



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

Acondicionamiento de datos sísmicos y  
atenuación de huella de adquisición

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA GEOFÍSICA

PRESENTA:  
MAYRA CUELLAR URBANO

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. SERGIO CHÁVEZ PÉREZ

Junio 2012



*A mis papás, Ade y Don Fer.*

# Índice

Resumen . . . . .	I
Abstract . . . . .	II
Introducción . . . . .	1
<b>1. Origen de la huella de adquisición</b>	<b>3</b>
<b>2. Acondicionamiento de datos sísmicos</b>	<b>7</b>
2.1. Suavizamiento de imágenes . . . . .	8
2.1.1. Filtros lineales . . . . .	8
2.1.2. Filtro de Kuwahara . . . . .	11
2.1.3. Filtros no lineales . . . . .	13
<b>3. Atributos geométricos</b>	<b>18</b>
3.1. Coherencia . . . . .	19
3.2. Curvatura . . . . .	23
<b>4. Atenuación de huella de adquisición</b>	<b>26</b>
4.1. Atenuación guiada por atributos . . . . .	27

4.1.1. Caracterización de la huella de adquisición . . . . .	30
4.1.2. Filtro de ranuras . . . . .	32
4.1.3. Sustracción adaptable . . . . .	33
<b>5. Cálculo de atributos mejorados</b>	<b>42</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>48</b>
Agradecimientos . . . . .	50
Referencias . . . . .	52

# Índice

Resumen . . . . .	I
Abstract . . . . .	II
Introducción . . . . .	1
<b>1. Origen de la huella de adquisición</b>	<b>3</b>
<b>2. Acondicionamiento de datos sísmicos</b>	<b>7</b>
2.1. Suavizamiento de imágenes . . . . .	8
2.1.1. Filtros lineales . . . . .	8
2.1.2. Filtro de Kuwahara . . . . .	11
2.1.3. Filtros no lineales . . . . .	13
<b>3. Atributos geométricos</b>	<b>18</b>
3.1. Coherencia . . . . .	19
3.2. Curvatura . . . . .	23
<b>4. Atenuación de huella de adquisición</b>	<b>26</b>
4.1. Atenuación guiada por atributos . . . . .	27

4.1.1. Caracterización de la huella de adquisición . . . . .	30
4.1.2. Filtro de ranuras . . . . .	32
4.1.3. Sustracción adaptable . . . . .	33
<b>5. Cálculo de atributos mejorados</b>	<b>42</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>48</b>
Agradecimientos . . . . .	50
Referencias . . . . .	52

## Resumen

La huella de adquisición es ruido altamente correlacionable con el arreglo geométrico empleado en la adquisición sísmica, tanto en datos sísmicos marinos como terrestres, y es fácil confundirla con fallas, fracturas y rasgos litológicos. En general, la huella de adquisición es más fuerte en secciones someras donde se tiene menor apilamiento, mayor variación en la corrección de sobretiempo normal (NMO) y mayor sensibilidad a velocidades inadecuadas. Prevalece a pesar de las medidas tomadas durante la adquisición y el procesamiento de datos.

En este trabajo utilizo datos sísmicos de PEMEX Exploración y Producción con el fin de ilustrar el acondicionamiento de datos sísmicos para suprimir ruido coherente y aleatorio con filtros lineales. Después, calculo atributos geométricos empleados en la estimación de ruido relacionado con la huella de adquisición. Estos atributos sísmicos geométricos son sensibles a cambios laterales de amplitud asociados a la huella de adquisición y suelen exagerarla.

Utilizo atributos geométricos de coherencia y curvatura que resaltan estructuras geológicas sutiles para realzar los componentes relacionados con la huella de adquisición. La metodología consiste en identificar la huella de adquisición a través de filtrado en el dominio del número de onda, para caracterizar y obtener un volumen de ruido estimado.

Utilizo sustracción adaptable entre el volumen original de datos sísmicos y la huella estimada para obtener un volumen con huella de adquisición atenuada, preservando información relacionada con estructuras geológicas en los datos sísmicos. Con este flujo de trabajo busco facilitar la labor del intérprete y mejorar los datos para su posterior tratamiento.

## Abstract

Acquisition footprint is highly correlated noise to the geometric array of sources and receivers used for onshore and offshore seismic acquisitions. This pattern, throughout the image, is easily confused with faults, fractures, and some lithologic features. It is generally stronger in shallow sections with irregular fold patterns, varying fold in the normal moveout correction (NMO) and sections with more sensitivity to inappropriate velocity models. It prevails in spite of measures taken during acquisition and data processing. In this work, I use seismic data from PEMEX Exploración y Producción to show the conditioning process for removing random and coherent noise using linear filters.

Then, I compute geometric attributes used in a workflow for obtaining an acquisition footprint noise model. These geometric seismic attributes are sensitive to lateral amplitude changes associated to footprint acquisition and tend to enhance it. I use similarity and curvedness attributes, which usually exacerbate subtle geological structures and, for this matter, components related to acquisition footprint. The methodology consists in identifying the acquisition footprint through a wavenumber domain filter to characterize and obtain a volume of estimated noise from the seismic volume.

I use adaptive subtraction between the original seismic data volume and the estimated footprint volume, to preserve information related to geological structures in seismic data. This workflow aims to ease the interpreter's work and helps improve subsequent data processing.

# Introducción

Actualmente las adquisiciones sísmicas 3D son una herramienta muy importante en la exploración de hidrocarburos en PEMEX Exploración y Producción. Durante la delimitación de facies y estructuras, la huella de adquisición enmascara y suele generar falsos rasgos de interés como pudieran ser canales, fracturas y fallas, lo que entorpece el realce de lineamientos relacionados con estructuras geológicas y, por lo tanto, su uso en la elección de horizontes para la interpretación y caracterización del yacimiento. Durante la adquisición y el procesamiento se genera ruido incluso después de considerar las medidas necesarias para minimizarlo.

La adquisición 3D es muy relevante en la exploración de hidrocarburos y en la planeación de localizaciones de perforación para extracción. Esto se traduce en mayor incertidumbre en la elección del sitio y en el costo de la exploración y explotación. Para minimizar el factor de riesgo es necesario obtener más información a partir de los datos sísmicos adquiridos. Después del procesamiento convencional, los datos aún suelen presentar ruido inherente a la adquisición y en este trabajo sigo una metodología para eliminar ruido relacionado con la adquisición en una etapa de postprocesamiento de datos migrados en tiempo después de apilar. Utilizo herramientas de mejoramiento de imágenes con las que suprimo también otros tipos de ruidos para mejorar la representación sísmica y evitar que se generen artefactos numéricos que alteran el resultado de posteriores cálculos de inversión de impedancia o cálculos de AVO (*Amplitud contra distancia fuente a receptor*, por las siglas en inglés de *Amplitude Versus Offset*).

El geocientífico se encarga de generar mapas y perfiles a partir de imágenes sísmicas que representen el subsuelo. Estas representaciones sísmicas son utilizadas en la

interpretación geológica, estructural y litológica del subsuelo, con el fin de hallar objetivos para la explotación de hidrocarburos y así elegir los sitios más favorables de extracción de gas, aceite, e hidrocarburos no convencionales. Esta etapa involucra el trabajo y criterio humano basado en el conocimiento geológico y geofísico.

Todos los datos sísmicos terrestres y marinos presentan huella de adquisición, siendo más evidente en los datos terrestres. La presencia de este ruido de adquisición dificulta la interpretación de rasgos estratigráficos y estructurales en horizontes sísmicos y rebanadas de tiempo. El conocimiento de los fundamentos de adquisición y procesamiento ayudan en la comprensión de las causas que ocasionan la huella de adquisición y proporcionan información sobre las posibles metodologías a seguir para su eliminación. La huella de adquisición no es atribuible a solamente una causa, es resultado de varias decisiones tomadas durante la adquisición y el procesamiento. Usualmente es confundida con rasgos geológicos aparentes en la información sísmica que puede generar una interpretación geológica errónea.

La metodología que utilizo está basada en el trabajo de Kurt J. Marfurt y Oswaldo Davogustto de la Universidad de Oklahoma, EEUU (Marfurt et al.,2011), y acerca de la atenuación de huella de adquisición guiada por atributos utilicé la paquetería del *Consortio AASPI (Attribute-Assisted Seismic Processing and Interpretation) (2011) de la Universidad de Oklahoma, EEUU*. Describo el origen de la huella de adquisición y el acondicionamiento para atenuar ruido aleatorio presente en los datos. Dado que la metodología de atenuación es guiada por atributos sísmicos geométricos, describo el fundamento de los atributos de coherencia y curvatura y aplico la metodología de atenuación de huella de adquisición para obtener atributos sísmicos geométricos mejorados, y así mejorar la representación sísmica del volumen de datos migrados en tiempo del Área Vigilante<sup>1</sup> y del cálculo de atributos para su posterior interpretación.

---

<sup>1</sup>El volumen de datos sísmicos está acotado por las líneas longitudinales 5840 a 6190; las líneas transversales 7718 a 7934; y tiempo 0 - 2 s. El tamaño de las celdas es 20 m x 20 m, el área total es de 75.6 km<sup>2</sup>.

# Capítulo 1

## Origen de la huella de adquisición

La huella de adquisición es cualquier patrón de ruido altamente correlacionable con la distribución geométrica de fuentes y receptores en la superficie terrestre. Este patrón repetitivo se genera debido a la periodicidad de las distancias fuente a receptor (*offset*) dentro de cada celda (*bin*) formada por las líneas de receptores y fuentes. Así, la huella es resultado de las decisiones tomadas antes, durante y después de la adquisición. Es necesario entender su origen para ser capaz de identificarla y posteriormente eliminarla.

El diseño de adquisición define la distribución particular de celdas y de sus propiedades (Fig. 1.1), tales como apilamiento, azimut y distancia fuente a receptor, parámetros que se suponen constantes, pero que en realidad es difícil que lo sean. Estos parámetros están definidos por los intervalos  $E$  entre fuentes y  $e$  entre receptores, de éste último depende la huella de adquisición. El equipo que se encarga de la disposición de fuentes y receptores en el campo se encuentra con obstrucciones, zonas inaccesibles que limitan la adquisición o que impiden que sea del todo simétrica, y diversas fuentes de ruido ambiental y cultural.

La huella también es causada por arribos de ondas convertidas, múltiples, ruido generado por fuentes de adquisición, modelos inadecuados de velocidad de procesamiento, correcciones estáticas deficientes, ruido coherente, patrones irregulares de

$e^2$  = intervalo de geófonos (x,y)  
 $n^2$  = número de geófonos por grupo  
 $E$  = Intervalo de los grupos de fuentes y receptores (x,y)

$$E = n^2 e^2$$

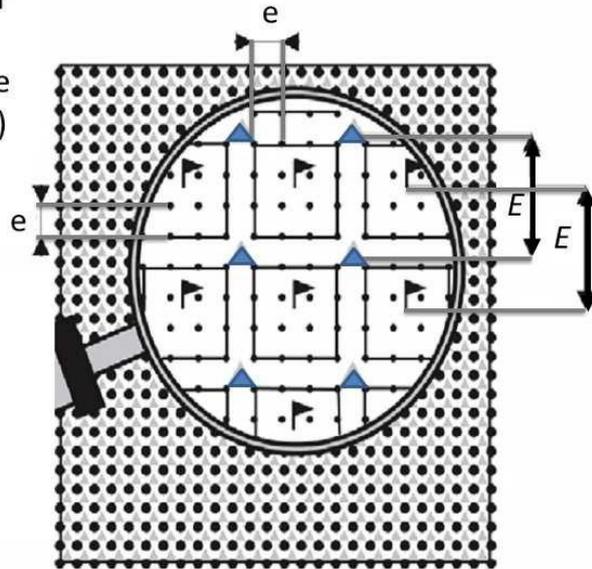


Figura 1.1: Diseño de adquisición óptimo (adaptado de Meunier, 2011) con una disposición de fuentes y receptores con una distancia fuente a receptor  $E$ .

apilamiento, entre otros (Hill et al., 1999). Además, el ruido aleatorio contribuye a variaciones laterales de amplitud traza a traza entre los conjuntos apilados por punto medio común (CMP por las siglas en inglés de *Common Midpoint*). Aunque la huella es más fuerte en secciones someras donde hay menor apilamiento y huecos de información debido a submuestreo (Falconer y Marfurt, 2008), es visible aún a mayor profundidad (Cvetkovic et al., 2008).

En la Fig. 1.2 indico con flechas dónde es más evidente la huella de adquisición para un tiempo de 0.4 s y 0.5 s. Al comparar ambas rebanadas es posible observar cómo cambia el carácter de los rasgos relacionados con la huella conforme avanza en tiempo. Este patrón es visible aún en las secciones transversales afectando la continuidad de los reflectores u ocultando rasgos geológicos.

En algunos volúmenes de datos sísmicos es más fácil de identificar huella de ad-

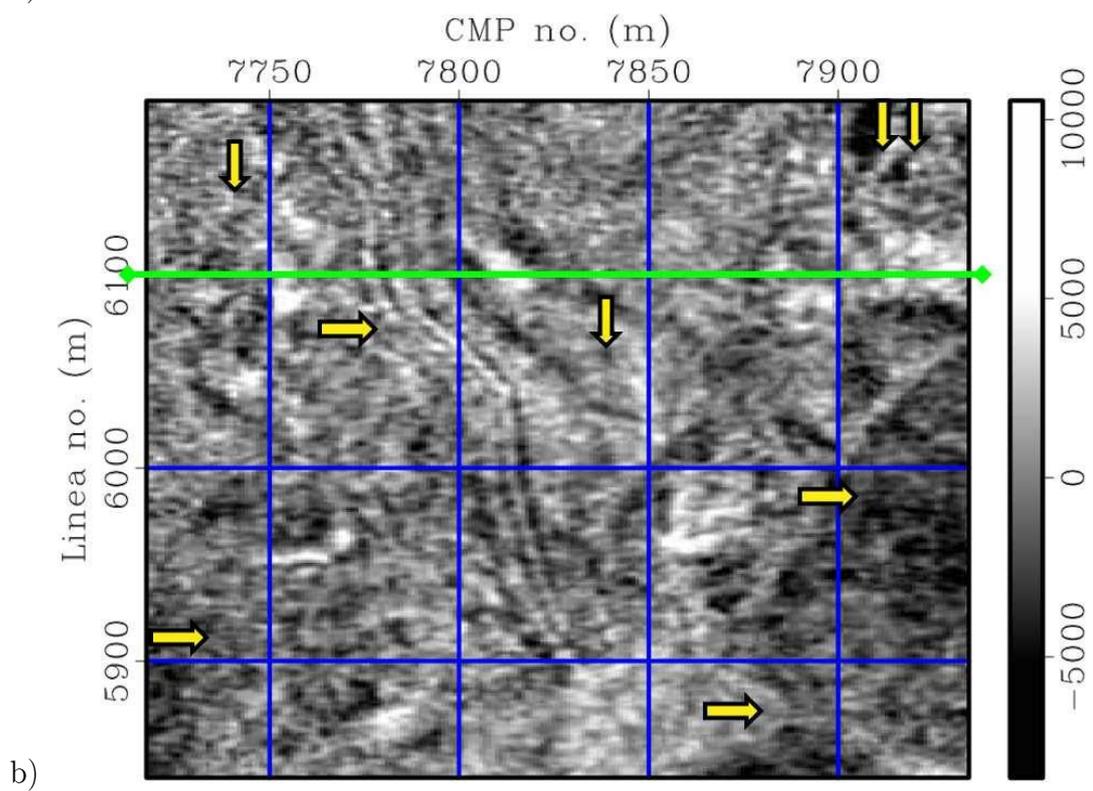
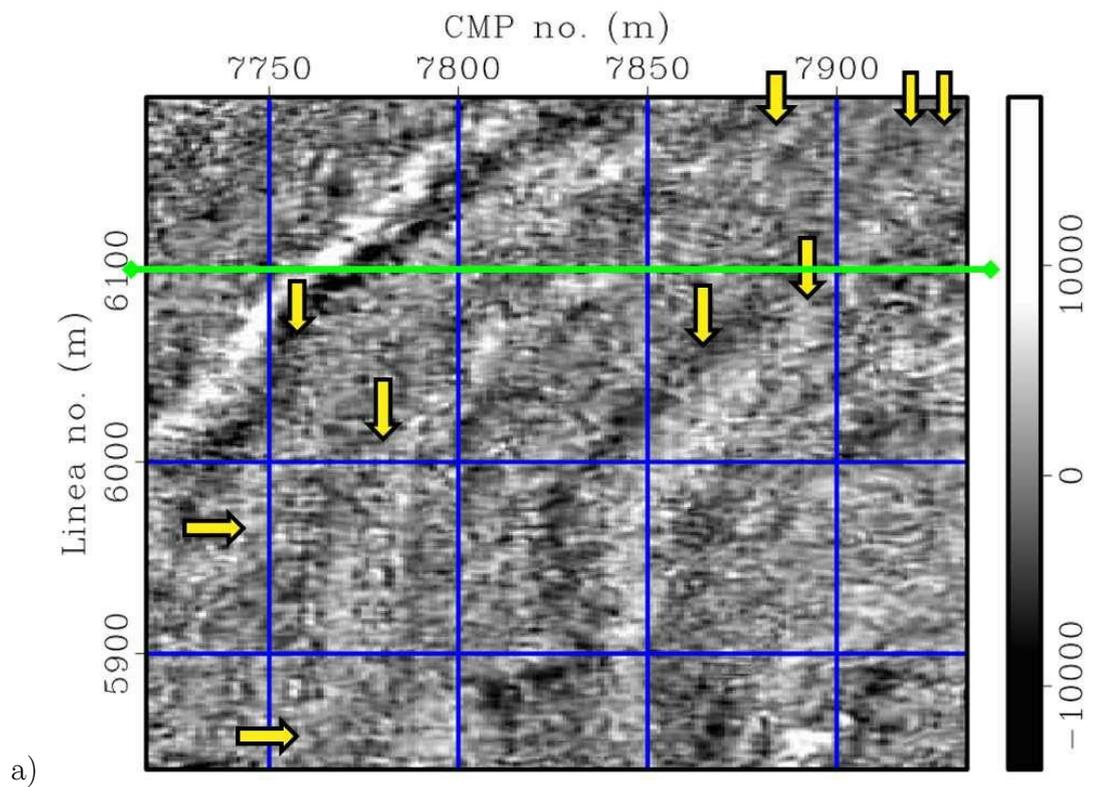


Figura 1.2: Volumen sísmico del área Vigilante ubicado en el Activo Integral Burgos.  
 a) Rebanada de tiempo en 0.4 s. b) Rebanada de tiempo en 0.5 s.

quisición debido a que las amplitudes se ven más afectadas. En este caso, el efecto de la huella de adquisición es más notable en los cálculos de atributos sísmicos. Muestro el perfil de la línea longitudinal en 6100 (Fig. 1.3), indicando dónde intersectan las rebanadas de tiempo en 0.4 s y 0.5 s. En la zona más somera, cerca de los 0 s, se puede inferir que la huella estará más realzada donde los reflectores se curvean debido a que el muestreo en superficie no es continuo.

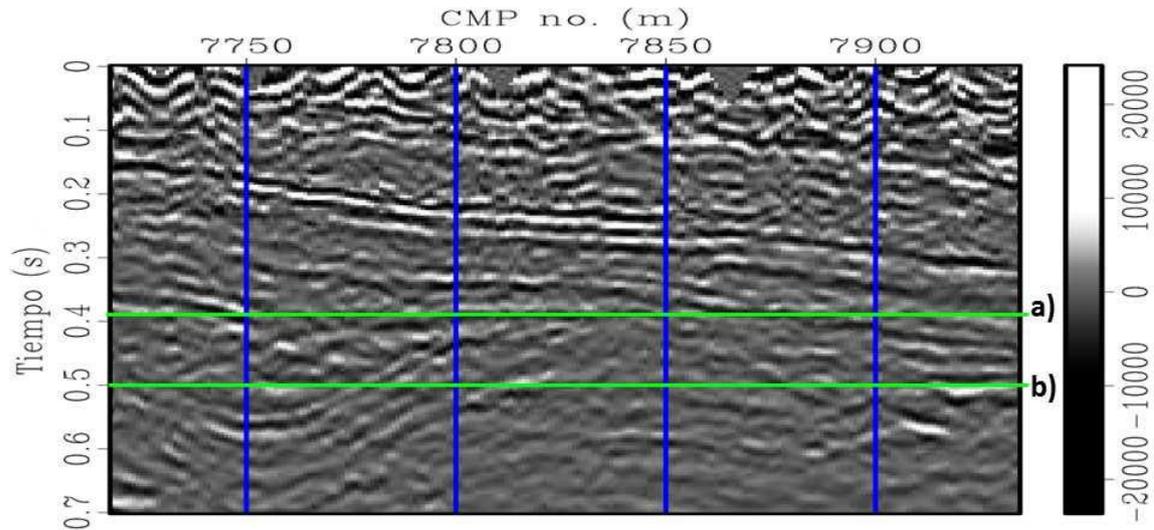


Figura 1.3: Sección transversal de la línea 6100 del volumen. Las líneas enseñan dónde se intersecta la rebanada de tiempo en 0.4 s (Fig. 1.2a) y 0.5 s (Fig. 1.2b) con el perfil de la línea longitudinal 6100 del volumen.

En principio, una forma de obtener una adquisición que resulte en la mejor representación sísmica del subsuelo es elegir o diseñar una geometría de adquisición correcta. Este diseño debe contemplar el muestreo correcto de los datos, de modo que al menos dos de cuatro de las coordenadas espaciales puedan ser apropiadamente representadas<sup>2</sup>. El buen muestreo de estas coordenadas, y el uso de aperturas más amplias entre estaciones para evitar el empalme de la señal (Schuster y Liu, 2001), generan una mejor reconstrucción del campo de ondas continuo del subsuelo y minimizan el efecto de la huella de adquisición.

<sup>2</sup>En las adquisiciones 2D las coordenadas son 3, el tiempo  $t$  y dos coordenadas espaciales: puntos de tiro  $x_s$  y receptores  $x_r$ . En las adquisiciones 3D son 5 antes de apilar, las ya mencionadas y dos más, coordenadas de tiros  $y_s$  y coordenadas de receptores  $y_r$  (Vermeer, 2009).

# Capítulo 2

## Acondicionamiento de datos sísmicos

Una vez registrados los datos sísmicos, las deficiencias que aún se tienen durante la adquisición evitan obtener un resultado que ofrezca una solución al problema de búsqueda de oportunidades de explotación de hidrocarburos. Durante la etapa de procesamiento se busca obtener una mejor representación sísmica que facilite esta labor. Sin embargo, por los defectos de adquisición, los métodos de procesamiento buscan remover tanto ruido aleatorio y picos de amplitud como sea posible, sin afectar o alterar la información sísmica útil.

El diseño de la geometría de adquisición 3D es la base para que una vez efectuada la secuencia de procesamiento convencional y postprocesamiento, la señal sísmica esté mínimamente contaminada con ruido para llevar a cabo su interpretación. Los principales tipos de ruido que afectan la representación sísmica son de tipo aleatorio. Por ejemplo, ruido de baja velocidad (ondas superficiales y difracciones) y múltiples. El ruido aleatorio afecta toda la imagen (en este caso, rebanada de tiempo) ya que no es correlacionable espacialmente y vuelve borrosos algunos rasgos lineales importantes.

En la metodología que planteo más adelante, busco preservar mejor la información sísmica relacionada con las estructuras al eliminar la huella de adquisición del volumen

de datos sísmicos. Para ello, utilizo el acondicionamiento de datos que simplifica y acelera el trabajo del intérprete y facilita el uso de herramientas automatizadas de interpretación.

El acondicionamiento se basa en el uso de filtros que preservan bordes y son sensibles al ruido aleatorio. Estos filtros son aplicados en mapas o rebanadas de tiempo, localmente o a lo largo de reflexiones, para suavizar la imagen que representa el subsuelo (Davogustto, 2011). En términos del presente trabajo, estas técnicas son utilizadas con una parametrización que permite el realce de la huella de adquisición.

## **2.1. Suavizamiento de imágenes**

Existen diversos algoritmos utilizados en la atenuación de ruido en la representación sísmica. Algunos filtros de suavizamiento son más agresivos que otros dependiendo de los datos, y se dividen en dos clases: lineales y no lineales (Hall, 2007). Los filtros lineales generan la misma respuesta para todas las partes de un conjunto de datos, mientras que los filtros no lineales se adaptan a los datos.

Al utilizar filtros de suavizamiento se supone que la parte de la señal que es ruido varía más rápidamente que la parte de la señal útil. El ruido se relaciona con el rango de frecuencias más alto de la señal (Hall,2007) y normalmente se utilizan filtros pasabajas para eliminarlo y conservar frecuencias bajas.

### **2.1.1. Filtros lineales**

Los filtros lineales son utilizados en el dominio del espacio a través de la convolución de una matriz cuadrada que funciona como núcleo (o *kernel*) de una ventana móvil de análisis. La posición en la que opera el núcleo tiene como centro el punto de análisis de los datos de entrada (Fig. 2.1). El núcleo actúa igual para cada punto de análisis y es por esto que suele operar de forma rápida.

Los filtros lineales no son sensibles a cambios abruptos de las propiedades de los datos sísmicos, por lo que suavizan de forma uniforme, causando que rasgos de interés como fallas y márgenes de canales, entre otros, se suavicen junto con el ruido y los picos de amplitud, ocasionando que no sean detectados.

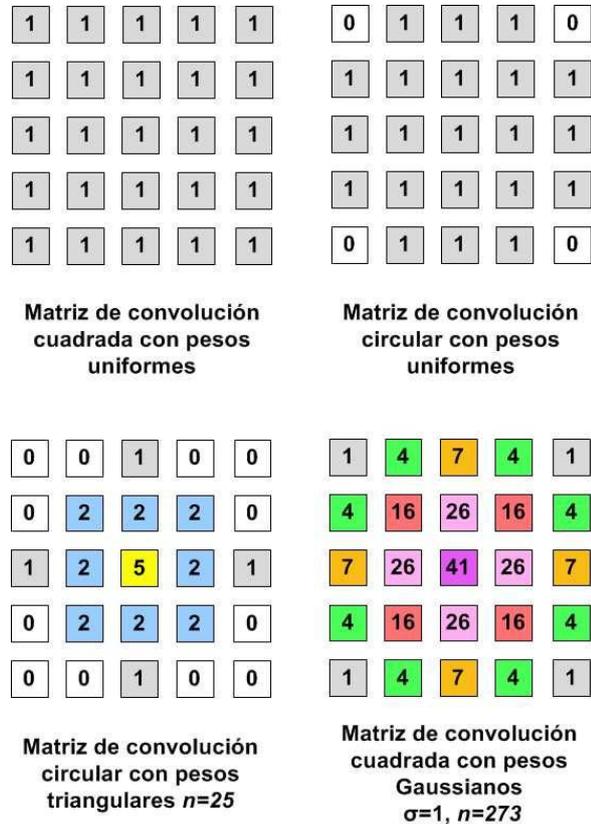


Figura 2.1: Ejemplos de distintos núcleos utilizados en filtros lineales. Cada uno tiene una forma base en la que opera el filtro. Puede ser cuadrada, circular, rectangular y triangular (adaptado de Hall, 2007).

El filtro de media, o filtro de medias móviles, actúa como un filtro pasabajos. El algoritmo calcula el promedio aritmético de todas las muestras dentro de una ventana de análisis y el valor resultante reemplaza el valor de la muestra central en la ventana. El tamaño de la ventana para datos sísmicos suele ser de tamaño impar, como  $3 \times 3$  o  $5 \times 5$ , rectangular o elíptica y su núcleo está ponderado uniformemente. Este filtro lineal se define como

$$d_{media} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J d_j, \quad (2.1)$$

donde  $d$  es la  $j$ -ésima traza dentro de la ventana de análisis  $J$  en un tiempo  $t$ .

El filtro de mediana actúa de forma similar al filtro de media. Su principal ventaja es que rechaza valores atípicos y preserva discontinuidades, removiendo picos de amplitud en la señal.

El filtro de mediana trabaja remplazando cada muestra de la traza sísmica, en una ventana, por el valor de mediana de las muestras que caen dentro de la ventana de análisis. La ventana de análisis que se utiliza suele ser de tamaño impar, como en el filtro de media ( $3 \times 3$  o  $5 \times 5$ ). Una forma de calcular la mediana es ordenando las muestras de la ventana de análisis  $J$  con base en un índice  $k$

$$d_{j(1)} \leq d_{j(2)} \leq \dots \leq d_{j(k)} \leq d_{j(k+1)} \dots \leq d_{j(J)}, \quad (2.2)$$

definiendo el valor de mediana como

$$d_{mediana} = d_{j[k=(J+1)/2]}, \quad (2.3)$$

El valor de media utilizando un factor de control de los datos  $\alpha$  está dado por

$$d_\alpha = \frac{1}{(1 - 2\alpha J)} \sum_{k=\alpha J+1}^{(1-\alpha)J} d_{j(k)}, \quad (2.4)$$

donde  $0 \leq \alpha \leq 0.5$ . Si  $\alpha = 0.5$ , se remplaza la Ec. 2.4 por el filtro de mediana (Ec. 2.3).

El filtro de media, con o sin factor de control  $\alpha$ , funciona mejor en la eliminación de ruido preservando más detalles de la imagen, pero ninguno de los filtros lineales mencionados preservan detalles muy finos.

El filtro Gaussiano utiliza un núcleo ponderado por una distribución Gaussiana, cuyo parámetro más relevante es  $\sigma$ , que controla el grado de suavizamiento para la atenuación de ruido aleatorio y, por lo tanto, el tiempo de cálculo. Este filtro puede ser más agresivo que los filtros mencionados previamente.

### 2.1.2. Filtro de Kuwahara

Marfurt (2006) adecúa el filtrado adaptable orientado a la preservación de bordes en la estimación de los componentes de echado utilizando el filtro generalizado de Kuwahara. Este algoritmo consiste en utilizar ventanas dentro de una región de análisis para el uso de filtros lineales en cada punto de análisis (Fig. 2.2).

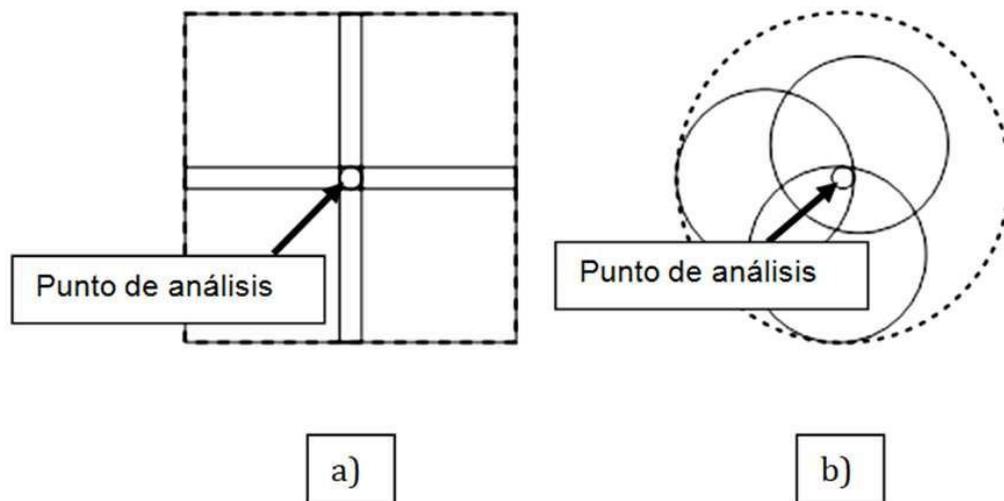


Figura 2.2: a) Filtro de Kuwahara tradicional. b) Filtro de Kuwahara generalizado. Las líneas punteadas muestran el límite de la región de análisis, y las líneas sólidas, el de las ventanas (modificada de Bakker et al., 1999).

Cada ventana que contiene al punto de análisis se traslapa en ciertas partes de la región. El punto central se reemplaza por el promedio de menor varianza de los datos dentro de la ventana, y evita el filtrado a través de los bordes cuando son detectados valores de varianza cercanos a cero, lo que indica que existe una discontinuidad. En conjunto con el filtrado orientado a la preservación de bordes y el análisis multiven-

tana, se obtiene una representación de la imagen sísmica con bordes realzados. Este filtro orientado a estructuras, Marfurt (2006) lo emplea en la búsqueda de las zonas de menor similitud (también llamada *coherencia*) para localizar discontinuidades en datos tridimensionales, donde estima el echado y azimut del reflector, estadísticamente, tanto lateral como verticalmente (Fig. 2.3) en un volumen de datos sísmicos.

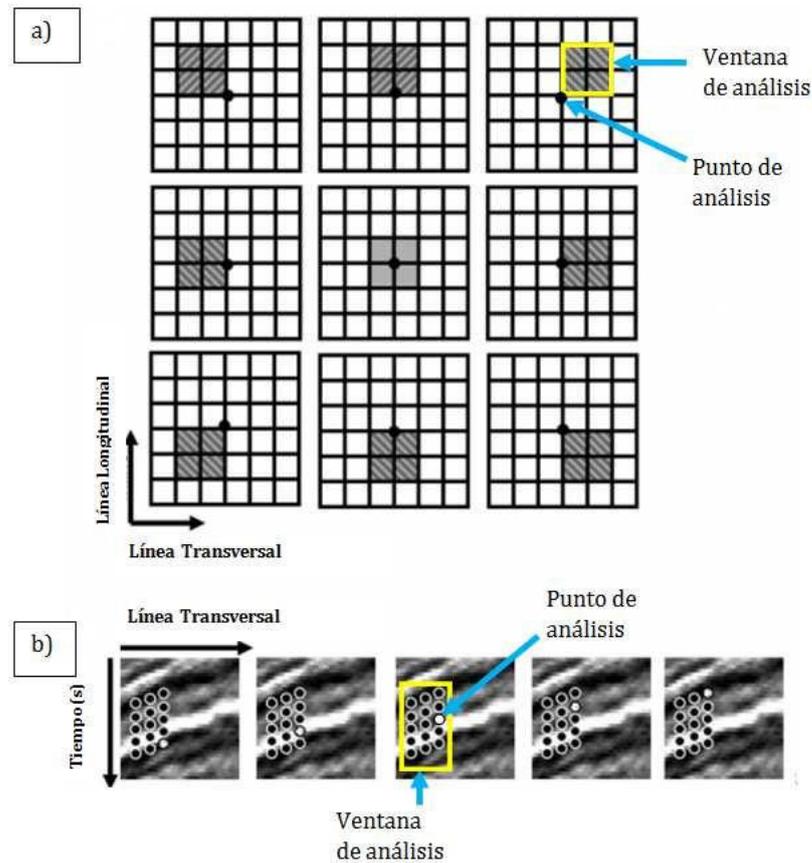


Figura 2.3: a) Búsqueda del echado y el azimut en 9 ventanas laterales, en vista de planta. b) Búsqueda transversal en 5 ventanas verticales, en la primera ventana lateral (noroeste). Para todas las ventanas, tanto horizontales como verticales, se realiza primero el cálculo de coherencia y luego se realiza una interpolación (modificada de Marfurt, 2006).

El tamaño de la ventana, entonces, será del tamaño de la celda, de modo que la zona traslapada sea la que menor suavizamiento tenga y estará, aproximadamente, sobre la huella de adquisición. Así preservará y enfatizará la huella, mientras suaviza

el resto de la información<sup>3</sup>.

### 2.1.3. Filtros no lineales

La preservación de estructuras sutiles y de mayor complejidad se basa en el método de suavizamiento adaptable a los datos. Haciendo uso del filtro de Kuwahara en conjunto con valores de variables estadísticas, se trabaja con ventanas donde se elige el resultado de desviación mínima (Al-Dossary y Wang, 2011).

Se utilizan un conjunto de orientaciones para suavizar la imagen hasta hallar la orientación que mejor se alinea con la estructura verdadera. Los cambios sutiles de echado y azimuth, así como la identificación de las terminaciones de los reflectores, permiten inferir paquetes coherentes relacionados con progradación o transgresión, abanicos aluviales, zonas caóticas, sistemas de canales y zonas de karsticidad (Marfurt, 2006).

En la interpretación de volúmenes sísmicos, la orientación del reflector sísmico se define en términos de echados aparentes, que a su vez están definidos a partir de las líneas longitudinales y transversales (referidas a los ejes de la adquisición sísmica).

Por lo tanto, se debe definir el echado vectorial de un reflector sísmico desde el punto de vista matemático, geológico y desde la perspectiva de análisis de señales. Su correcta estimación permite obtener mejores resultados en la interpretación y en el cálculo de atributos sísmicos e interpretación de estructuras, rasgos estratigráficos y rasgos de formación, sutiles en la representación sísmica (Marfurt, 2006).

Matemáticamente, cada elemento plano de un reflector sísmico puede ser definido con únicamente un punto en el espacio  $x = (x, y, z)$  y una unidad normal a la superficie  $n = (n_x, n_y, n_z)$ , tal que  $n_z$  sea mayor o igual a cero. Geológicamente, un elemento plano es la interfaz entre capas, cima o base de una formación. Se define por sus echados aparentes  $(\theta_x, \theta_y)$  o por su echado verdadero  $(\theta)$  y su rumbo  $(\psi)$  (Fig. 2.4).

---

<sup>3</sup>En este acondicionamiento de datos busco preservar la huella de adquisición para posteriormente caracterizarla y atenuarla.

El echado aparente  $\theta_x$  es el ángulo medido en el plano vertical  $(x, z)$  desde el eje horizontal  $x$  a la interfaz, y el echado aparente  $\theta_y$  es el ángulo medido en el plano vertical  $(y, z)$  desde el eje horizontal  $y$  a la interfaz. El rumbo ( $\psi$ ) es el ángulo que se forma entre el Norte y la intersección entre el reflector y el plano horizontal  $(x, y)$ . El echado verdadero ( $\theta$ ) siempre es mayor o igual que  $\theta_x$  y  $\theta_y$ , y es el ángulo formado entre el plano horizontal y la interfaz, medido en el plano vertical perpendicular al rumbo y al plano horizontal en dirección negativa, paralela al eje  $Z$ .

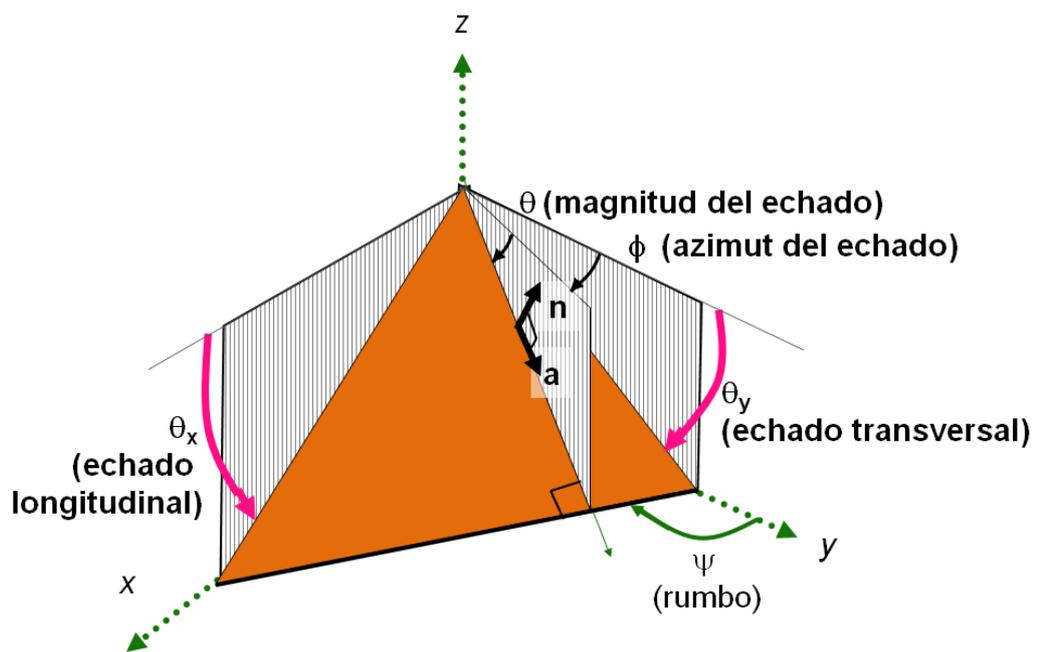


Figura 2.4: Definición matemática, geológica y sísmica de echado de un reflector (Marfurt, 2006).

En sismología de reflexión, simplemente se define un elemento plano, es decir, un reflector, por su echado y azimut. El echado ( $\theta$ ) o magnitud de echado, es idéntico al echado utilizado en la definición geológica. El azimut ( $\phi$ ) o azimut de echado, se mide desde el Norte o desde el eje de las líneas longitudinales de la adquisición. El azimut es perpendicular al rumbo de la definición geológica y se mide en dirección de máximo echado descendente. Por lo tanto, se define el vector unitario de echado de la

reflexión ( $a$ ) como

$$a_x = \cos \theta \sin \phi, \quad a_y = \cos \theta \cos \phi \quad y \quad a_z = \sin \theta. \quad (2.5)$$

Las mediciones de un plano, su vector normal  $n$ , echado ( $\theta$ ), rumbo ( $\psi$ ), echados aparentes ( $\theta_x, \theta_y$ ), azimut ( $\phi$ ) y vector de echado ( $a$ ), son las equivalentes a los de la definición geológica. Si el reflector es horizontal, su echado y azimut no están definidos, mientras que su vector normal unitario y sus componentes siempre están definidos.

Es conveniente medir el tiempo aparente de los echados sísmicos  $p$  y  $q$ , donde  $p$  es el echado sísmico aparente medido en  $s/m$  en la dirección longitudinal (de  $x$ ) y  $q$  es el echado aparente medido en las mismas unidades en la dirección transversal (de  $y$ ). Si la velocidad se aproxima a un valor constante  $v$ , entonces las relaciones entre el tiempo de los echados aparentes  $p$  y  $q$  y los ángulos aparentes ( $\theta_x, \theta_y$ ) son

$$p = \frac{2 \tan \theta_x}{v} \quad y \quad q = \frac{2 \tan \theta_y}{v}. \quad (2.6)$$

A partir de este razonamiento se estima el vector del echado, utilizando la metodología de análisis de señal analítica (traza sísmica compleja) con búsquedas discretas de semblanza en los reflectores sísmicos o del gradiente del tensor estructural, éste último utilizado para la preservación de bordes.

Estas metodologías proveen una estimación del echado aparente de fallas, por ser excelentes detectores de bordes. Al suavizar los componentes de las estimaciones de echado utilizando filtros de media o mediana, se logran mejorar las estimaciones del atributo de coherencia (semblanza). Sin embargo, esto puede llevar a la eliminación de detalles de interés en los volúmenes de los componentes de echado. El método de estimación del vector de echado a través del gradiente del tensor estructural se utiliza para definir, en una ventana de análisis, la dirección en la que los datos sísmicos varían más. Se tienen dos ejes perpendiculares a esta dirección, uno se ajusta a la dirección de mínima variación, mientras que el otro eje es perpendicular a los otros dos. Estos ejes

definen la geometría de la estructura para fines de realce de estructuras geológicas.

El cálculo se realiza con la medición de la variabilidad de la forma de onda a lo largo de estos tres ejes cartesianos ( $\partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \partial u/\partial z$ ), donde  $u$  se refiere a los datos sísmicos de entrada en la ventana de análisis, convolucionando el resultado con las derivadas de un filtro Gaussiano ( $\partial G/\partial x, \partial G/\partial y, \partial G/\partial z$ ) en cada una de las tres direcciones de los ejes. Entonces, se obtienen tres volúmenes de gradientes de amplitud sísmica y se define una ventana de análisis con la que se estima la dirección del reflector a lo largo de cada una de las tres direcciones.

Para obtener la tendencia, se comparan los resultados de cada dirección dentro de la ventana de análisis a través de una correlación cruzada. Esta matriz de covarianza, o gradiente de tensor estructural, contiene información acerca de la variabilidad de la forma de onda dentro de la ventana de análisis, y su primer eigenvector principal define la variabilidad máxima y dirección normal del plano, que a su vez define mejor la ventana de análisis de los datos sísmicos.

Chopra y Marfurt (2010) utilizan un algoritmo multiventana para buscar echados, con la intención de evitar alterar o borrar fallas y discordancias angulares, por ejemplo en la estimación del atributo de coherencia. Las variaciones laterales de estas estimaciones de echado proveen imágenes de atributos matemáticamente independientes de coherencia, echado y azimut.

Para mejorar la estimación de los componentes del vector de echado en el cálculo del atributo de coherencia, se utiliza el análisis por ventanas (método de Kuwahara) y el algoritmo de preservación de bordes (EPS, por sus siglas en inglés), que preservan mejor algunos rasgos de interés en la interpretación del volumen sísmico. En este caso, me enfocaré en el uso del filtro de Kuwahara, que comparte parte de la metodología de EPS y sus variantes.

Esta metodología de análisis evita que se desvanezcan bordes de estructuras y su uso es fundamental en el cálculo de atributos geométricos. Al realizar un Filtrado Orientado a Estructuras (FOE) se obtiene una mayor resolución lateral con el atributo de coherencia y con el atributo de curvatura, así como menor influencia y reducción

de ruido coherente (incluida la huella de adquisición) y aleatorio, aún existente en la información sísmica. Esto también facilita la interpretación de pliegues, karsticidad, hundimientos o depresiones, así como de compactación diferencial (Davogustto, 2011).

# Capítulo 3

## Atributos geométricos

Los atributos sísmicos son una herramienta clave en la interpretación de propiedades de los datos sísmicos utilizados para realzar las variaciones sutiles de amplitud y fase en la señal sísmica. Así, a través de la visualización, calibración y uso de métodos de reconocimiento cuantitativo de patrones es posible la predicción de propiedades entre pozos de un yacimiento.

El análisis convencional de atributos consiste en extraer información de rasgos estructurales y propiedades de la señal sísmica a lo largo de horizontes previamente elegidos. La interpretación geológica estructural a través de la visualización de los atributos geométricos tiende a ser más efectiva en rebanadas horizontales dado que los datos sísmicos 3D son ordenables en mallas regulares. Realicé el cálculo de atributos geométricos como una forma de exacerbar el contenido de ruido sísmico (Chopra y Marfurt, 2008) para utilizarlo en la atenuación de huella de adquisición perceptible en las rebanadas de tiempo.

Los atributos geométricos más comunes y de uso más frecuente en la caracterización de yacimientos son *coherencia* y *curvatura*. Estos atributos resaltan características relacionadas con rasgos estructurales del subsuelo importantes para el sistema petrolero y, para mis fines, ayudan a resaltar rasgos relacionados con la geometría de adquisición.

### 3.1. Coherencia

Coherencia es la medida de similitud existente entre dos o más trazas. Este atributo es una herramienta que ayuda a detectar discontinuidades estructurales o estratigráficas y cambios abruptos difíciles de identificar en la señal sísmica. Es un método de procesamiento útil en el realce de rasgos estructurales en el volumen de datos sísmicos del yacimiento.

El cálculo de coherencia se realiza a través de ventanas buscando límites de estructuras con un barrido discreto del echado, y se basa en la búsqueda estadística del valor de mayor similitud (varianza) entre trazas, por ejemplo, en dirección longitudinal A-B, y transversal A-C para un operador que actúe en sólo tres trazas a la vez (Fig. 3.1). Utiliza el tensor gradiente estructural para representar cada región de análisis a través de dos vectores opuestos entre ellos, con diferente dirección pero con la misma orientación (Bakker et al., 1999) y supone una orientación local en cada región. La medida de la orientación local fallará en cuanto se tenga una discontinuidad (en el borde de la estructura). Entre más coherente sea la región, el valor tenderá a ser máximo ( $\approx 1$ ). Si la medida falla, es decir, hay menor coherencia, y por lo tanto una discontinuidad, el valor tenderá a ser mínimo ( $\approx 0$ ).

Las rebanadas de tiempo permiten una mejor visualización y seguimiento de fallas y de cambios estratigráficos laterales. Al utilizar esta herramienta de detección de discontinuidades, resalto rasgos periódicos que caracterizan la huella de adquisición y que por ende no pertenecen a la señal sísmica útil (Bahorich y Farmer, 1995). El barrido del echado se realiza utilizando ventanas de Kuwahara, cuyo tamaño estará determinado por el tamaño de la celda en la geometría de adquisición.

El método consiste en calcular la coherencia local de la forma de onda entre trazas próximas, en dirección longitudinal y transversal del arreglo geométrico. En la Fig. 3.1 se muestra un operador de tres trazas y uno de nueve. Su uso depende de la geometría utilizada para la adquisición del volumen de datos.

Las regiones de la traza sísmica relacionadas con discontinuidades debidas a fa-

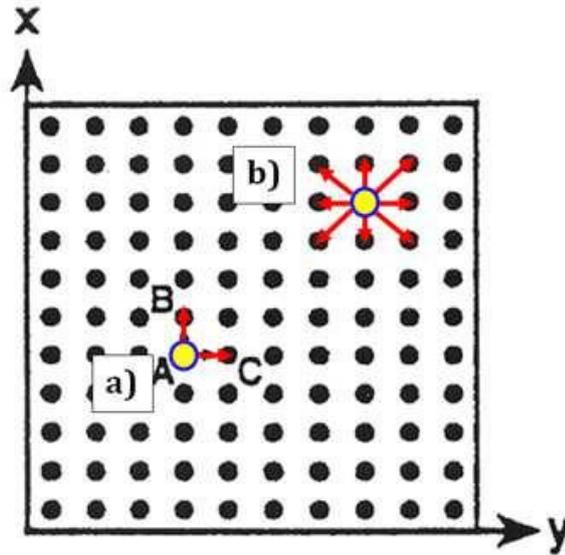


Figura 3.1: El cubo de coherencia puede ser calculado midiendo coherencia entre trazas tanto en la dirección transversal como longitudinal, con un operador que utilice a) solamente tres trazas (tamaño mínimo del operador), b) 9 trazas, o más cuando se trate de datos con alto contenido de ruido (modificada de Bahorich y Farmer, 1995).

llamiento usualmente tienen un comportamiento sísmico diferente al de las trazas adyacentes y el valor de coherencia es menor entre más relevante sea la discontinuidad (Fig. 3.2). Por lo tanto, el cálculo de coherencia realizado en todos los puntos de la malla y a lo largo de las rebanas de tiempo, resulta en superficies que realzan los lineamientos relacionados con fallas, aún sin reflexiones relacionadas con estas estructuras.

El gradiente del tensor estructural se construye a partir del producto vectorial del gradiente estructural consigo mismo, obteniendo como resultado un tensor cuadrado  $3 \times 3$  (Marfurt, 2006). Los elementos del tensor se suavizan individualmente por un filtro lineal, lo que genera un tensor positivo con 3 eigenvectores o vectores característicos, de los cuales, por definición, el de mayor valor es el que mejor representa la variabilidad de los datos sísmicos y por lo tanto estará alineado al vector normal de la estructura.

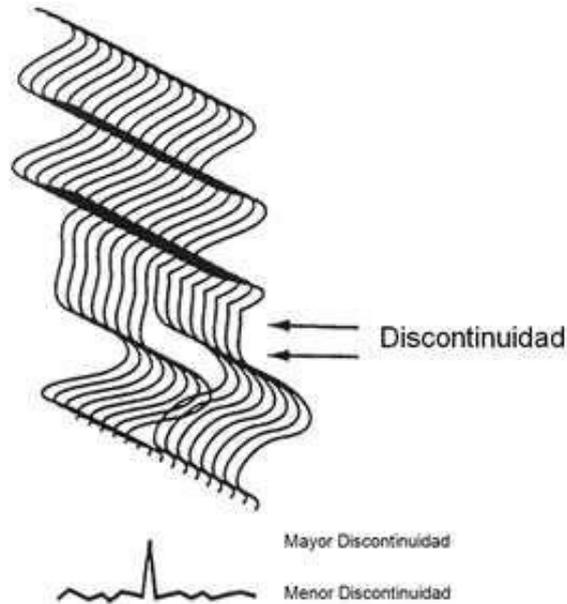


Figura 3.2: Las fallas son resaltadas con el atributo de coherencia. La discontinuidad es detectada cuando existen diferencias entre trazas de distintos lados de la falla (Bahorich y Farmer, 1995).

La estimación de la orientación resultante es el promedio de la sumatoria de las dos orientaciones predominantes en ambos lados de la discontinuidad, ocasionando que los bordes resulten poco claros o difusos. Para evitarlo, el cálculo se realiza a lo largo de un cierto número de posibles echados utilizando filtros de media o mediana, con orientaciones múltiples para cada ventana de análisis en los componentes de echado estimados.

Marfurt(2006) mejora esta técnica utilizando la estimación de los componentes vectoriales del echado, utilizando filtros de media o mediana. El algoritmo calcula el atributo de coherencia utilizando la semblanza, varianza, componentes principales y otras propiedades estadísticas. El cálculo se realiza a lo largo de un cierto número de posibles echados. En la Fig. 3.3a se esquematiza la búsqueda del echado que proporcione la mejor estimación de coherencia a partir de un punto de análisis. En la Fig. 3.3b se realiza el mismo ejemplo pero para el caso 3D en el que los componentes vectoriales del echado en tiempo son  $p$  y  $q$ , donde  $p$  indica la dirección longitudinal y  $q$  la dirección transversal.

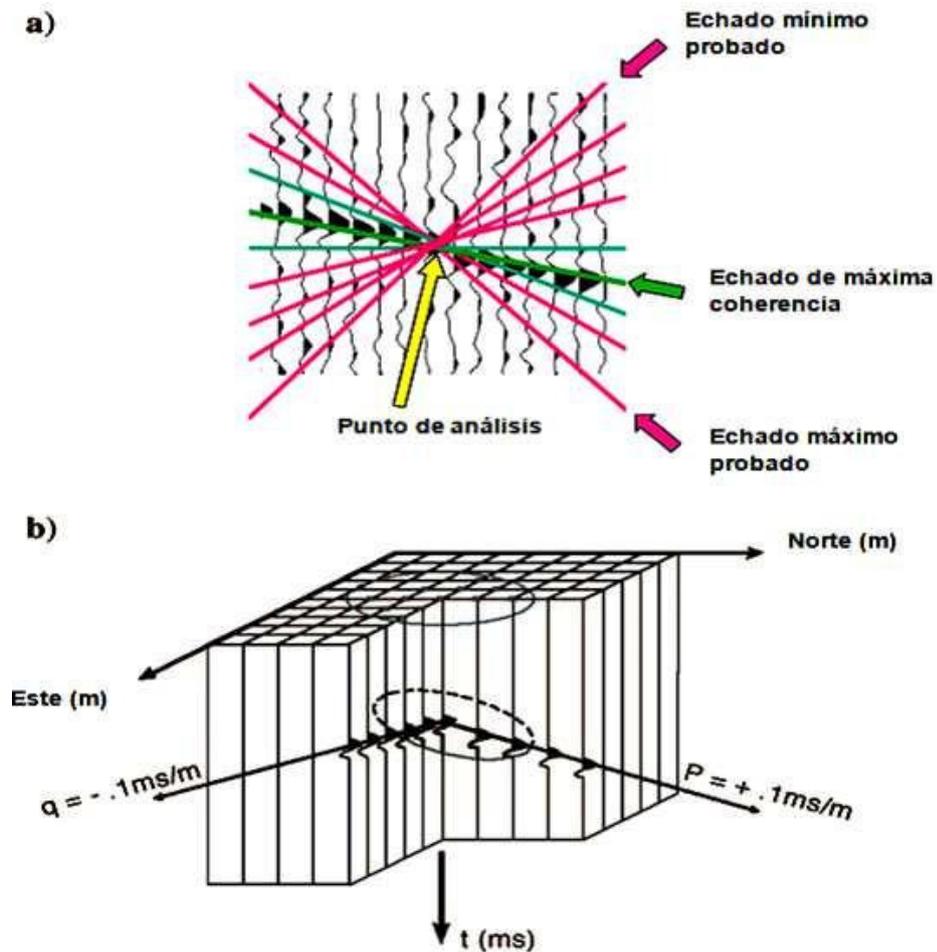


Figura 3.3: a) Ejemplo esquemático de la búsqueda 2D de la mejor estimación de coherencia a partir de un punto de análisis. b) Ejemplo esquemático de la búsqueda 3D lateral de la mejor estimación de coherencia en la que los componentes vectoriales en tiempo del echado son  $p$  y  $q$ , donde  $p$  indica la dirección longitudinal y  $q$  la dirección transversal (modificada de Marfurt, 2006).

El cálculo de coherencia a lo largo de los componentes de echado genera una mayor resolución lateral y menor sensibilidad a deformaciones de los rasgos relacionados a las discontinuidades. Esta herramienta ayuda a ubicar cambios estructurales importantes en la detección de zonas de posible interés petrolero. En el caso de la huella, el algoritmo debe definir, como echado de máxima coherencia, la máxima correlación de los rasgos alineados a la malla de adquisición (rasgos de Norte a Sur, de Este a Oeste) en las rebanadas de tiempo.

## 3.2. Curvatura

La curvatura ( $k$ ) es la propiedad bidimensional de una curva que describe que tan arqueada (cóncava o convexa) es esa curva en un punto específico, es decir, que tanto se desvía la curva de la línea recta. En otras palabras, es la razón de cambio de dirección de una curva. Es posible definirla como el recíproco del radio de un círculo tangente a una curva en un punto y su valor es mayor a medida de que la curva difiere de una línea recta, e igual a cero si es ésta última.

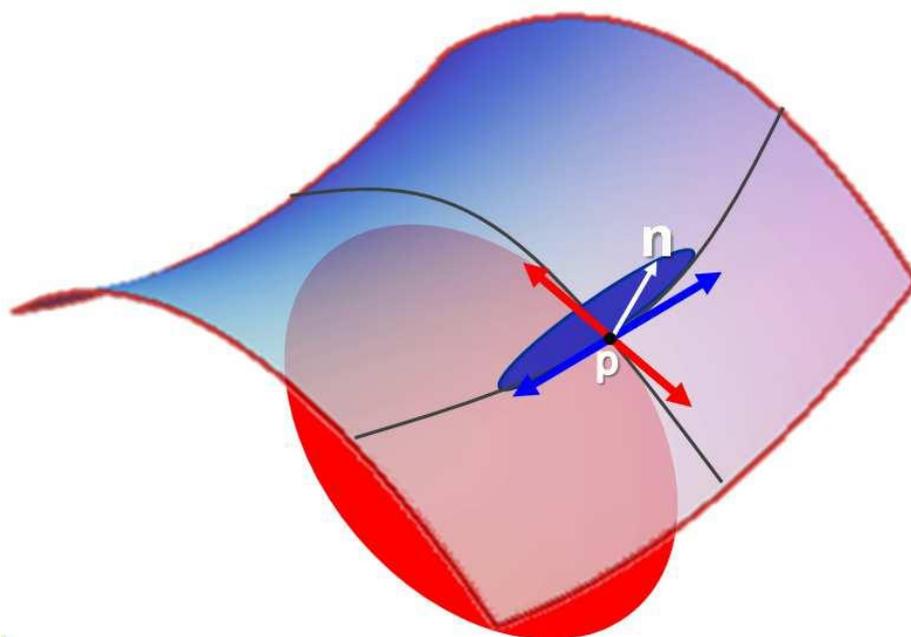


Figura 3.4: Curvatura de una superficie cuadrática con normal  $n$  definida en un punto  $p$  (modificado de Chopra y Marfurt, 2011).

Matemáticamente, la curvatura se define como la derivada de segundo orden de una curva. Geométricamente, para el caso 2D (ver Fig. 3.4), si los radios de círculos con un punto de contacto  $p$  sobre la curva son remplazados por vectores normales, es posible asignar signo a estos valores para definir diferentes formas. En caso de vectores divergentes, la forma asignada es de anticlinales (signo positivo:  $k > 0$ ), en caso de vectores convergentes, la forma de sinclinales (signo negativo:  $k < 0$ ), y si se trata de vectores paralelos, la forma de superficies planas (curvatura nula:  $k = 0$ ).

Al extender este concepto al caso de superficies 3D, la curvatura es calculada en cualquier punto de la curva formada por la intersección de un plano a una superficie. Si es considerada una superficie intersectada por planos ortogonales a la superficie, la medición de curvatura deviene en curvaturas *normales*.

De los diferentes tipos de curvatura que se forman, sólo dos son perpendiculares entre sí. La primera representa la curvatura máxima (circunferencia azul) y la segunda, la curvatura mínima (circunferencia roja) (Fig. 3.4).

La curvatura *estructural* se obtiene a partir de la derivada 2D de segundo orden de una estructura, ya sea en tiempo o en profundidad. También se define como la derivada 2D de primer orden de los componentes de echado longitudinal y transversal. Por lo tanto, esta curvatura mide los cambios laterales y verticales sutiles en el echado que usualmente son opacados por deformaciones regionales mayores.

Otra manera de calcular curvatura es calculando las derivadas parciales de segundo orden en dirección longitudinal ( $x$ ) y transversal ( $y$ ) en un horizonte o mapa de amplitudes. Se calcula a partir de las primeras derivadas de los *gradientes de amplitud de energía* (Davogustto et al., 2011). Las segundas derivadas aumentan las amplitudes de las frecuencias altas (longitud de onda corta) relacionadas con la zona más ruidosa de la señal, y permiten mejorar la visualización de las frecuencias bajas (longitud de onda larga) relacionadas con la información sísmica menos ruidosa.

Los *gradientes de amplitud* se obtienen de la matriz de covarianza de donde  $v_1$  es el primer eigenvector unitario de las amplitudes interpoladas para el cálculo del atributo de coherencia, y la variación de energía dentro de una ventana de análisis siendo la derivada espacial de los componentes de amplitud de  $v_1$ . Visto como un mapa  $v(x, y)$  de amplitudes,

$$\frac{\partial v_1(x, y)}{\partial x} \text{ y } \frac{\partial v_1(x, y)}{\partial y} \quad (3.1)$$

con  $\|v_1\| = 1$  y  $v_1 = \frac{a}{\|a\|}$ , donde  $a$ =amplitud.

Este vector  $v_1$  es el que mejor representa la variación lateral de las amplitudes sísmicas a través de una ventana de análisis. Para formas de onda más complejas, como un reflector contaminado por ruido, se obtiene el componente de energía coherente dentro de la ventana de análisis.

Las estructuras geológicas usualmente muestran curvatura de diferentes longitudes de onda y, por lo tanto, dependiendo del tipo de curvatura calculada, el resultado exhibe diferentes perspectivas de una misma geología. Podemos, de esta forma, aprovechar sus propiedades para realzar ruido de adquisición que en esta etapa del procesamiento aún esté presente, utilizando el filtro para el realce de estos componentes de alta frecuencia.

Como la curvatura de amplitud mide las variaciones de amplitud laterales, ésta es la que utilicé para realzar la huella de adquisición, dado que es un efecto de las amplitudes.

## Capítulo 4

# Atenuación de huella de adquisición

El flujo de trabajo que describo a continuación utiliza atributos geométricos y filtros que buscan adaptarse a las estructuras. En este caso, los atributos proporcionan una forma de resaltar ruido relacionado con la huella de adquisición para identificarlo y sustraerlo adaptablemente del volumen de amplitudes sísmicas. La importancia de atenuar la huella de adquisición radica en mejorar la representación sísmica para su interpretación. Este ruido enmascara rasgos sutiles relacionados con fracturas, fallas, cambios laterales estratigráficos y litológicos, entre otros, y afecta principalmente a los atributos sísmicos utilizados en la caracterización estructural de un yacimiento.

Existen diversas técnicas utilizadas atenuar la huella de adquisición en una etapa de postprocesamiento. Entre ellas, la atenuación guiada por atributos sísmicos geométricos ha probado ser efectiva para eliminar ruido mientras preserva mejor las estructuras geológicas. Los atributos sísmicos geométricos, como coherencia y curvatura, permiten la predicción de fracturas y de rasgos estratigráficos del subsuelo. También, debido a que son sensibles a los cambios laterales de amplitud asociados a la huella de adquisición, los utilizo para realzar estos componentes periódicos.

La periodicidad espacial de los componentes de la huella depende del arreglo de fuentes y receptores que se utiliza para la adquisición. Esto genera cambios periódicos en la señal que son más evidentes al mejorar la relación señal a ruido. Existen varios

métodos que son utilizados para realzar el contenido en frecuencias en los datos sísmicos con el fin de obtener atributos sísmicos con mejor resolución lateral y vertical, libres de artefactos que contaminen la imagen para obtener una mejor estimación de la huella de adquisición. Entre esas técnicas se encuentran el filtrado de componentes principales, el filtrado orientado a estructuras y sus variantes, definidos en el Capítulo 2, el filtrado  $f-k$  y filtrado  $k_x - k_y$ , entre otros (ver la Tabla 4.1).

El flujo de procesamiento que muestro en este capítulo está basado en varias de estas técnicas que son adaptadas para lograr una mejor preservación de información sísmica útil. El flujo de trabajo, por lo tanto, no es único y depende tanto de la información sísmica como de quién lleve a cabo el procesamiento.

Herramientas 2D	FFT 2D o $k_x - k_y$
	Transformada de ondícula discreta 2D y Transformada de ondícula estacionaria 2D
Herramientas 3D	FKK o $k_x - k_y - \omega$
	Transformada de Radon
	Transformada de ondícula 3D y Transformada de curvículas ( <i>curvelets</i> ) 3D
Otras herramientas	Filtros combinados
	Transformada de ondícula compleja 1D
	Filtro de echado local vs filtro de echado regional
	Migración de cuadrados mínimos

Tabla 4.1: Técnicas utilizadas en la eliminación de huella de adquisición (adaptado de Cvetkovic et al., 2008).

## 4.1. Atenuación guiada por atributos

Falconer y Marfurt (2008) realizaron el planteamiento del flujo de trabajo para atenuar huella de adquisición guiado por atributos sísmicos que ayuden a enfatizar la huella y que hagan factible su caracterización. En la Fig. 4.1 podemos observar que se tienen dos volúmenes de entrada, el volumen de datos sísmicos y el volumen de un atributo sísmico geométrico calculado a partir de los datos originales. El flujo

de atenuación consiste en localizar la información relacionada con ruido específico de huella de adquisición para sustraer estas amplitudes al volumen original de datos. El acondicionamiento de datos debe cumplir con generar una respuesta donde se haya realizado ruido de adquisición en los atributos sísmicos geométricos.

Utilizo los datos de un volumen sísmico proporcionado por PEMEX Exploración y Producción para ejemplificar este proceso de atenuación, y en la Fig. 4.2 muestro la rebanada de tiempo en 0.5 s con las amplitudes sísmicas originales,

En la Fig. 4.3 podemos ver que, en cierta medida, este patrón se enmascara con la información útil relacionada con la geología y parece un rasgo más del subsuelo. En algunas zonas es más sencillo detectar donde fueron más afectadas las amplitudes debido al ruido de adquisición, teniendo en cuenta que puede ser más fuerte su impacto en el volumen de los atributos sísmicos (Figs. 4.4 y 4.5) o en diferentes tiempos del volumen sísmico original. La huella no será la misma a lo largo de todo el volumen ya que no es homogéneo ni isótropo y por lo tanto será diferente para cada rebanada de tiempo.

Una vez calculados los atributos con la huella de adquisición realizada (utilizando ventanas del tamaño de las celdas y filtros que realzan el contenido de alta frecuencia), el objetivo principal del flujo es estimar el componente de ruido relacionado con la geometría de adquisición (una huella sintética del estudio) presente en los datos sísmicos. Para ello elegí el atributo que mejor resaltara la huella. Utilicé un filtro lineal de media, de modo que la información relacionada con la geología sea mínimamente afectada y que en los pasos posteriores sólo se atenuaran rasgos relacionados con los componentes de ruido de la huella.

Para el ejemplo que presento, utilicé un filtro de media controlada por un factor del 25 % para suavizar la rebanada de tiempo en 0.5 s (Fig. 4.6). El filtro ayuda a excluir la señal de alta frecuencia que no esté contaminada. Las flechas amarillas señalan algunos de estos componentes de ruido que se han vuelto más sutiles.

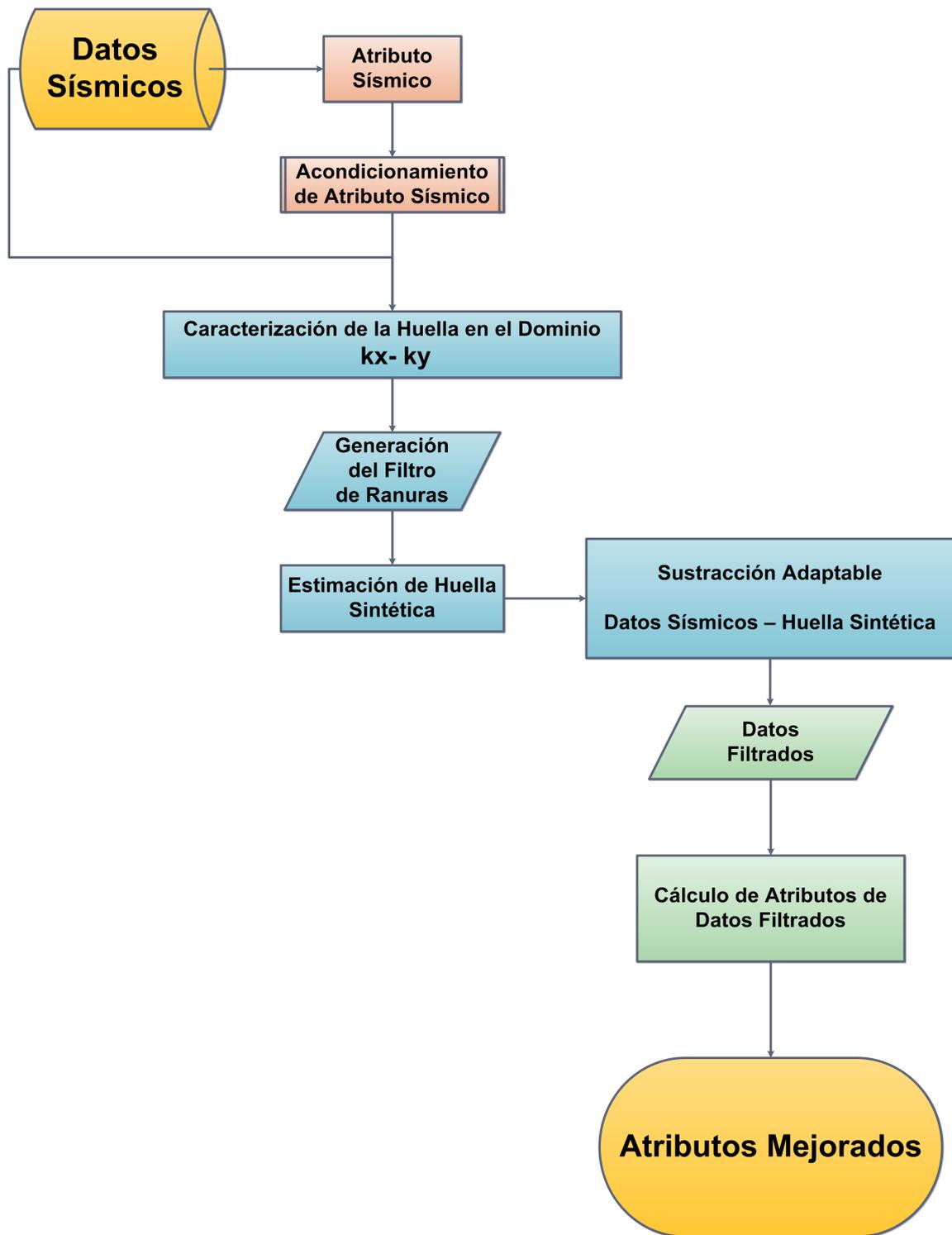


Figura 4.1: Flujo de atenuación de huella de adquisición (adaptado de Davogustto, 2011).

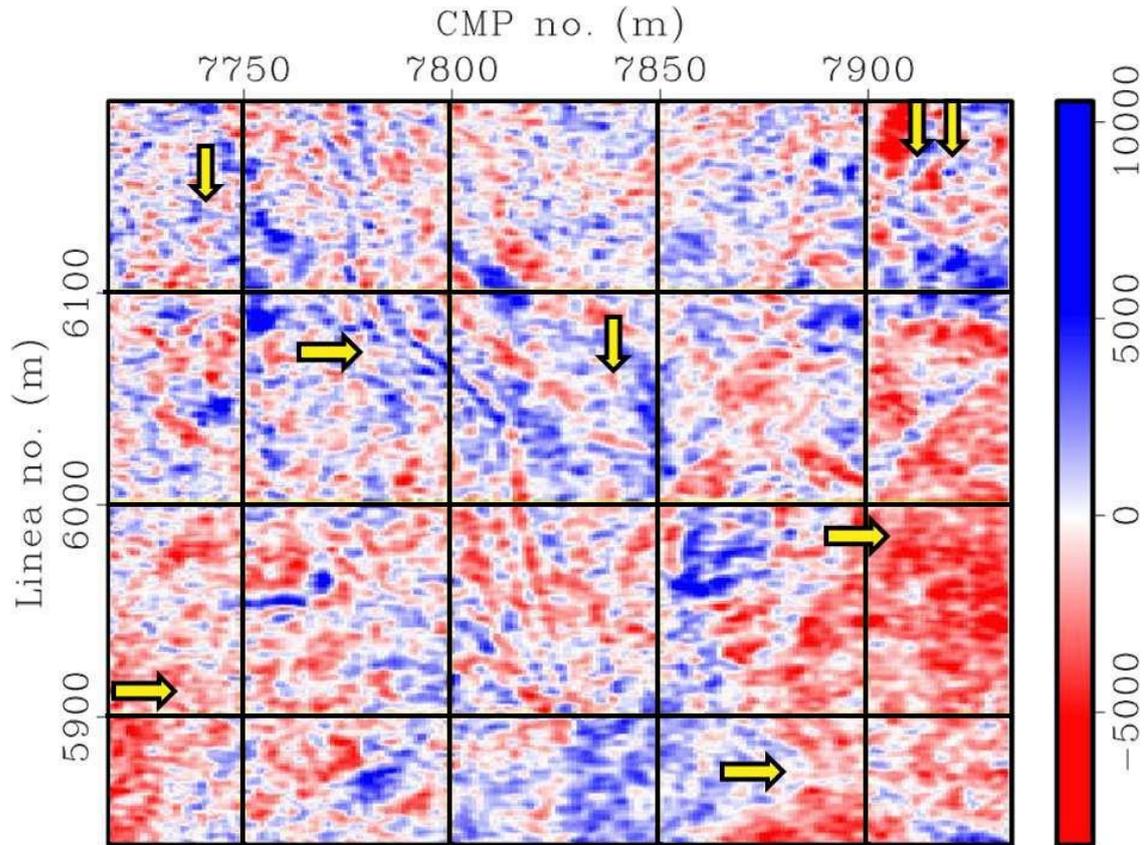


Figura 4.2: Amplitudes sísmicas de la rebanada de tiempo en 0.5 s. Las flechas amarillas muestran algunos rasgos reconocibles, lineales, que pueden ser asociados con la huella de adquisición.

#### 4.1.1. Caracterización de la huella de adquisición

Por razones de costo y eficiencia, casi todas las adquisiciones son diseñadas a partir de un patrón periódico a lo largo de la posición de la fuente. Estos patrones pueden ser con tiros perpendiculares a las líneas de receptores, un patrón escalonado, celdas vectoriales o incluso mallas orientadas diagonalmente. Esta periodicidad da lugar a artefactos periódicos en los componentes de fase y amplitud de los datos, que al transformar al dominio de Fourier son posibles de identificar y suprimir.

Distintos errores de adquisición y procesamiento dan lugar a cambios en la forma de onda, amplitud y echado. Los artefactos generados durante la migración y al corregir por efecto del echado del reflector (DMO por sus siglas en inglés *Dip Mo-*

*veout*)(Falconer y Marfurt, 2008), en los datos y por el empalme del operador, así como errores sistemáticos en el análisis de velocidad, pueden dar lugar a la huella de adquisición. Los atributos son sensibles a componentes de longitudes de onda relativamente cortas de la huella de adquisición, haciendo de los atributos una excelente herramienta en la caracterización de la huella.

El ruido coherente de baja velocidad también pertenece al rango de frecuencias bajas, por lo que es útil primero filtrar las amplitudes sísmicas con un pasabajas para excluir la señal de alta frecuencia no contaminada (Davogustto et al., 2011). Tanto el volumen de datos sísmicos, como el volumen del atributo acondicionado, se transforman a rebanadas de tiempo para su procesamiento. Esta metodología se basa en el uso de filtros  $k_x - k_y$ . El filtro  $k_x - k_y$  es continuamente utilizado para la eliminación de ruido estructurado, tanto periódico como no periódico en la construcción de imágenes sísmicas. La ventana de análisis bajo la que actúa el filtro es rectangular  $E \times e$ , donde  $E$  = distancia entre fuentes y  $e$  = distancia entre receptores.

En el ejemplo, el resultado de transformar al dominio de Fourier (Fig. 4.7) permite visualizar la información de baja frecuencia centrada en el origen (la relacionada con la información sísmica útil) y la de alta frecuencia detectable (relacionada con datos anómalos no relacionados con la geología). En este dominio establecí un umbral (circunferencia  $k_x^2 + k_y^2 = 0.03$  con centro en el origen de ambos ejes  $k_x = 0$ ,  $k_y = 0$ ) tomando como referencia la nube magenta al centro del espectro, y tratando de cubrir todo el contenido de frecuencias bajas, sabiendo que en el atributo se ha realizado esta información, y que lo relacionado con la huella estará más cerca de los ejes pero alejado del origen. La dispersión de los datos originales es más uniforme (Fig. 4.7b) que en el volumen del atributo sísmico. En la escala de colores del espectro  $k_x - k_y$ , los tonos cálidos (magenta, rojo, amarillo) indican longitudes de onda más grandes, mientras que los tonos fríos (verde, cyan, azul) se refieren a longitudes de onda cortas.

Los eventos perfectamente planos estarán referidos a  $k_x - k_y = 0$ . Por lo tanto, la mayoría de los rasgos geológicos corresponden a la superficie  $k_x^2 + k_y^2 < k_{max}^2$ , siendo  $k$  el valor del radio del umbral, con centro en el origen del mapa  $k_x - k_y$ ; la huella de adquisición corresponde a los componentes periódicos de alta amplitud en el espectro.

Esta elección del umbral se realiza comparativamente entre los espectros del atributo y de los datos sísmicos originales para elegir el área que es más importante conservar. Una mala elección del umbral repercute en procesos posteriores de procesamiento, debido a que se podrían estar eliminando componentes de información sísmica útil. De la elección del umbral dependerá la estimación de la huella de adquisición y el éxito del flujo de atenuación.

Usualmente, los patrones repetitivos utilizados en la adquisición son diseñados con direcciones que van de Norte a Sur para las líneas longitudinales (de receptores) y de Este a Oeste para las líneas transversales (de fuentes). Cuando los ejes de la adquisición no son paralelos a estas direcciones preferenciales, es recomendable realizar una rotación de los datos. Mark Ng y Ye Zheng (2011) proponen estimar la huella utilizando una metodología en la que se giran los datos, de modo que el patrón de adquisición se alinee con las direcciones preferenciales. Se estiman los componentes de la huella de adquisición con los ejes coordinados rotados, al transformar al dominio  $k_x - k_y$ . Así, al regresar la huella estimada al dominio del espacio, regresar los ejes a su posición original para sustraer la huella. En este caso, debido a que la búsqueda por ventanas es paralela a los ejes coordinados N-S y E-O, se evitan confundir rasgos útiles de la información con ruido de adquisición y así atenuar la huella evitando la pérdida de detalles geológicos.

#### 4.1.2. Filtro de ranuras

Una vez establecido el umbral que establece qué componentes se mantendrán intactos, se estiman los componentes anómalos relacionados a la huella de adquisición para la elaboración de una máscara o filtro de ranuras que permita el paso de los componentes  $k_x - k_y$  de alta amplitud asociados con la huella, excluyendo la zona  $k_x^2 + k_y^2 < k_{max}^2$  asociada con rasgos geológicos y estructurales (Fig. 4.8).

El filtro de ranuras se regresa al dominio cartesiano y es aplicado al volumen de datos sísmicos para obtener un volumen solamente con los componentes de ruido, resultando en la huella de adquisición estimada. Este resultado también es útil para

establecer un control de calidad acerca de que tan certera fue la elección del radio del umbral en el dominio  $k_x - k_y$ , y permite determinar si el filtro actuó sobre el ruido o si afectó la señal. Para cada rebanada de tiempo el filtro que se genera es diferente dado que para cada rebanada la huella de adquisición es diferente. Lo que obtenemos es una versión sintética de la huella del estudio, en este caso, del volumen sísmico Vigilante (Fig. 4.9) y es posible observar que este filtro resalta la periodicidad de los componentes de la huella de adquisición, tanto vertical como horizontalmente. En la adquisición usualmente no es perfecta la geometría y por ello algunos componentes serán diferentes para cada zona del volumen.

### 4.1.3. Sustracción adaptable

Una vez obtenida la huella sintética o estimada, se utiliza, en el espacio, la *sustracción adaptable* con el fin de suprimir (restar) la huella del volumen de datos sísmicos (Falconer y Marfurt, 2008). En una situación ideal se esperaría que esta huella se pudiera sustraer de la información sísmica directamente. Sin embargo, existen cambios laterales en la geometría de adquisición debido a los inconvenientes de adquisición ya descritos. Esta técnica se utiliza para la eliminación de múltiples de periodo largo y para minimizar el error entre los datos originales ( $d_{ij}$ ) y la versión estimada del ruido ( $n_{ij}$ )

La sustracción adaptable es un ajuste por cuadrados mínimos de la información de la huella estimada, con el volumen de datos sísmicos. Donde la señal es más parecida entre uno y otro, se restaran las amplitudes, y donde es más diferente se conservará. Esto para que no se vea afectada la información que no es ruido y que por lo tanto no pertenece al volumen de ruido estimado. El ajuste se realiza de la siguiente manera

$$\min \epsilon^2 = \sum_{k=1}^K \left( \sum_{j=-M_y}^{M_y} \sum_{i=-M_x}^{M_x} d_{l(k)+i, m(k)+j} - \alpha_k \omega_{i,j} n_{l(k)+i, m(k)+j} \right), \quad (4.1)$$

donde  $\epsilon$  es el error,  $d_{l(k)+i, m(k)+j}$  son los datos dentro de la  $k$ -ésima versión ventaneada de los datos originales,  $\omega_{i,j}(x, y)$  es la función 2D que genera factores para un mejor

ajuste del ruido a los datos originales,  $\alpha_k$  es la amplitud del  $k$ -ésimo punto de control y  $n_{l(k)+i,m(k)+j}$  es la  $k$ -ésima versión ventaneada del ruido estimado (ver ejemplo 1D, Fig. 4.10). Reduciendo la Ec. 4.1 obtenemos la siguiente expresión en forma matricial

$$\mathbf{wn}^T \mathbf{wn} \alpha = \mathbf{wn}^T d, \quad (4.2)$$

donde  $\mathbf{wn}$  es el ruido ventaneado y  $\alpha$  es cada amplitud de los puntos de control. Resolviendo para  $\alpha_k$ ,

$$\alpha_k = [\mathbf{wn}^T \mathbf{wn} + \beta I]^{-1} \mathbf{wn}^T d, \quad (4.3)$$

para los cuales  $\beta$  es un factor de preblanqueado, e  $I$  es la matriz identidad. Estos parámetros previenen la división entre cero cuando existen trazas muertas. Los valores generados por la Ec. 4.3 generan el mejor ajuste de la función de ruido con los datos sísmicos.

Podemos observar el resultado de llevar a cabo la atenuación asistida por atributos con la sustracción adaptable entre el volumen de amplitudes sísmicas y la huella estimada a partir del filtro de ranuras generado del atributo sísmicos geométrico para el volumen Vigilante para la rebanada de tiempo en 0.5 s en la Fig. 4.11,

Existen rasgos de las estructuras y de la geología que es posible continuar detectando, pero los relacionados con la huella fueron atenuados (señalados por flechas amarillas), mientras que fue eliminado también otro ruido aleatorio presente en los datos que, al ser removido, aclara la naturaleza de otros rasgos que ya no pueden ser confundidos con componentes de la huella. Esto es más evidente al realizar los cálculos de atributos geométricos con este resultado.

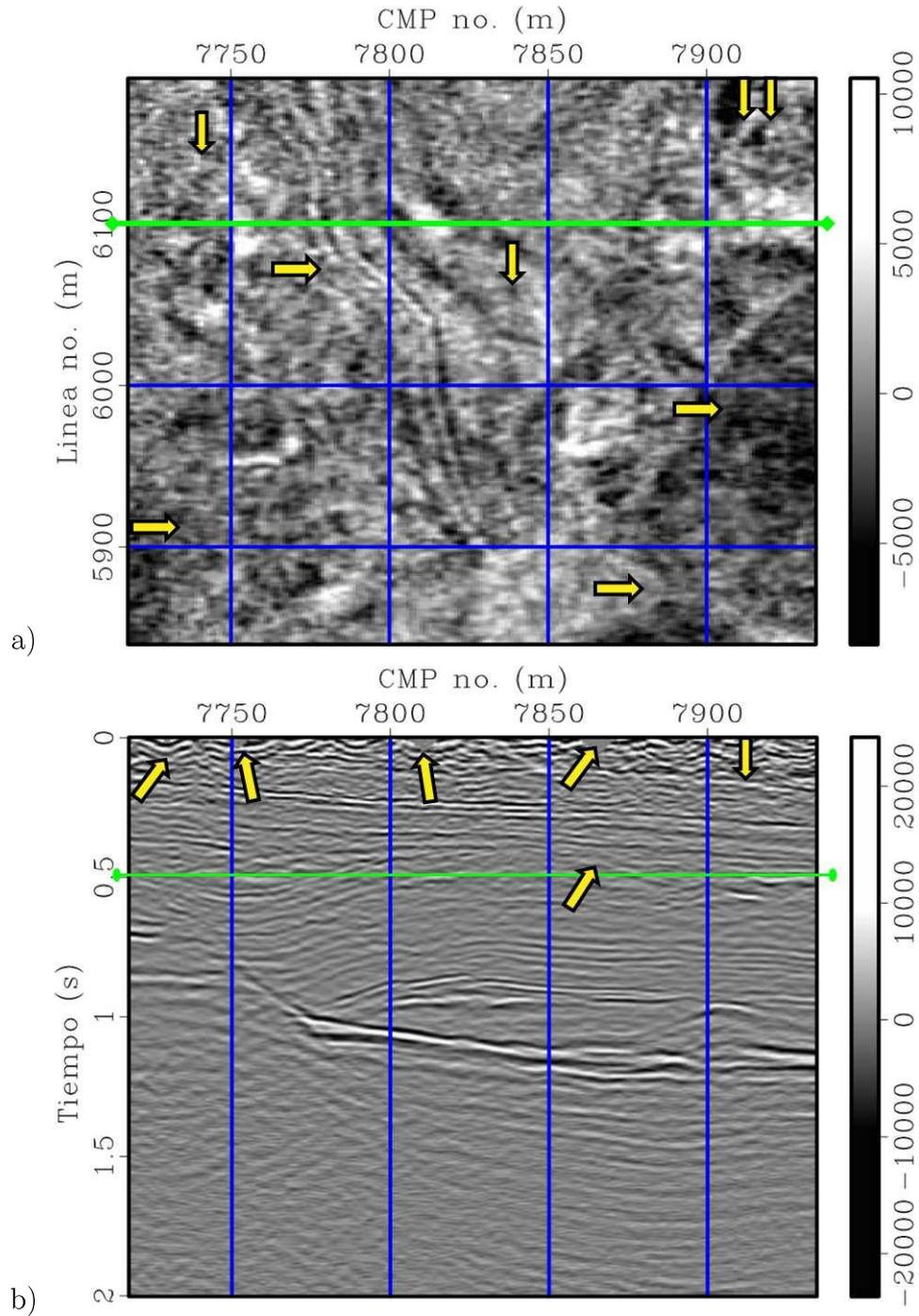


Figura 4.3: a) Amplitudes sísmicas de la rebanada de tiempo en 0.5 s (misma que en la Fig. 4.2). Las flechas amarillas muestran algunos rasgos reconocibles lineales que pueden ser asociados con la huella de adquisición. b) Sección transversal de la línea 6100. Las líneas verdes enseñan dónde se intersectan las secciones. (Pág. 5, Fig. 1.2b y c.)

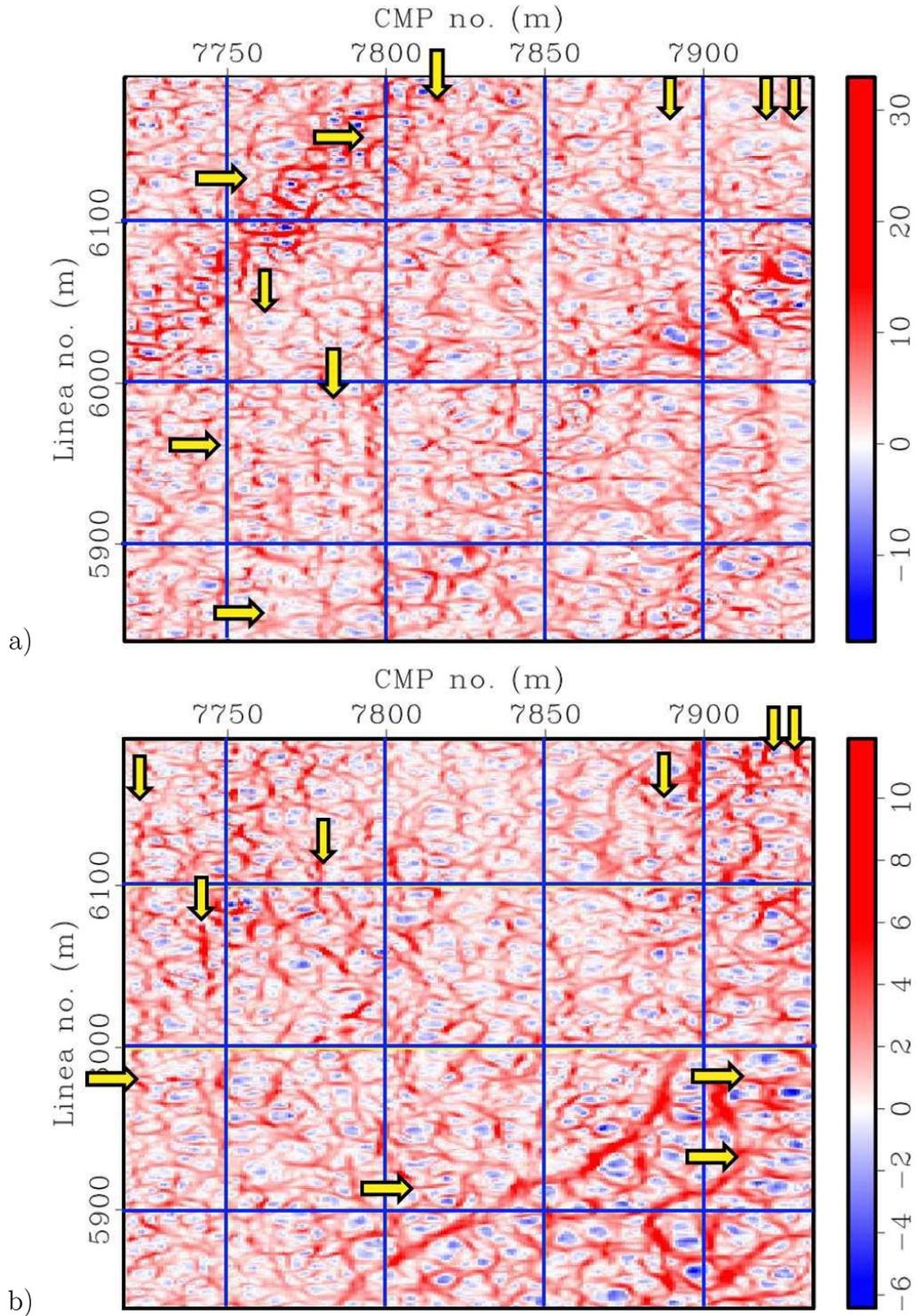


Figura 4.4: Atributo de curvatura de amplitud, para la rebanada de tiempo en a) 0.4 s y b) 0.5 s, donde es posible ver la contaminación de la información sísmica por huella de adquisición. En esta sección el problema de la huella es generado principalmente por las variaciones de apilamiento y distancia fuente a receptor.

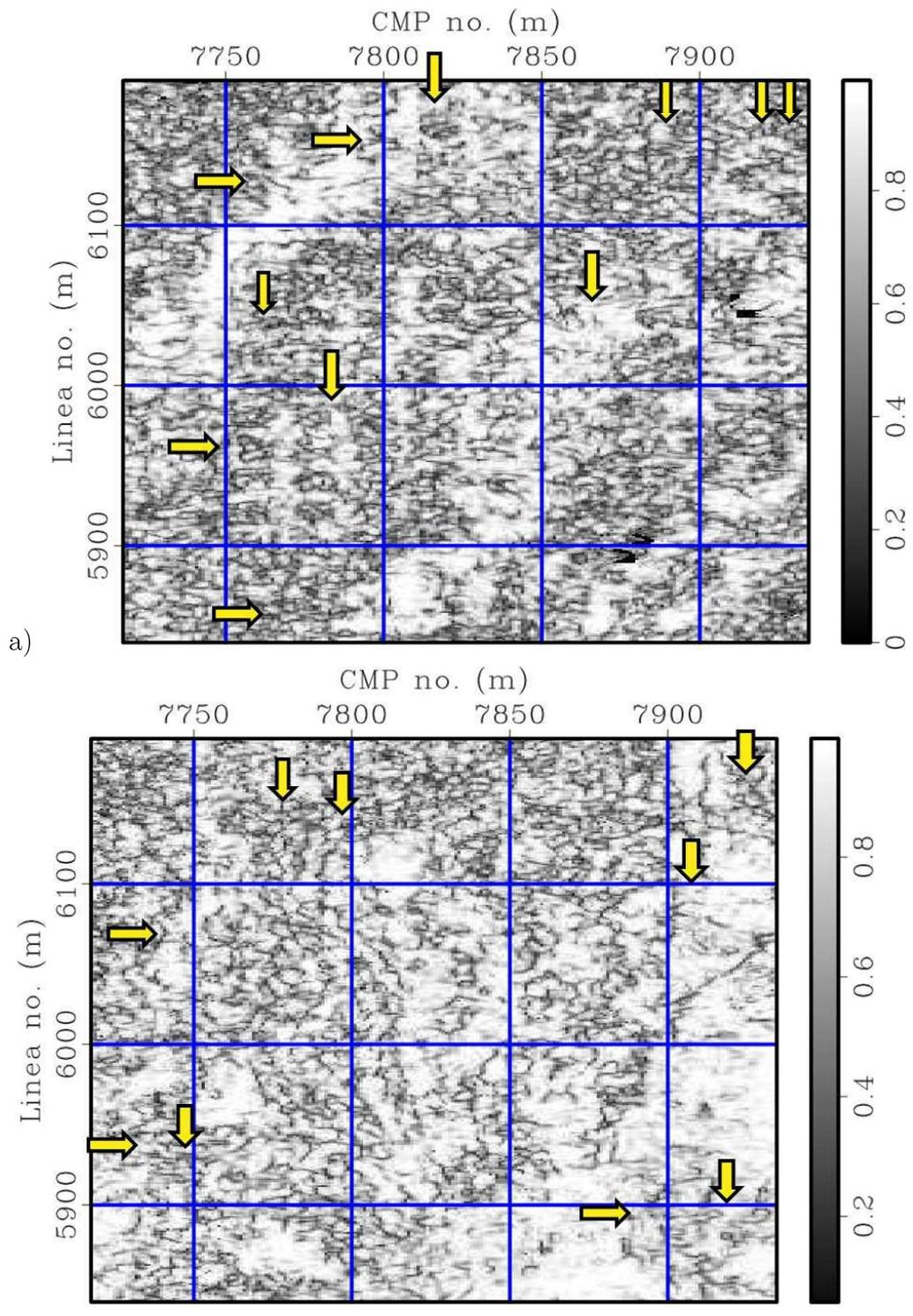


Figura 4.5: Atributo de coherencia, para la rebanada de tiempo en a) 0.4 s y b) 0.5 s, donde es posible ver la contaminación de la información sísmica por huella de adquisición.

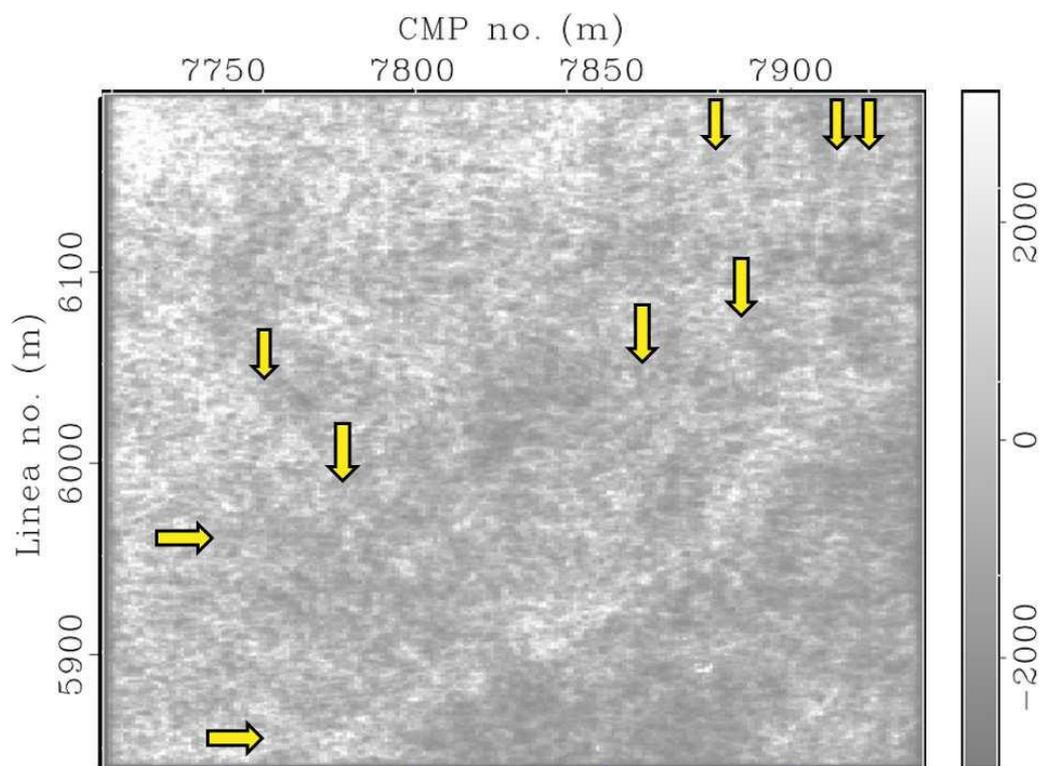


Figura 4.6: Atributo de coherencia suavizado por un filtro de media, controlándolo con un factor del 25 %.

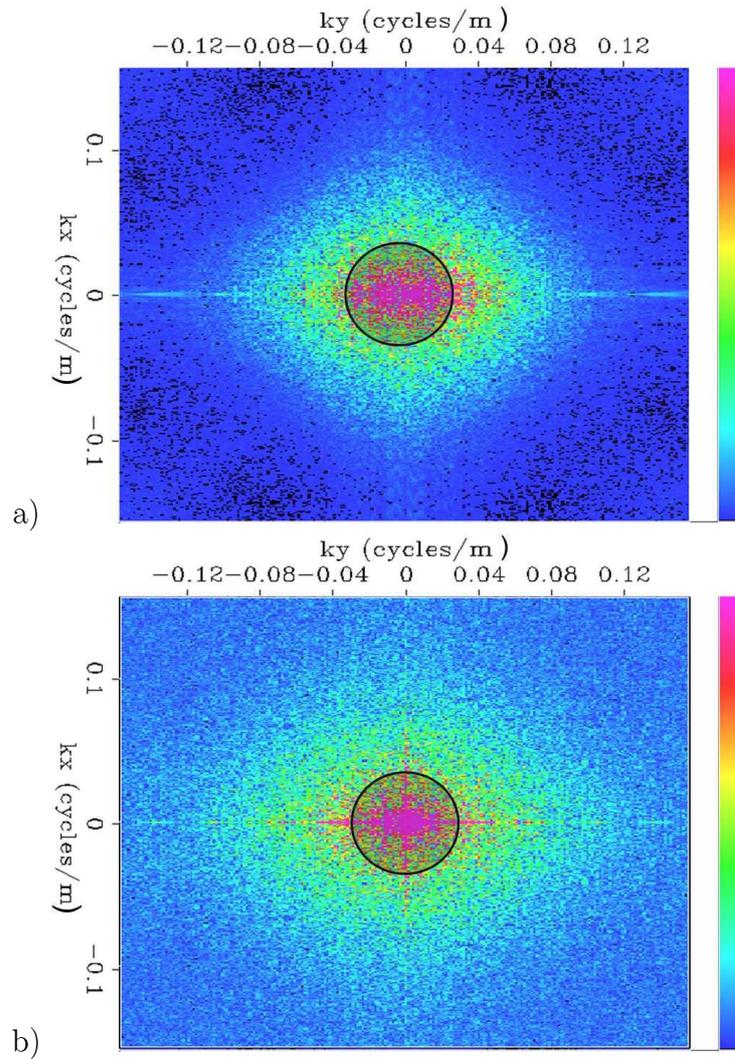


Figura 4.7: Componentes espectrales de a) las amplitudes sísmicas originales y b) del atributo sísmico al transformar al dominio  $k_x - k_y$ . La circunferencia con centro en el origen establece un umbral bajo el cual actuará el filtro de ranuras, con un radio  $k = 0.03$  ciclos/m.

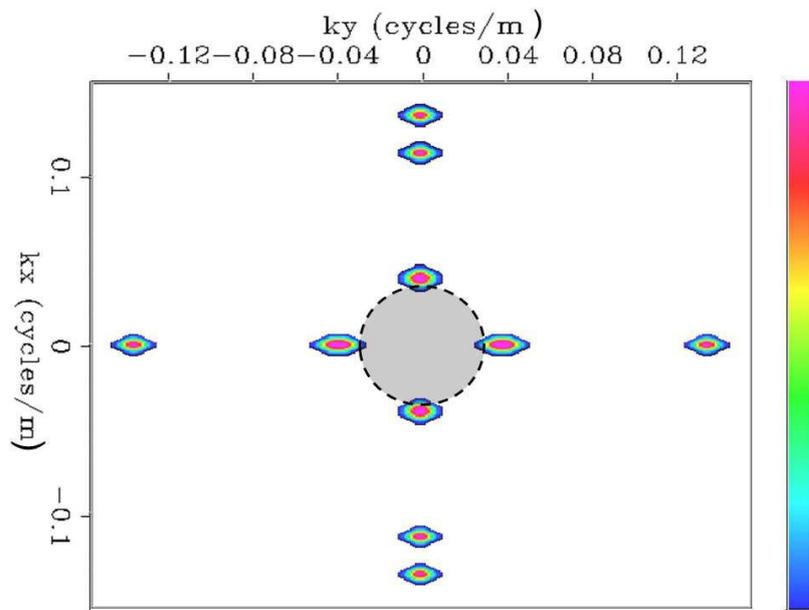


Figura 4.8: Filtro de ranuras que permite pasar los componentes de alta amplitud relacionados con la huella de adquisición en la rebanada de tiempo en 0.5 s.

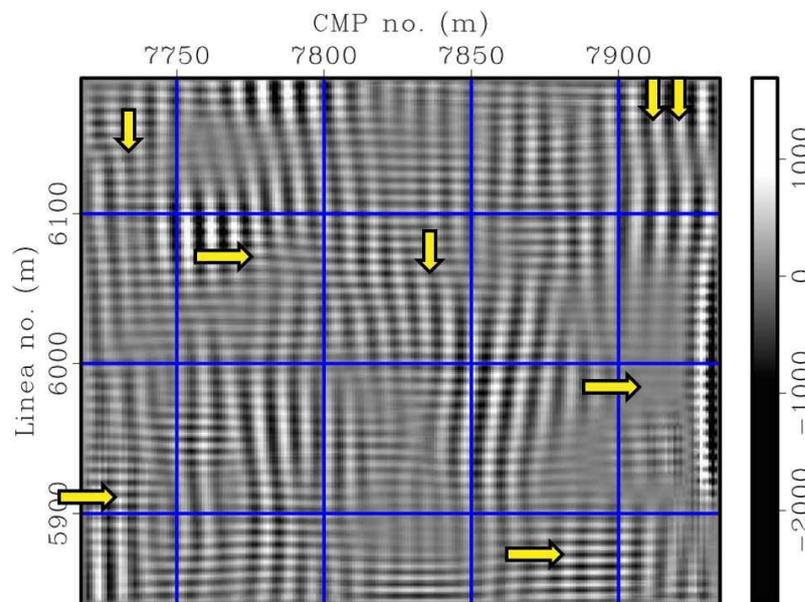


Figura 4.9: Versión sintética de la huella de adquisición en la rebanada de tiempo en 0.5 s.

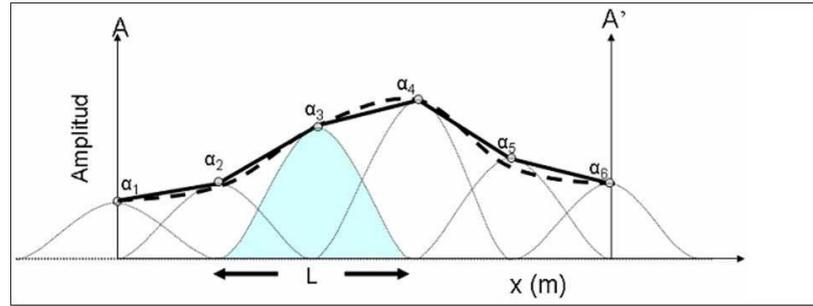


Figura 4.10: Representación de una función continua 1D (línea punteada) utilizando como apoyo funciones cosenoidales traslapadas. Cada función tiene un soporte numérico respecto a la distancia  $L$ . Al aproximar las amplitudes de las funciones a los puntos de control  $\alpha_k$  con cuadrados mínimos, se obtiene una aproximación suavizada (línea sólida) (adaptada de Falconer y Marfurt, 2008).

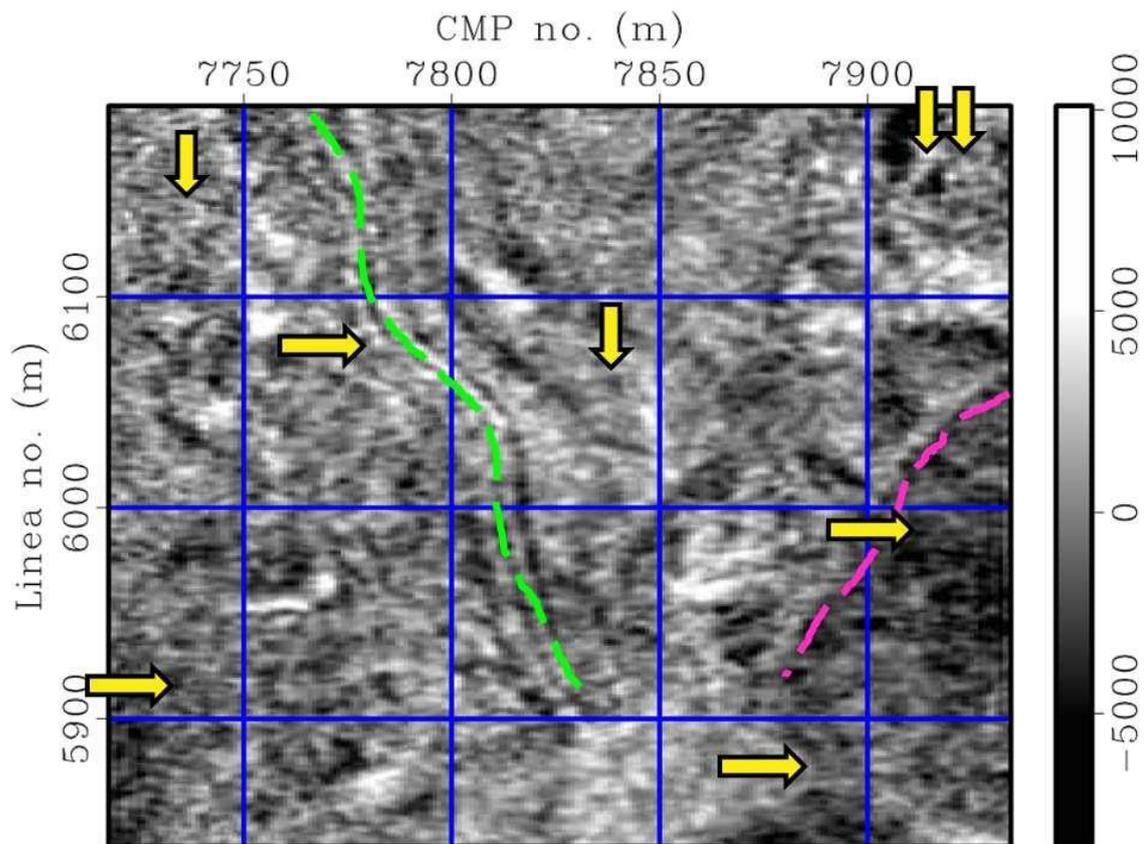


Figura 4.11: Rebanada de tiempo en 0.5 s filtrada por el flujo de atenuación basado en el atributo de coherencia.

# Capítulo 5

## Cálculo de atributos mejorados

La finalidad de llevar a cabo esta metodología de atenuación de huella de adquisición es generar atributos sísmicos, en específico geométricos, que permitan detectar mejor las estructuras regionales. En la Fig. 4.11 muestro el resultado para este volumen de datos, donde puedo resaltar la relevancia de algunos rasgos estratigraficos, como los señalados con las líneas punteadas. Es más evidente la mejora de los resultados al recalcular los atributos, ya que ahí es posible constatar qué rasgos estaban enmascarados por huella de adquisición.

En este resultado es posible observar que no hay pérdida de rasgos estructurales regionales, aunque la ganancia del resultado no es tan contundente. La forma de verificar que el flujo de atenuación, para este ejemplo, ha sido útil es generando los atributos sísmicos geométricos de nuevo para saber si las propiedades de la señal son más claras. También es necesario recalcar que la huella es característica de cada conjunto de datos, y que depende del atributo utilizado para el flujo el tipo de ruido que ha de ser atenuado.

Realicé de nuevo la metodología de cálculo de atributos sísmicos para generar resultados de la representación resultante de los datos. Calculé el atributo de coherencia (Fig. 5.1) y podemos observar que, en comparación con la Fig. 4.6, se pueden delimitar mejor algunas discontinuidades, y específicamente las señaladas por las flechas

amarillas donde indiqué variaciones laterales de amplitud predominantes en la representación sísmica para esta rebanada de tiempo.

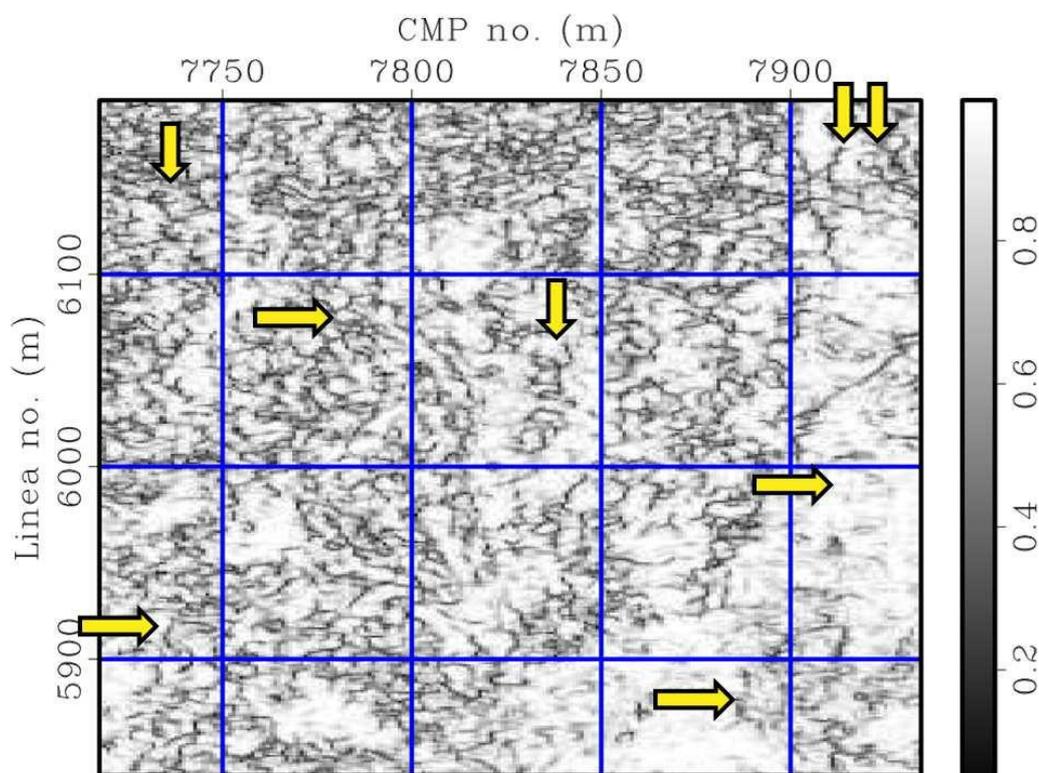


Figura 5.1: Rebanada de tiempo en 0.5 s, filtrada. Respuesta del atributo de energía total de coherencia después de llevar a cabo el flujo de atenuación guiado por el atributo de coherencia.

Utilicé este resultado para calcular el atributo de curvatura (Fig. 5.2). En comparación con el resultado mostrado del cálculo de curvatura de amplitud, previo a efectuar la atenuación de huella de adquisición (Fig. 4.4b), es posible notar que los rasgos señalados con flechas en esa imagen, ya no son representativos en esta otra, y ahora es posible identificar más rasgos estructurales (flechas amarillas).

En éste resultado ya es más evidente el efecto del flujo de trabajo porque es posible detectar mejor los rasgos de las estructuras señaladas. Sin embargo, con la finalidad de simplificar aún más la imagen y de mejorar la detección de estructuras, utilizo el atributo de curvatura para eliminar otros tipos de ruido, en el volumen filtrado ya por el flujo basado en el atributo de coherencia.

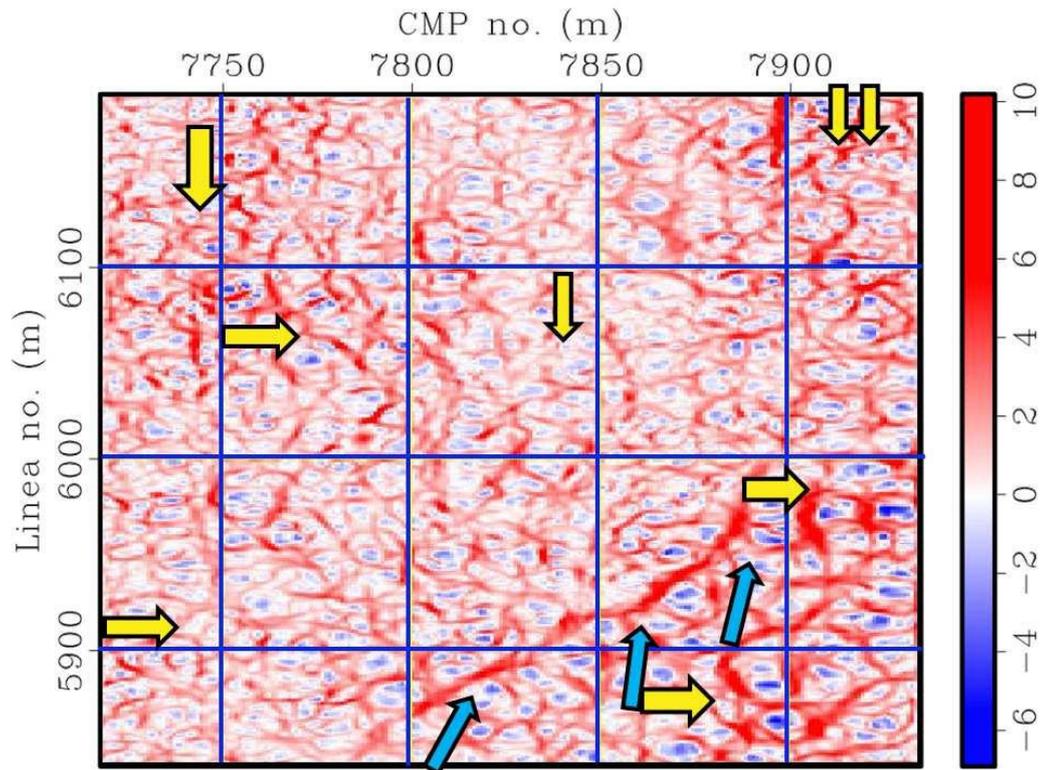


Figura 5.2: Rebanada de tiempo en 0.5 s, filtrada. Respuesta del atributo de curvatura de amplitud después de llevar a cabo el flujo de atenuación guiado por el atributo de coherencia.

Observando los resultados, utilicé por segunda ocasión el flujo de atenuación de huella de adquisición con el volumen resultante de atenuar la huella guiando el flujo con el atributo de coherencia (Fig. 4.2), pero utilizando el atributo sísmico de curvatura de amplitud. Realicé los mismos cálculos para de nuevo obtener los atributos sísmicos de coherencia y de curvatura de amplitud para observar que rasgos se resaltaban. El iterar con la metodología me permite obtener una imagen más simplificada de las estructuras y el realce de propiedades diferentes.

En la Fig. 5.3 se resaltan rasgos estructurales que no eran visibles en los resultados de coherencia anteriores. Las flechas en rosa señalan discontinuidades que ya son más fáciles de observar, las flechas amarillas señalan donde habían artefactos por huella de adquisición pero que fueron atenuados, y las flechas verdes señalan rasgos lineales,

en dirección de la huella longitudinal y transversal, que no pertenecen a ruido y están relacionados a las estructuras geológicas pero parecieran relacionados con la huella.

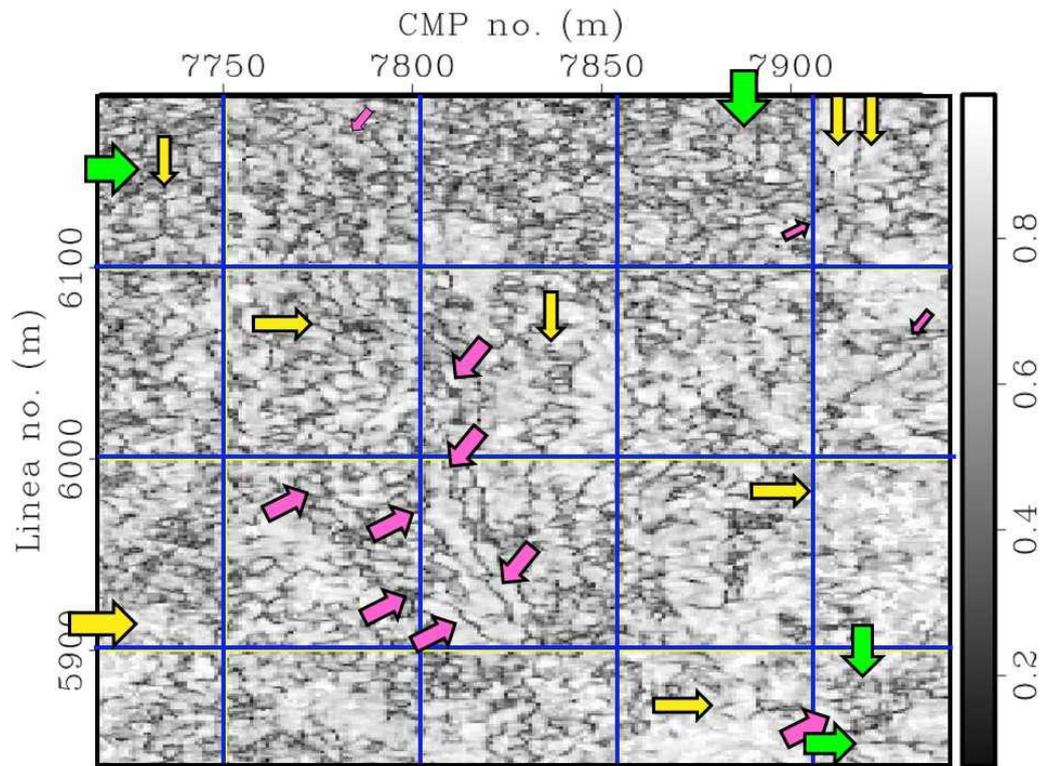


Figura 5.3: Rebanada de tiempo en 0.5 s, filtrada. Respuesta del atributo de energía total de coherencia después de llevar a cabo el flujo de atenuación guiado por el atributo de curvatura de amplitud.

Con el resultado de curvatura de amplitud (Fig. 5.4), hay rasgos relacionados con estructuras difíciles de detectar en el cálculo previo (Fig. 4.4). En esta representación de la rebanada en 0.5 s podemos observar rasgos que también son visibles en el atributo de coherencia donde esas estructuras se delinean y señalo con flechas negras rasgos relacionados con estas estructuras. Señalo con flechas amarillas áreas donde había afectación por huella de adquisición. Las flechas azules, a su vez, señalan un rasgo importante y fácilmente reconocible a lo largo de los resultados de cada uno de los pasos de procesamiento que, sin embargo, pierde relevancia al observar el atributo de curvatura de amplitud, calculado con los resultados de filtrar o atenuar la huella con el atributo de coherencia y con curvatura de amplitud.

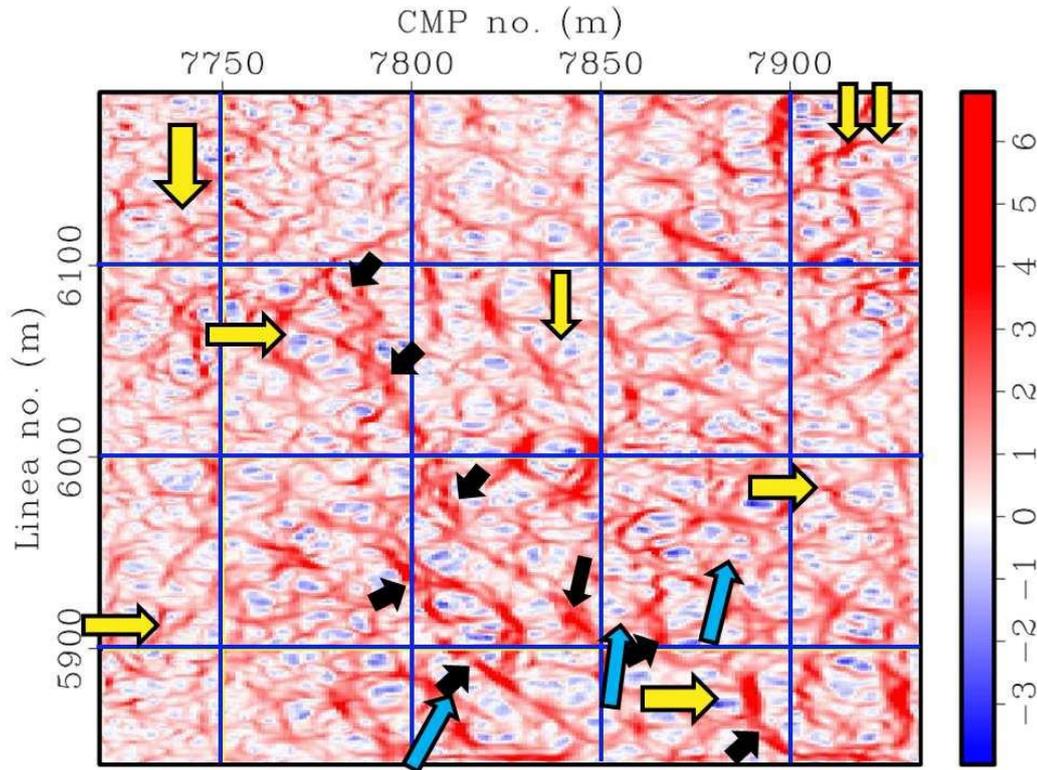


Figura 5.4: Rebanada de tiempo en 0.5 s, filtrada. Respuesta del atributo de curvatura de amplitud después de llevar a cabo el flujo de atenuación guiado por el atributo de curvatura de amplitud.

En la Fig. 5.4 es posible observar que si existían rasgos enmascarados, o que cobraron importancia al ser atenuado ruido. El atributo de curvatura fue, en este caso, una mejor elección para llevar a cabo el flujo. Usualmente, ambos atributos ayudan a mejorar la imagen, pero ocurre que no siempre es igual. Para cada volumen de datos es importante generar un flujo adecuado de trabajo partiendo del mencionado en este trabajo. Tanto la parametrización como la elección de atributos son decisivos en los rasgos que se buscan resaltar y, por lo tanto, en el resultado. Lo que es posible notar en la Fig. 5.2 con respecto a la Fig. 5.3 es que, a diferencia de haber realizado el flujo con los mismos parámetros pero de forma inversa, el enfoque de las estructuras es diferente. La detección de los bordes de las discontinuidades es mejor en el segundo caso por que la finalidad de atenuar por curvatura fue eliminar información de muy alta frecuencia no relacionada con cambios de pendiente, para después, realzar las dis-

continuidades con el atributo de coherencia. En cambio, en el primer caso, al resaltar primero las discontinuidades y después el carácter de la pendiente de los reflectores, hizo que hubiera cambios en la intensidad de detección de bordes.

Cada uno cumplió con su objetivo, en los resultados del cálculo de coherencia después de filtrar por huella de adquisición, permiten una mejor detección de las estructuras regionales, y cabe destacar que si se buscaran estructuras más locales como fracturas, los parámetros del flujo deben cambiar, así como las características del atributo a utilizar. En el caso de los resultados de curvatura se pueden observar que el carácter de la estructura se mantiene pero es más relevante para su detección. Así como pierden relevancia los rasgos lineales señalados en la Fig. 4.4, y que de igual manera sólo busqué resaltar rasgos geológicos regionales, para rasgos locales como fracturas, es necesario cambiar los parámetros del flujo y las características del atributo para llevarlo a cabo.

Cada uno de los atributos resalta ciertas características de la señal sísmica, que permiten localizar y delimitar estructuras relevantes para llevar a cabo interpretación estructural de la zona de exploración. Es un proceso iterativo en el que el intérprete debe ser capaz de identificar la huella de adquisición desde un principio para poder determinar los parámetros más adecuados, tanto si las estructuras buscadas son regionales o locales, para lo cual es necesario conocer mejor el objetivo de exploración. También, es necesario, para realizar una interpretación más efectiva, utilizar varios de los resultados a la par para localizar mejor los rasgos geológicos.

# Capítulo 6

## Conclusiones y recomendaciones

- Existe gran mejora en el resultado del cálculo de atributos sísmicos geométricos, ya que permite detectar estructuras del subsuelo enmascaradas por la huella de adquisición.
- La huella depende de los datos y el resultado con cada atributo será diferente, manteniendo su expresión característica de líneas paralelas con un alineamiento de Norte a Sur y de Este a Oeste.
- La mejor forma de elegir el umbral para generar el filtro de ranuras es comparar los espectros en el dominio de Fourier de los datos originales con el del atributo, tratando de elegir valores altos para el radio del umbral, de modo que no sea eliminada información sísmica útil.
- La mejor forma de realizar un control de calidad del proceso es calcular los mismos atributos con el volumen de datos filtrado por el proceso de atenuación y realizar la comparación de las rebanadas de tiempo.
- Pude observar que otros tipos de ruido fueron detectados y atenuados, al obtener el volumen de huella estimada en el flujo de atenuación. Este ruido muestra cierta periodicidad generada en alguna otra etapa del procesamiento. Estos rasgos se confunden con estructuras geológicas o litológicas y repercuten en mala interpretación y elección de horizontes.

- Debemos ser cuidadosos en la parametrización de los cálculos y utilizar la combinación de herramientas con las que se conserve la información sísmica de longitud de onda corta y con la máxima preservación de amplitudes.
- Teniendo claro el objetivo geológico, es más sencillo establecer los parámetros de atenuación de huella, y es mejor cuando existen datos con los cuales correlacionar los resultados, ya sean geológicos o geofísicos.
- En este trabajo, realicé pruebas con diferentes ponderaciones tanto para los filtros del acondicionamiento, como del cálculo de atributos. He de destacar que es necesario realizar pruebas con varios valores en los parámetros de modo que se mejore la representación del objetivo. De igual manera, cada conjunto de datos requerirá un diferente tratamiento considerando las características de adquisición y de procesamiento previos.
- Utilizando el flujo de trabajo con diferentes atributos, también es posible atenuar diferentes tipos de ruido, y por ello es que remarco que es muy útil el contar con información adicional a la sísmica.
- El volumen de datos sometido a atenuación de huella de adquisición es un buen punto de partida para continuar con procesamiento posterior de AVO e inversión de impedancias, o en la obtención de modelos más exactos y congruentes con el subsuelo.
- Es recomendable hacer uso de multiatributos para ser más eficaces en la interpretación.
- Este flujo de trabajo es una opción para acalorar el proceso y puede utilizarse variando la parametrización, sin embargo no es único y dependerá del objetivo de exploración, o del tiempo de cómputo disponible para llevarse a cabo, ya sea simplificándose a la aplicación de un sólo procedimiento de filtrado o a más.
- Para el personal de PEMEX Exploración y Producción tiene gran impacto el utilizar la metodología en los proyectos de exploración y explotación de yacimientos. La eficiencia y rapidez del resultado permite al intérprete cerciorarse

de los resultados al realizar correlaciones más exactas con otros tipos de información geofísica y geológica.

# Agradecimientos

A Marco Vázquez García, Gerente de Estudios Geofísicos de PEMEX Exploración y Producción, por permitir el uso de datos sísmicos y permiso para publicarlos.

A Rodolfo Rocha Ruiz de la Gerencia de Producción Norte de PEMEX Exploración y Producción por su apoyo y por facilitar el acceso a los datos sísmicos de Vigilante.

Al Instituto Mexicano del Petróleo y a la Gerencia de Estudios Geofísicos de PEMEX Exploración y Producción por el financiamiento para la realización de este trabajo.

Gracias a Sergio Chávez por darme la oportunidad de colaborar con él, por sus sugerencias, el apoyo brindado desde que lo conocí en clase, por ayudar a que este trabajo saliera adelante y por su constante interés en el aprendizaje de todos aquellos que lo rodean.

Agradezco a Oziel González Verdejo por su guía y paciencia al inicio de este trabajo; a Vanessa Mora por ayudarme y dedicar tiempo a este escrito, además de motivar a cada instante su realización.

A Martín Cárdenas Soto le agradezco haber sido partícipe de este comité y sobretodo por su dedicación y entrega a la enseñanza de Geofísica. A Cinna Lomnitz por sus observaciones del estilo en el resumen en inglés y por ser parte de este comité de titulación. A Guillermo Pérez Cruz por su tiempo y dedicación a la revisión de este trabajo, sus comentarios y sugerencias fueron un buen complemento a este trabajo. A David Escobedo Zenil le agradezco mucho que participara en este comité de titulación, sus comentarios y sugerencias para una comprensión mejor del texto me fueron de gran

ayuda.

A quienes, a pesar de sus ocupaciones le dedicaron tiempo a este trabajo y ayudaron a que mejorara y fuera más claro, Oswaldo Davogustto Cataldo (Universidad de Oklahoma), Alejandro Cabrales Vargas (PEMEX-PEP), Kurt J. Marfurt (Universidad de Oklahoma), Gabriel Vázquez García (IMP-Gerencia de Estudios Geofísicos de PEMEX-PEP).

Agradezco de sobremanera a todos mis colegas ingenieros con quienes compartí momentos inolvidables en la Facultad de Ingeniería. Mis compañeros geofísicos: Jesús Sánchez, Miguel A. Rodríguez, Adriana González, Miriam Zarza, Mario Centeno, Douglas Gómez, José Luis Lezama, Hector Rodríguez, Julián Zapotitla; amigas y amigos ingenieros: Rubí Rodríguez, Irene Montero, Fabiola Olivares, Talía Palma, Ana Cruz; amigos de casi toda la vida: Itzel Maldonado, Rafael Flores, Karen Corona, Karla Alvarado, en fin, todos quienes compartimos esta etapa tan especial en la universidad y fuera de ella. Agradezco en especial a Lupita Cortés y a Erick Cámara por estar ahí siempre al pie del cañón. Sé que faltan muchísimos pero a todos agradezco mucho su paciencia y ánimo por seguir adelante.

Finalmente, agradezco todo lo que han hecho por mi las personas que más aprecio en este mundo: Adela y Fernando, mis papás; Saúl, Guillermo y Marisela, mis hermanos; Luis, Karla y Fer, mis latosos y ocurrentes sobrinos; a Héctor, mi cuñado, y todos quienes han estado al pendiente de mi siempre, enhorabuena, y ¡lo que falta aún!

Gracias Universidad Nacional Autónoma de México por ser el eje del desarrollo humano de esta nación. Los universitarios siempre hemos de luchar para que continúe su legado y para que crezca en pos del conocimiento universal.

# Referencias

- Al-Dossary, S. y Y. E. Wang, 2011, Structure-preserving smoothing for 3D seismic attributes: *SEG Expanded Abstracts*, 30, 1004-1008.
- Bahorich, M. y S. Farmer, 1995, 3D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube: *The Leading Edge*, 14, 1053-1058.
- Bakker, P., L.J. van Vliet, y P.W. Verbeek, 1999, Edge-preserving orientation adaptive filtering: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1, 535-540.
- Chopra, S. y K.J. Marfurt, 2010, Integration of coherence and volumetric curvature images: *The Leading Edge*, 29, 1092–1107.
- Chopra, S. y K.J. Marfurt, 2008, Emerging and future trends in seismic attributes: *The Leading Edge*, 27, 298–318.
- Chopra, S. y K.J. Marfurt, 2011, Structural curvature versus amplitude curvature: *SEG Expanded Abstracts*, 30, 980–984.
- Cvetkovic, M., N. Pralica, S. Falconer, K.J. Marfurt y S. Chávez-Pérez, 2008, Comparison of some algorithms for acquisition footprint suppression and their effect on attribute analysis: *SEG Expanded Abstracts*, 27, 2637–2641.
- Davogustto C., O.E., 2011, Removing footprint from legacy seismic data volumes: Tesis de Maestría, Universidad de Oklahoma, Norman, OK, EEUU.
- Davogustto, O., Dowdell, B., Guo, S., Kwiatkowski, J. T., Roy, A., Verma, S., Zhang,

B. y Marfurt, K.J., 2011, Running AASPI Software with GUIs (manual de usuario): Universidad de Oklahoma, Norman, OK, EEUU.

Falconer, S. y K.J. Marfurt, Attribute-driven footprint suppression: *SEG Expanded Abstracts*, 27, 2667–2671.

Hall, M., 2007, Smooth operator: Smoothing seismic interpretations and attributes: *The Leading Edge*, 26, 16–20.

Hill, S., M. Schultz y J. Brewer, 1999, Acquisition footprint and fold-of-stack plots: *The Leading Edge*, 18, 686–695.

Marfurt, K.J., 2006, Robust estimates of 3D reflector dip and azimuth: *Geophysics*, 71, P29–P40.

Meunier, J., 2011, Seismic acquisition from yesterday to tomorrow: Society of Exploration Geophysicists.

Ng, M. y Y.Zheng, 2011, Multi-orientation footprint attenuation using co-ordinate rotations on 3d data: *SEG Expanded Abstracts*, 30, 3678–3682.

Schuster, G.T. y Z.Liu, 2001, Seismic array theorem and rapid calculation of acquisition footprint noise: *Geophysics*, 66, 1843–1849.

Gijs J.O. Vermeer, 2009, 3D Seismic Survey Design: Society of Exploration Geophysicists.