,file=filout4)
c open(70,file=filout5)
open(100,file=filout6)
mmult=78
```

```

c      ven: long. de la ventana de semblanza
c      str: tiempo de inicio de zona de calculo
c      stp: tiempo final de zona de calculo
c
      do j=1,mmult
        read(10,*)(g(i,j),i=1,nm)
      end do
      kont=0
      win=0
      lven=ven/dt+1
      istr=str/dt+1
      istp=stp/dt+1
      do indx=istr,(istp-lven)
        kont=kont+1
        xsuma1=0.0
        xsuma2=0.0
        ini=indx
        ifi=ini+lven
        do nt=1,mmult
          sum3=0.0
          sum4=0.0
          do it=ini,ifi
            sum1=0.0
            sum2=0.0
            do jc=1,nt
              sum1=sum1+g(it,jc)
              sum2=sum2+g(it,jc)*g(it,jc)
            end do
            sum3=sum3+(sum1*sum1)
            sum4=sum4+sum2
          end do
          xnt=1.0*float(nt)
        end do
        calculo de la semblanza
        if(abs(sum4).gt.0.0)then
          st(nt)=(1.0/xnt)*(sum3/sum4)
          st2(kont,nt)=st(nt)*1000
        end if
        dentro de la ventana de tiempo it se acumulan xsuma1
        xsuma2 para el calculo posterior de estadisticos
        xsuma1=xsuma1+st(nt)
        xsuma2=xsuma2+(st(nt)*st(nt))
      end do
      else
        st(nt)=0.0
      end if
      mediante st(nt) calculamos la coherencia simple.
      st(nt)=sum1/(ifi-ini+1)
      con cn(nt), se calcula la croscorrelacion normalizada.
      n(nt)=(sum3-sum2)/(nt*sum4)
    end do

```

```

C
C      una vez que termino en la ventana de tiempo it se calculan
C      los valores de :
C      xmed= mediana
C      xss2= desviacion estandar
C      cr= coeficiente de ruido o (cv) de variacion
C
C      xmed=xsuma1/float(mmult)
C      xss=0.0
C      do nt=1,mmult
C          xss=xss+(st(nt)-xmed)**2
C      end do
C      xss2=xss/float(mmult)-1)
C      xdev=xss2**0.5
C      cv=xdev/xmed
C
C      se establecen los limites sobre los que se realizara la
C      clasificacion de st(nt) con rmin y rmax
C
C      rmax=xmed+0.2*xmed
C      rmin=xmed-0.2*xmed
C
C      se inicia la clasificacion de st(nt)
C
C      rmin< st (nt) <rmax .....1.0
C      st (nt)< rmin .....0.0
C      st (nt)> rmax .....2.0
C
C      do nt=1,mmult
C          if(st(nt).ge.rmin.and.st(nt).le.rmax)then
C              st(nt)=1.0
C          else
C              if(st(nt).lt.rmin)then
C                  st(nt)=0.0
C              else
C                  st(nt)=2.0
C              endif
C          endif
C      end do
C      do nt=1,mmult
C          xclass(nt)=st(nt)
C          do i=1,kont
C              clas2(kont,nt)=xclass(nt)
C          end do
C      end do
C
C      se calcula vector de clasificacion
C
C      do nt=1,mmult
C          tie=(kont*dt)+200.0
C          write(50,*)kont,tie,nt,xclass(nt)
C      end do
C      do nt=1,mmult
C          st2(kont,nt)=st(nt)*1000.0
C          cn2(kont,nt)=cn(nt)
C      end do
C      end do

```

```

c      print *, 'kont=', kont
c
c      se calcula matriz de clasificacion
c
c      do i=1, kont
c          write(30, *) (cn2(i, j), j=1, mmult)
c          write(60, '(8f10.4)')(clas2(i, j), j=1, mmult)
c      end do
c
c      proceso para encontrar la traza promedio en ventana de 40 mseg
c      una vez establecida la clasificacion xclass(nt)=0.0, este valor
c      esta asociado a las trazas con efecto del nmo streching
c
c      do i=1, kont, 10
c          tie=(kont*4.0)+200.0
c          sumw1=0.0
c          sumw=0.0
c          promw=0.0
c          do j=i, 10
c              do nt=2, mmult
c                  if (xclass(nt).eq.0.0.and.xclass(nt-1).ne.0.0)then
c                      sumw1=xclass(nt)
c                      else
c                          end if
c                  end do
c                  sumw=sumw+sumw1
c              end do
c              promw=sumw/10.0
c          write(70, *) kont, tie, nt, promw
c          end do
c
c          call norma(st2, kont, mmult)
c          call smooth(st2, kont, mmult, npts)
c          do i=1, kont
c              write(20, '(8f10.4)')(st2(i, j), j=1, mmult)
c          write(30, *) (cn2(i, j), j=1, mmult)
c          end do
c          call maximo(st2, kont, mmult, imaximo)
c
c          proceso para la traza promedio en ventana de
c          40 mseg (se puede generalizar a cualquier long.
c          de ventana.)
c
c          do i=1, 75
c              prom=0
c              do j=1, 10
c                  prom=prom+imaximo(j+10*(i-1))
c              end do
c              do j=1, 10
c                  imax2(j+10*(i-1))=prom/10.0
c              end do
c          end do
c
c          do j=1, kont
c              fac=200.0+(j*dt)
c              write(40, *) j, fac, imaximo(j), imax2(j)
c          end do

```

C
C
C
C
C

proceso que elige la traza asociada con semblanza $imax2(j)$
entre los limites de $fx1$ y $fx2$, que definen una area de
posible solucion para el mute automatico.

```
call strtme (mmult,imt,mt2)
  do j=1,kont
    if(imax2(j).ge.imt(j).and.imax2(j).le.mt2(j))then
      tm1=imax2(j)
      tm(j)=tm1
    else
      if(imax2(j).lt.imt(j))then
        tm2=imt(j)
        tm(j)=tm2
      else
        tm3=mt2(j)
        tm(j)=tm3
      end if
    end if
  end do
do j=1,kont
  fac=(j*4.0)+200.
  write(100,*)j,fac,tm(j)
end do
end
```

C

```
subroutine norma(st2,kont,mmult)
dimension st2(1000,120)
smax=0.0
  do i=1,kont
    do j=1,mmult
      if(st2(i,j).gt.smax)smax=st2(i,j)
    end do
  end do
  do i=1,kont
    do j=1,mmult
      st2(i,j)=st2(i,j)/smax
    end do
  end do
return
end
```

```
subroutine smooth(v1,nrow,ncol,npts)
dimension v1(1000,120),v2(1000,120)
npth=npts
nptv=npts
ls=npth/2
li=-ls
```

C
C
C

promedio en la direccion horizontal

```
  do i=1,nrow
    do j=1,ncol
      sum=0.0
      cont=0.0
      do k=li,ls,1
        j2=j+k
```

```

                                if(j2.ge.1.and.j2.le.ncol)then
                                    sum=sum+v1(i,j2)
                                    cont=cont+1.0
                                end if
                            end do
                        v2(i,j)=sum/cont
                    end do
                end do
c
c
                promedio en la direccion vertical
c
                if(nptv.ge.3)then
                    ls=nptv/2
                    li=ls
                    do j=1,ncol
                        do i=1,nrow
                            sum=0.0
                            cont=0.0
                            do k=li,ls,1
                                i2=i+k
                                if(i2.ge.1.and.i2.le.nrow)then
                                    sum=sum+v1(i2,j)
                                    cont=cont+1.0
                                end if
                            end do
                            v2(i,j)=(v2(i,j)+sum/cont)/2.0
                        end do
                    end do
                end if
                do i=1,nrow
                    do j=1,ncol
                        v1(i,j)=v2(i,j)
                    end do
                end do
                return
            end
c
                subroutine maximo(matriz,nr,nc,imax)
c
c
                obtiene la traza por gradiente (pendiente)
c
                dimension matriz(1000,120),w(1000,120)
                integer imax(1000)
c
                write(*,*)nelem
                imax(1)=1
                do i=2,nr-1
                    do j=2,nc-1
                        w(i,j)=10.0*abs(matriz(i,j+1)-matriz(i,j-1))
                        if(abs(w(i,j))gt.abs(w(i,j-1)).and.j.le.imax(i-1)+7)then
                            imax(i)=j
                        end if
                    end do
                end do
c
                imax(1)=imax(2)
                imax(nr)=imax(nr-1)
                return
            end

```


C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C

234567

SUBROUTINA DE STARTIMES

proceso para generar una funcion stim asociada a valores de tiempo de startimes como limite inferior y una funcion stm2 como limite superior que se eligira con cierto criterio de limite(por ejemplo 100mseg. de retraso en el tiempo inicial(tini) con respecto al tiempo inicial (tini) de la funcion stim.

```
subroutine strtime (mmult,imt,mt2)
dimension s(1000,78)
integer itim(78),itm2(78),imt(1000),mt2(1000)
tini=200.0
tfin=2300.0
dt=4
kont=490
delt=tfin-tini
ntraza=78
nint=ntraza-1
tinc=delt/nint
do j=1,78
    stim=tinc*j-tinc
    stm2=stim+200.0
    itim(j)=stim/dt+1.0
    itm2(j)=stm2/dt+1.0
c      print *,'traza=',j,' muestra=',itim(j)
c      print *,'traza=',j,' muestra=',itm2(j)
end do
icon=0
do j=1,77
    linf=itim(j)
    lsup=itim(j+1)-1
    do i=linf,lsup
        imt(i)=j
        icon=icon+1
    end do
end do
do i=1,icon
    fac=(i*.4)+200
    print *,'muestra=',i,' fac=',traza=',imt(i)
end do
ic=24
do j=1,77
    linf=itm2(j)
    lsup=itm2(j+1)-1
    do i=linf,lsup
        mt2(i)=j
        ic=ic+1
    end do
end do
do i=24,ic
    print *,'muestra=',i,' traza=',mt2(i)
end do
return
end
```

C
C
C