



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA**

**APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA ONDÍCULAR AL PROCESAMIENTO
E INTERPRETACIÓN DE REGISTROS GEOFÍSICOS DE POZO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

ERIK CAMACHO RAMIREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ OSCAR CAMPOS ENRÍQUEZ
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

México, D. F., Abril 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Yo también he aprendido a esperar, y a fondo-pero sólo a esperarme a mí mismo. Y por sobre todas las cosas he aprendido a estar de pie y caminar y correr y saltar y trepar y bailar. He aquí lo que enseño: ¡Quien quiera un día aprender a volar no es presa que se caza al vuelo! He aprendido a subir por escaleras de cuerda a más de una ventana; con piernas ágiles me he trepado a altos mástiles. Gozaba yo del estar trepado en altos mástiles del conocimiento: - del llamear cual llamas en altos mástiles; ¡Luz humilde, pero gran consuelo para navegantes desviados de su rumbo y naufragos!

Por muchos caminos y modos he llegado a mi verdad; no por una sola escalera he subido a la altura donde mi mirada observa mi lejanía.

De mal grado preguntaba por caminos: ¡esto siempre me ha repugnado! Prefería preguntar y ensayar los caminos mismos.

Todo mi caminar ha sido en ensayar y preguntar; ¡y contestar a tales preguntas también hay que aprenderlo! ¡He aquí mi gusto!

No es ni bueno ni malo; pero es el mío, del que ya no me avergüenzo y que ya no oculto.

‘Este es mi camino - ¿Cuál es el de ustedes?’ - así contestaba yo a los que me preguntaban por el camino: ¡Pues el camino no existe!

Friedrich Nietzsche. Así habló Zaratustra.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

*Agradezco a mis padres **Víctor Villegas y Teresa Ramírez**, mis hermanos **Cristhian Camacho y Job Villegas**, por haberme enseñado a ser un hombre libre y por estar conmigo en los momentos más importantes de mi vida.*

*A mi esposa **Beatriz Espinosa**, quien me ha enseñado el valor de compartir mi pensamiento y vida, y por el amor que siempre me ha dado en cada momento que pasamos juntos.*

*Agradezco a mi tutor y amigo el **Dr. Oscar Campos Enríquez**, por el apoyo durante la elaboración de este trabajo de tesis, pero sobre todo por su interés por mi desarrollo personal, siendo parte fundamental de mi constante motivación por llegar a ser un excelente profesional por medio de su ejemplo.*

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por ser facilitadora del aprendizaje durante mi estancia en la maestría de ciencias de la tierra.*

*A mis sinodales **Coconi Morales Enrique, Aquino López Ambrosio, Rivera Recillas David y Arango Galván Claudia**, por sus comentarios en la elaboración de mi trabajo, compartiendo su experiencia e interés.*

*A mi compañero de maestría **Ernesto Gonzales** por sus comentarios acerca de la tesis.*

*Finalmente, quiero agradecer a **Petróleos Mexicanos** por mostrar interés en mi desempeño dentro de la empresa, dándome siempre el apoyo y soporte requerido.*

Contenido.

Resumen (pag.9)

1. Marco Teórico (pag.11)

1.1. Propiedades de Ondícula (pag.12)

1.2. Transformada Ondicular Continua (pag.15)

1.2.1. Ondícula de Morlet (pag.18)

1.3. Transformada Ondicular Discreta (pag.19)

1.4. Análisis Multi-resolución (pag.22)

1.5. Atributos Sísmicos (pag.25)

1.5.1. Una breve Historia (pag.26)

1.6. Redes Neuronales (pag.31)

1.6.1. Arquitectura de la red (pag.33)

1.6.2. Aprendizaje (pag.34)

2. Descripción de la zona de Estudio (pag.39)

2.1. Geología (pag.39)

2.2. Arquitectura del Yacimiento (pag.41)

2.3. Características del Yacimiento (pag.43)

2.4. Marco Estructural y Estratigráfico (pag.46)

2.5. Datos de Pozo y Sísmica 3D (pag.48)

3. Aplicación de transformada ondicular a registros geofísicos de pozo (pag.53)

3.1. Análisis de impedancias (pag.53)

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- 3.2. Aplicación de Redes Neuronales (pag.55)
- 3.3. Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento de registros geofísicos de pozo (pag.61)
- 3.4. Billy Yates 18D (pag.69)
- 3.5. Billy Yates 13 (pag.73)
- 3.6. Billy Yates 15 (pag.76)
- 3.7. Billy Yates 11 (pag.79)
- 3.8. Cap Yates 9 (pag.82)
- 4. **Aplicación del atributo de descomposición espectral mediante transformada rápida de Fourier (FFT) (pag.87)**
- 5. **Aplicación de la Transformada Ondicular Discreta como Atributo Sísmico (pag.93)**
- 6. **Análisis mediante la Transformada Ondicular Discreta (pag.108)**
- Conclusiones (pag.117)**
- Bibliografía (pag.120)**

Índice de Figuras

- 1.1. Diferentes tipos de Ondículas (pag.13)
- 1.2. La parte real e imaginaria de la ondícula de Morlet y su espectro de Fourier en diferentes escalas (pag.18)
- 1.3. Transformada Ondicular Discreta (pag.19)
- 1.4. Transformada Ondicular Continua basada en análisis multi-escala (pag.24)
- 1.5. Modelo de una Neurona (pag.31)
 - 1.5.1. Diferentes tipos de funciones de activación (pag.33)
 - 1.5.2. Una taxonomía de arquitectura de redes (pag.34)
- 2.1. Localización del campo Boonsville (pag.40)
 - 2.1.1. Columna estratigráfica de la cuenca Fort Worth (pag.40)
- 2.2. Tendencias de Registros de pozo y sub-facies de depósito de la secuencia caddo (pag.42)
- 2.3. Nomenclatura estratigráfica utilizada para definir secuencias genéticas en Boonsville (pag.44)
 - 2.3.1. Intervalos Net pay en las secuencias Caddo y Vineyard (pag.45)
 - 2.3.2. Distribución del espesor neto de hidrocarburo entre Caddo y Vineyard (pag.46)
- 2.4. Mapa estructural en tiempo de la cima Vineyard (pag.47)
 - 2.4.1. Respuesta en Amplitud sísmica sobre Vineyard (pag.48)
 - 2.4.2. Perfil sísmico ABC mostrando Karstificación (pag.49)
 - 2.4.3. Esquema del cubo Boonsville (pag.51)
 - 2.4.4. Mapa de conjunto de pozos del área de estudio (pag.52)
- 3.1. Impedancias acústicas del campo Boonsville (pag.54)
- 3.2. Arquitectura de la red neuronal utilizada (pag.56)
 - 3.2.1. Independencia de registros utilizados para entrenar la red (pag.56)
 - 3.2.2. Entrada y salida de datos para la red neuronal (pag.57)
 - 3.2.3. Convergencia del modelo de la red neuronal (pag.58)

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- 3.2.4. Diagrama de aprendizaje de la red neuronal (pag.59)
- 3.2.5. Resultado de la aplicación de la red neuronal al registro neutrón en el pozo BY15 (pag.60)
- 3.3. Flujo de trabajo durante la programación en Matlab para la aplicación de la transformada ondicular a registros geofísicos de pozo (pag.65)
 - 3.3.1. Ejemplo para datos de lluvia utilizando WT (pag.67)
 - 3.3.2. Procedimiento de la aplicación de la transformada ondicular a registros geofísicos de pozo (pag.68)
- 3.4. Localización de pozos utilizados en el área de estudio (pag.69)
 - 3.4.1. Registros geofísicos de pozo para el pozo BY18D (pag.70)
 - 3.4.2. Criterio de Raleigh (pag.71)
 - 3.4.3. Resultado de la aplicación de la transformada ondicular al pozo BY18D (pag.72)
 - 3.4.4. Registros resultantes de la aplicación de transformada ondicular a BY18D (pag.73)
- 3.5. Registros geofísicos de pozo para el pozo BY13 (pag.74)
 - 3.5.1. Escalograma para el pozo BY13 (pag.75)
 - 3.5.2. Registros resultantes de la aplicación de transformada ondicular a BY13 (pag.76)
- 3.6. Registros geofísicos de pozo para el pozo BY15 (pag.77)
 - 3.6.1. Escalograma para el pozo BY15 (pag.78)
 - 3.6.2. Registros resultantes de la aplicación de transformada ondicular a BY15 (pag.79)
- 3.7. Registros geofísicos de pozo para el pozo BY11 (pag.80)
 - 3.7.1. Escalograma para el pozo BY11 (pag.81)
 - 3.7.2. Registros resultantes de la aplicación de transformada ondicular a BY11 (pag.82)
- 3.8. Registros geofísicos de pozo para el pozo CY9 (pag.83)
 - 3.8.1. Escalograma para el pozo CY9 (pag.84)
 - 3.8.2. Registros resultantes de la aplicación de transformada ondicular a CY9 (pag.85)

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- 4.1. Dimensiones de paleocanal utilizando transformada rápida de Fourier (pag.87)
- 4.2. Atributos aplicados en la identificación del paleocanal (pag.89)
- 4.3. Horizonte interpretado y análisis de correlación de pozos (pag.90)
- 4.4. Análisis de descomposición espectral utilizando FFT (pag.91)
- 4.5. Reconstrucción espectral utilizando FFT (pag.91)
- 4.6. Canal con características de echado y frecuencias asociadas (pag.92)
- 5.1. Comparativa de Fourier con Wavelet para sección sísmica (pag.94)
- 5.2. Comparación a 35 Hz para la traza sísmica numero 74 (pag.96)
- 5.3. Aplicación de la transformada ondicular para la descomposición espectral en el pozo BY15 (pag.98)
- 5.4. Aplicación de la transformada ondicular para la descomposición espectral en el pozo BY13 (pag.100)
- 5.5. Aplicación de la transformada rápida de Fourier para la descomposición espectral en el pozo BY13 (pag.101)
- 5.6. Aplicación de la transformada ondicular para la descomposición espectral en el pozo BY18D (pag.103)
- 5.7. Aplicación de la transformada ondicular para la descomposición espectral en el pozo BY11 (pag.105)
- 5.8. Aplicación de la transformada ondicular para la descomposición espectral en el pozo CY9 (pag.107)
- 6.1. Línea sísmica 161, comparación de la transformada ondicular continua y discreta (pag.108)
- 6.2. Diferentes escalas para la transformada ondicular continua y discreta (pag.110)
- 6.3. Comparativa de la descomposición espectral utilizando transformada ondicular con modelo de inversión mediante redes neuronales (pag.111)
- 6.4. Comparativa de resultados de la descomposición espectral utilizando transformada ondicular con modelo de inversión mediante redes neuronales (pag.113)
- 6.5. Análisis de electro-facies (pag.114)

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

6.6. Interpretación final con datos sísmicos, RGP y atributos sísmicos (pag.115)

Índice de Tabla.

Tabla 2.1. Coordenadas del cubo de Boonsville (pag.50)

Tabla 3.3. Flujo de trabajo para procesamiento de registros de Pozo (pag.62)

Tabla 3.3.1. Datos de pozo y sus formaciones geológicas (pag.63)

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Resumen.

En los últimos años uno de los grandes problemas dentro de la industria petrolera ha sido poder obtener la mayor información posible acerca de las características del subsuelo con base en la respuesta de los métodos Geofísicos (sísmica de reflexión y Registros Geofísicos de Pozo); es por ello que la eficiencia en el tratamiento de los datos geofísicos juega un papel importante en la caracterización estática de un área en particular, tomando un peculiar peso en la calidad del modelo geológico que permita indicar cuantitativamente lo que se tiene en el yacimiento petrolero.

El método tradicional para el análisis de señales en el dominio de la frecuencia, usa la transformada de Fourier o la transformada rápida de Fourier (FFT). El problema al usar la FFT es que transforma información local dentro de información global. La solución de usar una *short Fourier transform* soluciona algunos problemas acerca de la preservación de información local. Sin embargo, el tamaño de la ventana utilizada, restringe las frecuencias que pueden ser analizadas y la localización es limitada por la longitud de la ventana. La transformada de ondícula no tiene estas limitaciones y permite el análisis simultáneo de información local y global.

Con base en lo anterior, en este trabajo se ha utilizado la transformada ondicular para el procesamiento de la información de Registros Geofísicos de Pozo, obteniendo con ello frecuencias relacionadas a probables zonas con impregnación de hidrocarburos y a partir de esto, ha sido posible correlacionar dicha información con aquellas respectivas frecuencias obtenidas de la sísmica de reflexión mediante la implementación de la descomposición espectral.

La metodología seguida durante el procesamiento, consistió en la aplicación de la transformada ondicular continua a los registros geofísicos de cinco pozos en el

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

área de Boonsville Texas, con el propósito de identificar que frecuencias eran características de las zonas en las que la evaluación petrofísica indicaba impregnación de hidrocarburos y posterior a esto, llevar a cabo una reconstrucción de los registros utilizando Transformada ondicular discreta para definir de manera clara las zonas con impregnación de hidrocarburos.

Posteriormente se presenta la aplicación de FFT a datos sísmicos para un horizonte interpretado como un posible yacimiento de hidrocarburos, donde se observa la limitación de la transformada de Fourier respecto a la transformada ondicular.

Finalmente después de procesar los registros geofísicos de pozo con la transformada ondicular, se analizó la correlación entre los resultados de los mismos y aquellos obtenidos mediante la implementación de la descomposición espectral aplicando la Transformada Ondicular a los respectivos datos sísmicos de reflexión.

Los resultados del procesamiento de RGP mediante transformada ondicular, mostraron que es posible a partir del procesamiento y análisis de registros de pozo distinguir frecuencias que están relacionadas a presencia de hidrocarburos y correlacionarlas con aquellas frecuencias resultantes de la aplicación del atributo sísmico de descomposición espectral, con lo que la correlación de ambos resultados utilizando transformada ondicular dio información de zonas relacionadas a yacimientos petroleros.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

1. Marco Teórico.

En este capítulo se dan las bases acerca de la técnica de transformada ondicular, atributos sísmicos y redes neuronales, cada uno de los cuales se aplicaron durante el desarrollo de este trabajo, iniciando con una comparación entre el análisis de Fourier y el análisis utilizando transformada ondicular,

De acuerdo con la teoría de Fourier, una señal puede ser expresada como la suma de una serie infinita de senos y cosenos. Esta suma es también referida como una expansión de Fourier. Sin embargo, la gran desventaja de la expansión de Fourier es que únicamente tiene resolución frecuencial y no temporal.

La idea detrás de la representación conjunta tiempo-frecuencia, es dividir la señal de interés en muchas partes para entonces analizar éstas separadamente, tal como lo haría el análisis de STFT (Short Time Fourier Transform). Está claro que analizar una señal con la STFT, daría más información acerca de cuándo y dónde las diferentes componentes de frecuencia se sitúan, pero entonces se presentaría el problema fundamental de saber cómo cortar la señal.

Así, el problema aquí es que dividir la señal correspondería a una convolución entre la señal y una ventana de corte, lo que daría una resolución temporal importante pero una pobre resolución en frecuencia, que sería función del tamaño de la ventana de corte. El principio detrás de esto, está el conocido “Principio de incertidumbre de Heisenberg”, el cual en términos de procesamiento de señales, establece que es imposible saber la frecuencia y tiempo exactos en una señal. En otras palabras, una señal simplemente no puede ser representada como un punto en el espacio tiempo-frecuencia; por lo que, tal como indica este principio, es muy importante el cómo se divida la señal.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Para superar este inconveniente, se desarrolló la transformada de ondícula o análisis ondicular, la cual es probablemente la más reciente solución a las limitantes de Fourier. En el análisis ondicular el uso de una ventana modulada completamente escalada resuelve el problema de la ventana de corte. Así, la ventana es recorrida a lo largo de la señal y para cada posición se obtiene su espectro de frecuencia. Este proceso es repetido varias veces con una ventana ligeramente más corta (o más larga) para cada ciclo nuevo. Al final el resultado será una colección de representaciones tiempo-frecuencia de la señal, todas con diferentes resoluciones (Valens, 1999).

En el caso de ondículas, normalmente, no se habla acerca de representaciones tiempo-frecuencia, si no de representaciones tiempo-escala, debido a que el término frecuencia es reservado para la transformada de Fourier. Además una escala determinada no corresponde a una frecuencia única si no a un rango de frecuencias.

Por último, es importante mencionar que a diferencia del análisis de Fourier la transformada ondicular trabaja con señales no estacionarias por lo que su aplicación a datos reales siempre tendrá ventaja sobre Fourier y otros algoritmos.

1.1. Propiedades de Ondícula.

Las más importantes propiedades de las ondículas son las condiciones de admisibilidad y regularidad, condiciones a cuales deben su nombre. Es posible mostrar que las funciones cuadráticas integrables $\psi(t)$ satisfacen la condición de admisibilidad,

$$\int \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \dots (1)$$

Esta relación puede ser usada, primero para analizar y después para reconstruir (sintetizar) una señal sin pérdida de información.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

En la ecuación (1), $\psi(\omega)$ representa la transformada de Fourier de $\psi(t)$. La condición de admisibilidad implica que la transformada de Fourier de $\psi(t)$ desaparece en la frecuencia cero, es decir,

$$|\psi(\omega)|^2|_{\omega=0} = 0 \dots (2).$$

Esto significa que el espectro de las ondículas corresponde a un pasa-bandas. Un cero en la frecuencia cero también significa que el valor promedio de la ondícula en el dominio del tiempo debe ser cero,

$$\int \psi(t)dt = 0 \dots (3)$$

es decir debe ser oscilatoria. En otras palabras, $\psi(t)$ debe ser una onda. La Figura 1.1 muestra algunos tipos de ondículas.

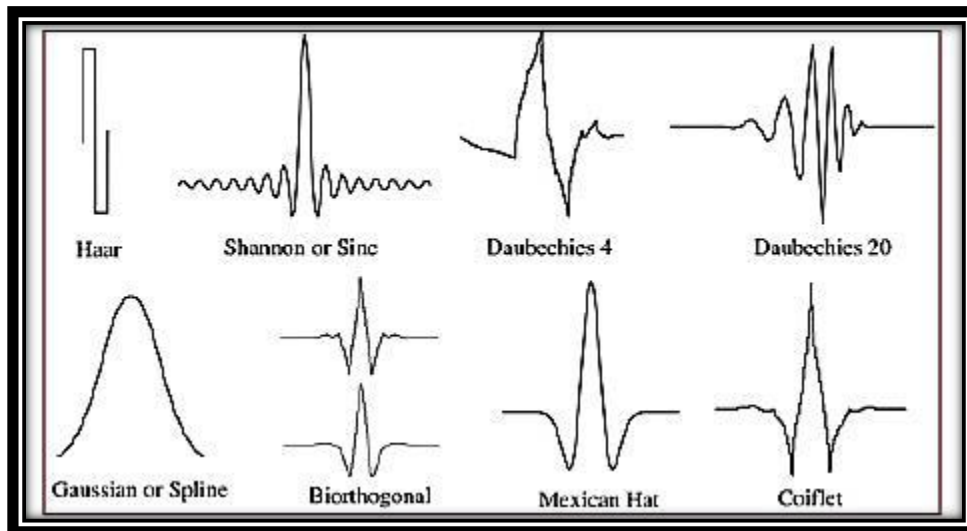


Figura 1.1 Diferentes tipos de ondículas utilizadas. Daubechies, (1992).

Por su parte, la condición de regularidad establece que la función ondicular debe tener algún suavizado y concentración en los dominios tiempo y frecuencia. Regularidad es un concepto bastante complejo que se intentará explicar utilizando el concepto de momentos de desvanecimiento (*vanishing moments*).

Si la transformada ondicular es expandida en series de Taylor en $t=0$ hasta n se tiene:

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

$$\gamma(s, 0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \left[\sum_{p=0}^n f^{(p)}(0) \int \frac{t^p}{p!} \psi\left(\frac{t}{s}\right) dt + O(n+1) \right] \dots (4)$$

Aquí $f^{(p)}$ representa la $f^{(thé-sima)}$ derivada de f y $O(n+1)$ significa el resto de la expansión. Ahora si se definen los momentos de desvanecimiento o desaparición de la ondícula por M_p ,

$$M_p = \int t^p \psi(t) dt \dots (5)$$

Entonces (4) se puede reescribir como un desarrollo finito,

$$\gamma(s, 0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \left[f(0)M_0s + \frac{f^{(1)}(0)}{1!} M_1s^2 + \frac{f^{(2)}(0)}{2!} M_2s^3 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!} M_n s^{n+1} + O(s^{n+2}) \right] \dots (6)$$

De la condición de admisibilidad se tiene que el 0^{th} momento $M_0=0$ así que el primer término en el lado derecho de (6) es cero. Si también se hacen cero los otros momentos por arriba de M_n , entonces los coeficientes de la transformada ondicular $\gamma(s, \tau)$ decaerán tan rápido como s^{n+2} para una señal suavizada $f(t)$.

Esto se conoce como momentos de desaparición u orden de aproximación. Si una ondícula tiene n momentos de desaparición, entonces el orden de aproximación de la transformada ondicular es también N , (Valens, 1999).

Resumiendo lo anterior, la condición de admisibilidad da la onda, la regularidad y los momentos de desaparición dan su rapidez de decaimiento.

Lo que se ha visto hasta ahora, permite inferir que las ondículas son funciones que satisfacen los requerimientos antes mencionados, más otros requerimientos de orden técnico que se necesitan para asegurar mayoritariamente un cálculo rápido y fácil de la transformada ondicular directa y de la transformada ondicular inversa. Para este fin existen varios tipos de ondículas; se puede así, escoger entre ondículas suavizadas, compactamente soportadas, ondículas con simples

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

expresiones matemáticas, con simples filtros asociados, etcétera. La elección de alguna de ellas dependerá del campo de estudio y de aplicación.

Debido a que el análisis ondicular no sólo está basado en el uso de formas trascendentes, como en el análisis de la STFT, sino también se enfoca a incrementar la resolución temporal haciendo el ancho de banda proporcional a la frecuencia, presenta una clara ventaja, pues es posible proyectar una señal $x(t)$ dentro de versiones escaladas de la ondícula analizante, lo cual evade problemas tales como:

- a) Pobre resolución de la estructura de frecuencia para longitud de onda más larga que el ancho de banda (es decir para bajas frecuencias).
- b) Pobre localización de altas frecuencias debido a que la energía es promediada encima del ancho de banda.
- c) La resolución en tiempo y frecuencia del análisis están ligados por la desigualdad de Heisenberg, y no cambia en el plano tiempo-frecuencia.

1.2. Transformada ondicular continua.

El análisis ondicular antes descrito es conocido como transformada ondicular continua o CWT. Más formalmente se puede escribir:

$$\gamma(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \dots (7)$$

Donde * denota conjugación compleja. Esta ecuación muestra como una función $f(t)$ es descompuesta en un conjunto de funciones base $\psi_{s,\tau}(t)$, que constituyen las ondículas. Las variables s y τ son las nuevas dimensiones, escala y translación.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Tales ondículas son generadas a partir de una sólo ondícula base $\psi(t)$, llamada ondícula madre, mediante su escalamiento y traslación:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \dots (8)$$

Aquí el término $s^{-1/2}$ es incluido para normalizar la energía a través de las diferentes escalas. Se puede observar de la ecuación (8), que los parámetros s y τ en la ecuación (7) pueden ser interpretados como la escala y la traslación respectivamente. La ondícula madre corresponde a la escala $s=1$. El incremento de s es equivalente a alargar la ondícula madre o mover su contenido de frecuencia hacia valores bajos. Por el contrario, el decremento de s causa la compresión de la ondícula madre o mueve su contenido de frecuencia hacia valores altos. Variando τ para la escala fijada, corresponde a deslizar una ondícula con un ancho de banda fijo y con alguna frecuencia central a lo largo de la señal analizada. Para cierta posición τ de la ondícula analizante, es calculado el valor de la transformada ondicular, (Grossmann, 1989).

Para hacer útil el procedimiento antes descrito, se debe establecer la relación entre escala s y el contenido de frecuencia para una ondícula analizante en particular. Esto se hace definiendo dos frecuencias características de la ondícula madre: la frecuencia central

$$\omega_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \omega |\psi(\omega)|^2 d\omega \dots (9)$$

Y el ancho de la banda $B_o = \sigma_{\omega}$, centrada alrededor de ω_o , con

$$\sigma_{\omega}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} (\omega - \omega_o)^2 |\psi(\omega)|^2 d\omega \dots (10)$$

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Así para una ondícula de escala s , la frecuencia central y el ancho de banda son respectivamente definidas por las siguientes ecuaciones:

$$\omega_s = \frac{\omega_o}{s}, \quad B_s = \frac{B_o}{s} = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{s} \dots (11)$$

Con $\omega_{max} = \omega_o + B_o/2$, $\omega_{min} = \omega_o - B_o/2$. Nótese que por esta convención $B_o = B_1$ and $\omega_o = \omega_1$.

Es muy importante notar que la frecuencia central y el ancho de banda tienen diferentes valores para cada ondícula. En otras palabras, es importante elegir la ondícula madre con alta resolución en frecuencia o con ancho de banda estrecho. Así, el decremento de la escala s mejorará la resolución en frecuencia a frecuencias más altas.

1.2.1. Ondícula de Morlet.

Una de las ondículas utilizadas en el análisis continuo es la llamada ondícula de Morlet, debido a su gran utilidad para el estudio de varias señales sin requerir precauciones específicas (Goupillaud et al., 1984) y por su buena concentración simultánea en tiempo y frecuencia (Figura 1.2).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

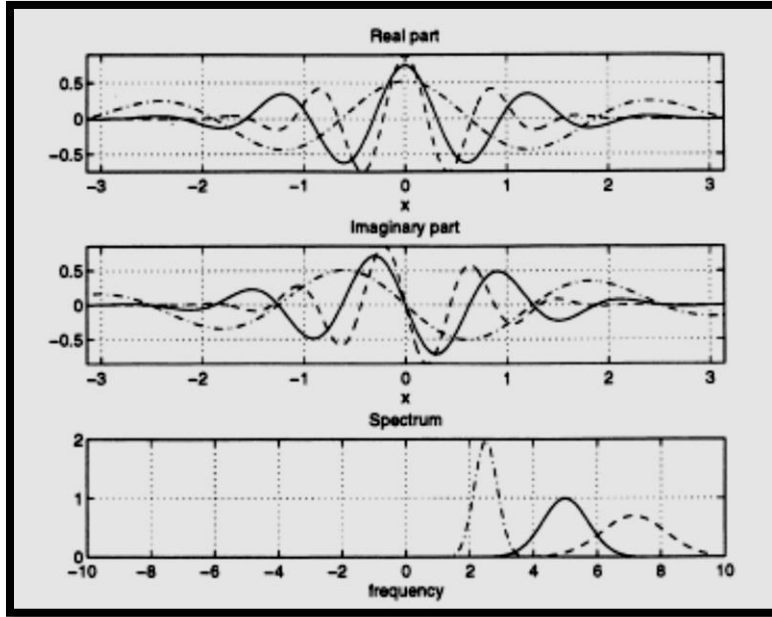


Figura 1.2. La parte real e imaginaria de la ondícula de Morlet y su espectro de Fourier para diferentes escalas: $\lambda < 1$ (líneas punteadas), $\lambda = 1$ (líneas solidas), y $\lambda > 1$ (líneas punteadas gruesas). Kumar (1997).

La ondícula definida por Morlet es una ondícula compleja la cual puede ser descompuesta en dos partes (parte real e imaginaria).

Es una función gaussiana compleja modulada, definida por:

$$\psi(t) = \exp(ict) \left(\exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) - \sqrt{2} \exp\left(\frac{-c^2}{4}\right) \exp(-t^2) \right) \quad (12)$$

Esta ondícula no satisface la condición de admisibilidad (media cero) (Mallat 1989), y no tiene componentes de Fourier de frecuencia negativa. Otras características son, una respuesta de fase lineal y simetría.

1.3. Transformada ondicular discreta.

Las ondículas discretas no son continuamente escalables ni trasladables, sino que solo pueden ser escaladas y trasladadas en pasos discretos. Para poder aplicar la transformada ondicular a señales muestreadas se necesita discretizar los parámetros escala y traslación. La transformada ondicular implementada sobre valores discretos de escala y localidad es llamada transformada ondicular discreta (Figura 1.3). Se pueden obtener representaciones redundantes o no-redundantes usando una elección apropiada de ondículas y esquemas de discretización.

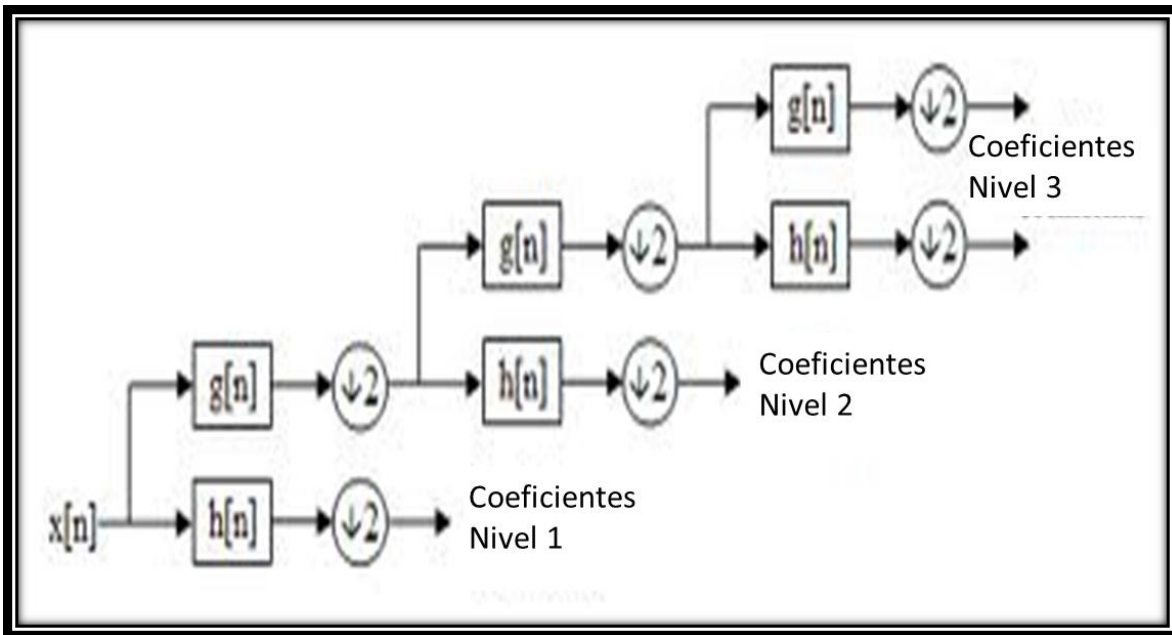


Figura 1.3. Transformada Ondicular Discreta. Muestra la descomposición utilizando función de escala y función ondicular para obtener coeficientes de detalle y de aproximación a las diferentes escalas. Daubiechies (1992).

En la discretización de parámetros de escala y posición (s, τ) se debe escoger $s = s_0^m$, donde m es un entero y s_0 es un paso de dilatación mayor que 1 y fijo. La idea esencial de esta discretización puede ser entendida con la analogía con un microscopio, donde se elige una magnificación (es decir, $s = s_0^{-m}$) y se estudia el

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

proceso en una localidad particular para después moverse a otra, (Teti et al, 1992). Si la magnificación es grande (es decir, pequeñas escalas), se mueve en pequeños pasos y viceversa. Esto es por medio de la elección de un paso incremental inversamente proporcional a la magnificación (es decir, proporcional a la escala s_0^m). Con base en el ejemplo anterior es posible definir

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^m}} \psi\left(\frac{t - n\tau_0 s_0^m}{s_0^m}\right) = s_0^{-m/2} \psi(s_0^{-m}t - n\tau_0) \dots (13)$$

La transformada de ondícula obtenida usando $\psi_{m,n}(t)$ dada como,

$$Wf(m, n) = s_0^{-m/2} \int f(t) \psi(s_0^{-m}t - n\tau_0) dt \dots (14)$$

Es llamada la transformada ondicular discreta.

Usando la ondícula discreta $\psi_{m,n}$ y la elección apropiada de s_0 y τ_0 se puede caracterizar la señal $f(t)$. En efecto, se puede escribir $f(t)$ como la expansión en serie, bajo ciertas condiciones rigurosas, en términos de la ondícula madre y de los incrementos de discretización s_0 y τ_0 . Estas ondículas discretas, las cuales mejoran la completa representación de la función $f(t)$ son llamadas *wavelets frames* (marcos ondiculares). La condición suficiente y necesaria para esto es que los coeficientes ondiculares $Wf(m, n)$ satisfagan

$$A||f||^2 \leq \sum_m \sum_n |Wf(m, n)|^2 \leq B||f||^2 \dots (15)$$

Aquí $||f||^2$ denota la energía de la función $f(t)$, $A > 0$ y $B < \infty$ son constantes características de la ondícula y la elección de s_0 y τ_0 pueden ser determinados numéricamente (Daubechies, 1992). Dada esta condición, se puede obtener una expansión en serie como

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_m \sum_n Wf(m,n)\psi_{m,n} + \gamma \quad \dots (16)$$

Si $A \approx B$. El termino error γ es del orden de $\varepsilon/(2+\varepsilon)||f||$, donde $\varepsilon=(B/A) - 1 << 1$.

En general, un marco no es una base orto-normal (sólo la condición $A=B=1$ da una base orto normal), sino que proporciona una representación redundante de la función $f(t)$. Esto es análogo, por ejemplo, a representar un vector en el plano Euclidiano usando más de dos vectores base. La relación A/B es llamada la relación de redundancia o factor de redundancia. Cuando un marco es redundante, los coeficientes ondiculares de un sector están relacionados entre sí, resultando en una resolución mejorada de la característica fuerte de la señal siendo transformada. Así, por ejemplo, para detectar un cambio fuerte en una señal, una representación redundante es utilizada. Sin embargo, el sub-muestreo también incrementa la complejidad computacional, resultando en algoritmos de transformada directa e inversa más lentos. Donoho et al. (1993).

Las ondículas que mejoran un marco pueden ser construidas para cierta elección de s_0 y τ_0 . Las condiciones para la elección de s_0 y τ_0 son descritas por Daubichies (1992). Por ejemplo, para la ondícula sombrero-mexicano (*Mexican hat*), para $s_0=2$ y $\tau_0=1$, donde sus límites de marco son $A= 3.223$ y $B= 3.596$, dando $B/A= 1.116$; se puede obtener B/A más cercano a 1 eligiendo $s_0 < 2$. Grossmann et al. (1989) sugirieron descomponer cada octava dentro de varias voces (como en música) eligiendo $s_0= 2^{1/M}$, donde M indica el número de voces por octava. Con esta descomposición se tiene:

$$\psi_{m,n}^M(t) = 2^{-\frac{m}{2M}} \psi\left(2^{-\frac{m}{M}}t - n\tau_0\right) \dots (17)$$

Así, para la ondícula “sombrero mexicano”, eligiendo $M= 4$ y $\tau_0= 1$ es posible obtener $A=13.586$ y $B=13.690$, dando $B/A= 1.007$. En tal descomposición, usando

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

un marco multi-voz, permite cubrir el rango de escalas en pasos más pequeños, dando una “pintura” más continua. Por ejemplo, con $M=4$ se logran escalas discretas en $[s = 1, 2^{1/4}, 2^{1/2}, 2^{3/4}, 2, 2^{5/4}, 2^{3/2}, 2^{7/4}, 4, \dots]$ contra $[s = \dots, 1, 2, 4, 8, \dots]$ para la banda de descomposición de octava usual, $M=1$.

Por último, las representaciones redundantes son más robustas al ruido comparado con representaciones ortogonales y así usadas cuando la reducción de ruido es un problema. Teti y Kritikos (1992) usaron sólo coeficientes dominantes del conjunto completo $\{ Wf(m,n) \}$, de la ondícula de Morlet para obtener una reconstrucción estable de alta calidad de las características de radar de apertura sintética (SAR) en imágenes de océano (secciones transversales de azimut en una dimensión). Con la reconstrucción limitada para coeficientes dominantes, automáticamente el filtrado toma lugar con la ventaja que reduce información de altas frecuencias pero preservando las características de la imagen. Así, el filtrado es cuidadoso en remover manchas al mismo tiempo que preserva las características importantes.

1.4. Análisis multi-resolución

El análisis multi-resolución está relacionado con el estudio de señales o procesos representados a diferentes resoluciones y para el cual se ha desarrollado un eficiente mecanismo en el paso de una resolución a otra. Para entender esto, es necesario imaginar que una persona está observando una secuencia de funciones continuas tal que la primera función describe sólo amplias características de un proceso (resolución baja), cada función subsecuente añade progresivamente mayor detalle (alta resolución) tal que más pequeñas y más pequeñas escalas, implicaran el apareamiento de características conforme la resolución crezca. En el nivel de resolución baja, todas las características mayores a una escala particular son representadas.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

En este sentido, la transformada ondicular nos muestra que a partir de convolucionar una ondícula madre con una señal, así como con sus subsecuentes ondículas hijas (versiones escaladas de la ondícula madre), es posible obtener un subconjunto de señales que representan a la señal original en sus diferentes escalas (Figura 1.4). Lo anterior permite analizar la señal original en diferentes resoluciones, observando características de cada una y eligiendo aquellas que representen mejor las zonas de interés para con ello proceder a una reconstrucción de la señal a partir de dichas escalas sin tomar en cuenta aquellas que no muestren características importantes para el objetivo en cuestión.

Por su parte, la transformada ondicular discreta permite convolucionar la señal con la ondícula para obtener los llamados coeficientes de aproximación y posterior a esto realizar la convolución de la señal con una versión de reflejo de la ondícula para obtener los coeficientes de detalle. Los coeficientes de detalle serán de gran importancia, ya que por medio de su análisis se podrá eliminar la parte de la señal relacionada a ruido, pero aún más importante es que será posible discriminar frecuencias altas relacionadas a características de interés del ruido contenido en la señal.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

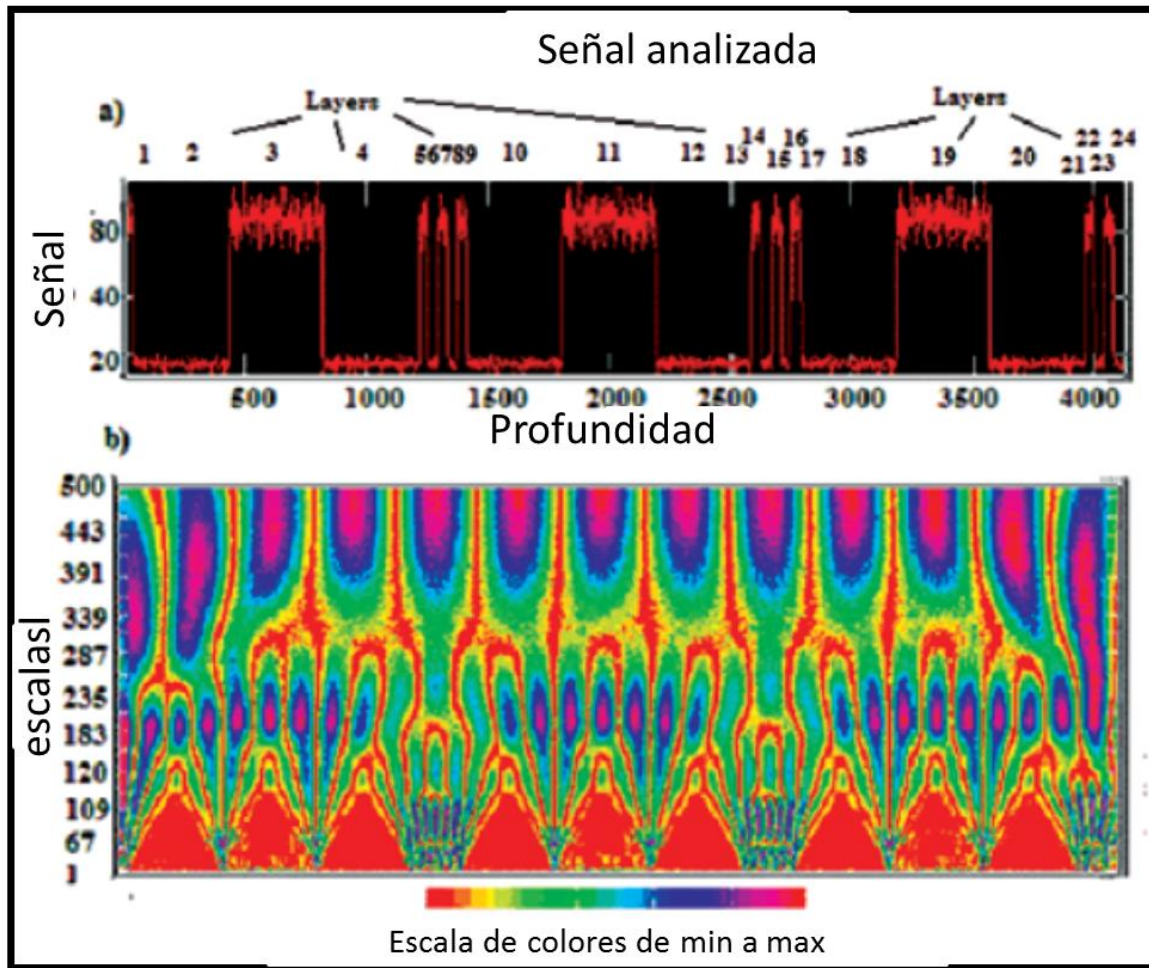


Figura 1.4. CWT basada en el análisis multiescala de un registro de pozo, a) registro sintético de neutrón pulsado para un modelo constituido de 24 capas (delgadas y gruesas), b) análisis multiresolución usando la CWT. Tomada de Coconi et al. (2010).

Por otro lado, el número de escalas que se pueden utilizar depende de la longitud de la señal, ya que la naturaleza del cálculo de la transformada ondicular discreta es diádica, la descomposición se tomará en 2^n valores. Así, si se tiene una señal con 1,048,576 muestras, se utilizarían 20 escalas ya que $2^{20}=1,048,576$.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

1.5. Atributos Sísmicos

Este punto trata los fundamentos de los atributos sísmicos ya que es importante conocer su aplicación en la sísmica de reflexión y así comprender con mayor claridad la importancia de aplicar transformada ondicular como atributo sísmico a los datos y resaltar las características de interés en la misma.

Una definición acertada de atributos sísmicos dicta que comprenden “toda información obtenida de los datos sísmicos, ya sea por mediciones directas o lógicas e inclusive por experiencia basada en el razonamiento” (Taner, 2001). Todos los atributos tales como amplitud, echado, frecuencia, fase, polaridad, etcétera, pueden ser medidos en un instante del tiempo o en una ventana de tamaño relativo dependiendo de lo que se quiera resaltar, por otro lado, dicha propiedad puede ser medida sobre una sola traza o un conjunto de las mismas e incluso sobre una superficie interpretada en los datos sísmicos.

Sin embargo, es evidente que el sustento geológico dará la directriz para calibrar un atributo que pueda ser lo suficientemente robusto para expresar la propiedad que represente la clave para conceptualizar el atributo mismo, ya que sin esta parte no tendrá veracidad la aplicación. Por esto, el incremento de confiabilidad de un atributo, requiere que se pueda ganar la mayor información posible de los datos sísmicos de reflexión, lo cual da una poderosa herramienta como facilitadora del trabajo del intérprete.

Entre las aplicaciones generales de los atributos podemos mencionar las siguientes:

- Identificación de propiedades sísmicas.
- Caracterización de facies sísmicas para predecir ambientes de depósito.
- Evaluación del yacimiento petrolero.
- Identificación de prospectos y análisis de riesgo.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- Caracterización de yacimientos.

1.5.1. Una breve historia

Desde la introducción de los atributos de traza compleja (Taner 1979), literalmente cientos de atributos sísmicos han emergido de una variedad de métodos computacionales. Los atributos que pueden medir sólo una cualidad se denominan “primitivos”; estos atributos pueden ser combinados a partir de alguna estadística, red neuronal o manipulación matemática para formar atributos “híbridos” (Taner, 2001). El ímpetu detrás del cálculo de varios atributos es el deseo para usarlos como variables predictivas en proyectos de caracterización de yacimientos. Los estudios más comunes utilizan cualitativamente atributos, tales como interpretaciones de sísmica estratigráfica en terminaciones y geometrías, o para revelar patrones relacionados a ambientes de depósito, fallas y fracturas. Sin embargo, la tendencia es hacia el uso cuantitativo de atributos simples o combinados para predecir litología, facies, porosidad o tipos de fluido (Chambers y Yarus, 2002).

Si se quisiera categorizar o clasificar los atributos sísmicos, sería posible dividirlos de acuerdo a su forma de operar, a la utilidad que tengan, a su fundamento matemático, etcétera; pero quizás la clasificación más simple sea la realizada por Taner et al. (1994), el cual divide los atributos en dos categorías generales: geométrica y física.

Los objetivos de los atributos geométricos es mejorar la visibilidad de las características de los datos sísmicos; entre ellos podemos mencionar: echado, azimut varianza, semejanza, mínima curvatura y continuidad, por mencionar sólo algunos.

Por su parte, los atributos físicos tienen relación con los parámetros físicos de la superficie y litología. Estos incluyen principalmente amplitud, fase y frecuencia.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Un flujo de trabajo que puede ser de gran utilidad, puntualizando que no existe una sola metodología para la aplicación y el análisis de atributos, sería el siguiente, el cual es sugerido por el que escribe:

- **Calibración.** Los datos de pozo proveen alta resolución relacionada a información local. Además los datos sísmicos 3-D muchas veces proveen densidad espacial, pero baja resolución vertical en cuanto a información relacionada a tiempo. Por ello la calibración a partir de Registros Geofísicos de Pozo será el primer y más crítico paso en el proceso.
- **Elección del(os) atributo(s).** Elegir el atributo que opere mejor en la descripción de la propiedad del yacimiento de interés es de gran importancia ya que debe de ajustarse de manera lógica y bajo lineamientos previos a su aplicación.
- **Predicción.** La distribución espacial de la variable de mayor interés es mapeada integrando datos de pozo y el atributo sísmico mediante un análisis geoestadístico.
- **Buscar en los datos sísmicos rasgos** que a simple vista sean representativos tales como, una amplitud local (bright spot, dim spot) o una anomalía que se muestre desde el punto de vista geológico como lo es una falla, una discontinuidad, etcétera.
- **Posterior a la identificación de rasgos,** proceder al análisis del mejor atributo que represente y maximice lo que se quiere resaltar.
- **Validación.** Se debe validar con datos de pozo y secciones de la información arrojada por el atributo.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- Aplicar el atributo con los parámetros que mejor ajusten a los datos sísmicos previamente analizados.

En esencia, el punto es mostrar en planta o en sección patrones geológicos o de geomorfología tales como, canales fluviales o de mar profundo, flujos de gravedad, arrecifes de carbonatos, fallas, discordancias, márgenes de plataforma, terminaciones de estratos, etcétera, los cuales sean aún más evidentes para el intérprete durante su interpretación.

Por otro lado, los atributos estarán directamente relacionados a la resolución sísmica, siendo estos más evidentes conforme la resolución sea mayor. Entonces, si la sísmica es de una resolución pobre no será posible obtener una buena respuesta en la aplicación de atributos.

En consecuencia, si las condiciones de la información sísmica son óptimas, la aplicación de los atributos permitirá delinear:

- Canales o arenas deltaicas
- Canales complejos, adelgazamiento de capas, altas amplitudes en crestas, etcétera.
- Acumulación de gas y fluidos.
- Transporte de masas complejas.
- Ciertos tipos de arrecifes.
- Deformación compleja y su asociación de fallas.
- Discontinuidad y comportamiento preferencial de fallas.

Pero lo más importante al final es el conocimiento de las bases bajo las cuales trabajan los atributos y es aquí en donde se pueden definir cada una de ellas:

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Atributos de discontinuidad:

Varianza. Usa la varianza estadística (diferencias cuadradas) de amplitudes sísmicas adyacentes.

Coherencia. Es el producto punto de la correlación cruzada de paquetes de onda adyacentes.

Semblanza. Calcula la suma cuadrática de vectores a lo largo de la traza, donde la suma de la máxima dirección tiene la mayor semblanza.

Semejanza. Analiza un patrón estándar a lo largo de un conjunto de trazas en un punto central para la amplitud sísmica más similar, dando continuidad del mismo con base en su respuesta sísmica.

Las aplicaciones de estos atributos son:

- Delineación de fallas.
- Asistir en el picado manual de fallas.
- Delineación del conjunto direccional de fallas.
- Geomorfología sísmica (terminación de abanicos turbidíticos).
- Interpretación automática de horizontes sísmicos en rebanadas de tiempo.

Otro de los puntos fundamentales es que al utilizar un sólo atributo, se corre el riesgo de minimizar la identificación de los rasgos sísmicos, ya que se puede hacer una interpretación incorrecta causada por una mala interpretación debido a mal manejo del dato y traerá como consecuencia un aumento en la incertidumbre. Entonces, al aplicar varios atributos permitirá reducir el grado de incertidumbre en el picado de anomalías sobre los datos sísmicos.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

A continuación se dan dos panoramas en los cuales es posible visualizar el manejo óptimo de atributo sísmico y posterior a esto, se desarrolla una aplicación con datos reales.

Caso 1.

Como es conocido las fallas son elementos estructurales que verticalmente son capaces de permitir la migración de hidrocarburo, sin embargo, también sirven como sello lateral. Evidentemente en un ambiente en el que se tengan cuerpos de arena (fluviales, turbidíticos, etcétera) y que se cumpla con el sistema petrolero, dichas arenas estarán acuñadas en las fallas ya sea que se encontrasen ahí antes de la presencia de fallas o que se depositen posterior al mismo. Una vez que el hidrocarburo ha migrado a través de las fallas desde una roca generadora, es almacenado en la roca (almacén) cuyas condiciones de porosidad y permeabilidad conjuntamente con la presencia de fluido, darán una respuesta en amplitud que contraste con la litología que las delimita; así, si aplicamos un atributo de máxima amplitud negativa o incluso de RMS, nos resaltará esta arena impregnada, debido a que el hidrocarburo cambia la amplitud del medio. Cabe mencionar que dicha respuesta también pudiese reaccionar al contenido de otro fluido, por ejemplo la presencia de agua. De lo anterior, si aplicásemos un atributo de frecuencia, podemos ver que en dichas arenas la frecuencia será menor provocando un cambio local y relacionando esto a la característica del atributo de amplitud alta, podemos pensar en una anomalía con probable contenido de hidrocarburo.

Caso 2.

Si se requiere ver la continuidad en la respuesta sísmica un coseno de la fase es un buen indicador de esto, si esto se complementa con algún otro atributo de discontinuidad como los mencionados arriba podremos dar mejor seguimiento en la interpretación asistida de fallas que posteriormente ayudaran en el análisis y entendimiento del modelo estructural y la tectónica y esfuerzos que intervinieron para la deformación de los estratos.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

De lo anterior si se retoman los dos casos, es posible delinear zonas con probable potencial de hidrocarburos, sin olvidar que se deberá reforzar lo anterior con datos, en particular registros de pozo y núcleos, así como análisis petrofísicos de los mismos.

Chambers y Yarus (2002) plantean la pregunta: atributos sísmicos, ¿predictores de propiedades o falsos profetas? Esto debido a que es posible manipular la respuesta de los atributos para visualizar características que el ojo pretenda ver. Sin embargo, tal como lo dictan los autores es importante tener en cuenta cuando se utilicen atributos, las bases físicas para la correlación con propiedades medidas en pozo.

Por ejemplo, una correlación negativa alta entre porosidad e impedancia acústica tiene una base física, ya que la velocidad tiene una relación inversa a la porosidad, en tanto que la velocidad sea incrementada, la porosidad decrecerá.

1.6. Redes Neuronales

McCulloch y Pitts (1943) propusieron una unidad umbral binaria como un modelo computacional para una neurona artificial (Figura 1.5).

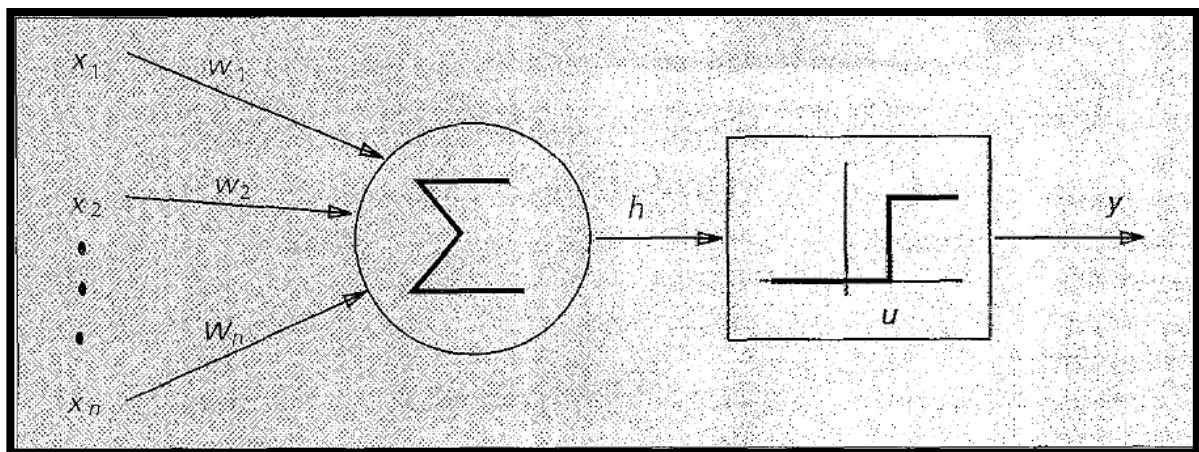


Figura 1.5. Modelo de una neurona. Tomada de McCulloch y Pitts, 1943.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Esta neurona matemática calcula una suma pesada de sus n señales de entrada, x_j , $j=1, 2, \dots, n$, y genera una salida de valor 1 si esta suma está por encima de cierto umbral, o contrariamente una salida de valor 0. Matemáticamente,

$$y = \theta(\sum_{j=1}^n W_j X_j - u) \dots (1)$$

Donde el término dentro del paréntesis es una función de paso unitario en 0, y W_j es el peso sinapsis asociado con la entrada j -ésima. Por simplicidad de notación, en ocasiones se considera el umbral u como otro peso $w_0 = -u$ adjunto a la neurona con una entrada constante $x_0 = 1$. Los pesos positivos corresponden a las sinapsis excitatorias, mientras que en el modelo de pesos negativos funcionan como inhibidores. McCulloch y Pitts (1943) probaron, en principio, que la elección adecuada de pesos dejaba un arreglo sincronizado de tales neuronas al realizar cálculos. Existe una analogía cruda para una neurona biológica; el modelo de interconexiones y cableado, conexión de pesos representa la sinapsis, y la función umbral aproxima la actividad en una soma. Sin embargo, el modelo de McCulloch y Pitts (1943), contiene un número de asunciones simplificadas que no reflejan el verdadero comportamiento de las neuronas biológicas.

La neurona de McCulloch y Pitts (1943) ha sido generalizada en varias direcciones. Un camino obvio es usarla para funciones de activación y para la función del umbral, tal como lineal a tramos, sigmoidea o gaussiano, como se muestra en la figura 1.5.1. La función sigmoidea está lejos de ser la más frecuentemente usada en redes neuronales artificiales.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

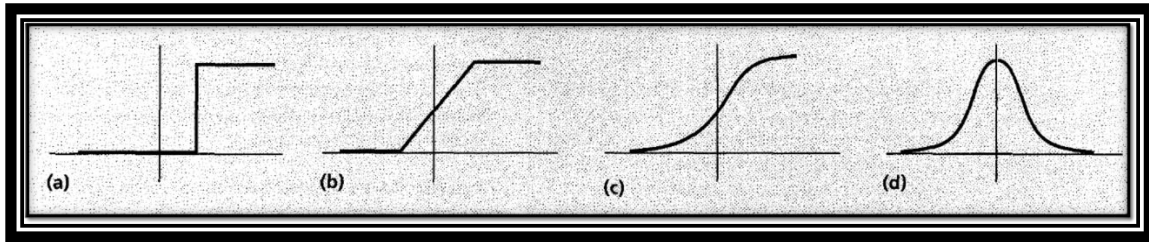


Figura 1.5.1. Diferentes tipos de funciones de activación: a) umbral, b) lineal a tramos, c) sigmoidea y d) Gaussiana. Tomada de McCulloch y Pitt (1943).

1.6.1. Arquitectura de la red.

Las redes neuronales artificiales (ANNs) pueden ser vistas como gráficas ponderadas dirigidas en las cuales las neuronas artificiales son nodos y bordes dirigidos (con pesos) son conexiones entre neuronas de salida y neuronas de entrada.

Basados en los patrones de conexión (arquitectura), las ANNs pueden ser agrupadas en dos categorías (ver Figura 1.5.2):

- Redes de alimentación hacia adelante (*feed-forward*), en cuyas graficas no hay ciclos, y
- Redes de retroalimentación (*feedback*), en las cuales aparecen ciclos debido a la retroalimentación de las conexiones.

En la más común de las redes de alimentación hacia adelante, llamadas perceptrón multicapa, las neuronas son organizadas dentro de capas que tienen conexiones unidireccionales entre ellas.

La figura 1.5.2 también presenta típicas redes para cada categoría.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

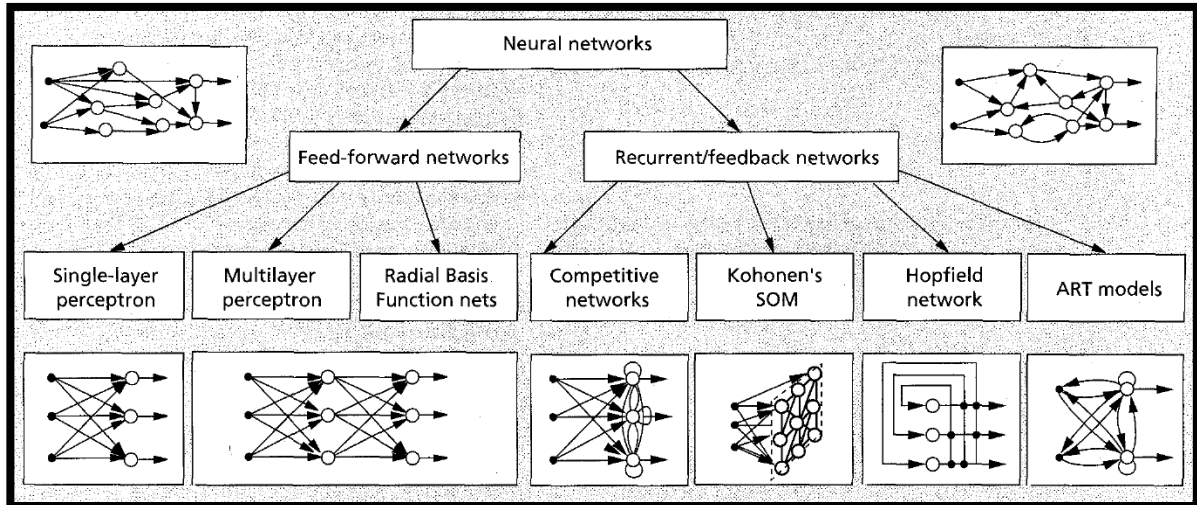


Figura 1.5.2. Una taxonomía de arquitectura de redes feed-forward y recurrente/feedback. Tomada de McCulloch y Pitts 1943.

Diferentes conectividades dan diversos comportamientos de red. Generalmente, las redes *feed-forward* son estáticas, es decir, sólo producen un conjunto de valores de salida más que una secuencia de valores a partir de una entrada dada. Las redes *feed-forward* son menos retenedoras en el sentido que su respuesta a una entrada es independiente del estado de la red previa. Por otra parte, las redes recurrentes o de retroalimentación, son sistemas dinámicos.

Cuando un nuevo patrón de entrada se presenta, las salidas son calculadas. Debido al patrón de retroalimentación, las entradas para cada neurona son modificadas, lo cual permite a la red ingresar un nuevo estado. Diferentes arquitecturas de red requieren apropiados algoritmos de aprendizaje.

1.6.2. Aprendizaje

La habilidad para aprender es fundamental en la inteligencia. Aunque es difícil formular una precisa definición de aprendizaje, un proceso de aprendizaje en el contexto ANN puede ser visto como el problema de actualizar la arquitectura de la red y conectar pesos para que una red pueda ejecutar una tarea específica de

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

manera eficiente. La red usualmente debe aprender la conexión de los pesos de patrones entrenados disponibles, (Alzate et al. 2006)

La ejecución es mejorada a través del tiempo por medio de una actualización iterativa de los pesos en la red. ANN está habilitada para aprender automáticamente de ejemplos. Además de seguir una serie de reglas especificadas por el experto humano. Esta es una de las mayores ventajas de las redes neuronales respecto a los sistemas expertos tradicionales.

Para entender o diseñar un proceso de aprendizaje, primero se debe tener un modelo del ambiente en el cual una red neuronal opera, esto es, se debe conocer que información está disponible para la red. Segundo, se debe entender como los pesos de la red son actualizados, esto es, cuales reglas de aprendizaje gobiernan el proceso de actualización. Un algoritmo de aprendizaje se refiere a un procedimiento en el cual las reglas de aprendizaje son usadas para ajuste de pesos.

Existen tres principales paradigmas de aprendizaje: supervisado, no-supervisado, e híbrido. En el aprendizaje supervisado, o aprendizaje con un “instructor”, la red es dotada con una respuesta correcta (salida) por cada patrón de entrada. Los pesos son determinados para permitir que la red produzca respuestas tan cerca como sea posible a las respuestas correctas conocidas.

El reforzamiento del aprendizaje es una variante de aprendizaje supervisado en el cual la red es dotada con un sólo criterio sobre la exactitud de las salidas de red, no las respuestas correctas por sí mismas. En contraste, el aprendizaje no supervisado, no requiere una respuesta correcta asociada con cada patrón de entrada en el conjunto de datos de entrenamiento. Éste explora la estructura fundamental en los datos, o correlaciones entre los patrones en los datos y organiza patrones dentro de categorías de estas correlaciones.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

El aprendizaje híbrido combina ambos aprendizajes, el supervisado y el no supervisado. Parte de los pesos son usualmente determinados a través del aprendizaje supervisado, mientras los otros son obtenidos a través del aprendizaje no-supervisado.

La teoría de aprendizaje debe enfocar tres fundamentales y prácticos problemas asociados con el aprendizaje de las muestras: capacidad, complejidad de la muestra, y complejidad computacional. La capacidad se refiere a como muchos patrones pueden ser guardados, y qué límites de decisión y funciones pueden formar una red.

La complejidad de la muestra determina el número de patrones de entrenamiento necesarios para entrenar la red, garantizando con esto, una generalización válida. Unos cuantos patrones pueden causar “over-fitting”, sobre-ajuste (en el que la red funcione bien en el conjunto de datos de entrenamiento, pero pobremente sobre patrones de prueba independientes elaborados de la misma distribución que los patrones de entrenamiento).

La complejidad computacional se refiere al tiempo requerido para que un algoritmo de aprendizaje estime una solución del patrón de entrenamiento. Varios algoritmos de aprendizaje existentes tienen alta complejidad computacional.

Diseñar algoritmos eficientes para el aprendizaje de redes neuronales es un tema de búsqueda activa.

Existen cuatro tipos básicos de reglas de aprendizaje: corrección de error, Boltzmann, Hebbian y aprendizaje competitivo.

- Reglas de corrección de error. En el paradigma de aprendizaje supervisado, la red tiene una salida deseada para cada patrón de entrada. Durante el proceso de aprendizaje, la salida actual generada por la red puede no igualar la salida “d”

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

deseada. El principio base de la regla de corrección de error es usar la señal error ($d-y$) para modificar los pesos de conexión y reducir gradualmente este error.

- Aprendizaje Boltzmann. Las máquinas de Boltzmann son redes recurrentes simétricas consistiendo de unidades binarias (+1 para “encendido” y -1 para “apagado”). Por simétrico, se entiende que el peso en la conexión de la unidad i a la unidad j es igual al peso de la unidad j a la unidad i ($w_{ij}=w_{ji}$). Un subconjunto de neuronas, llamado ‘visible’, interactúa con el ambiente; el resto, llamado ‘oculto’ no. Cada neurona es una unidad estocástica que genera una salida (o estado) de acuerdo a la distribución de Boltzmann de mecanismos estadísticos.

La máquina de Boltzmann opera en dos modos: ‘sujeta’, en la cual las neuronas visibles son sujetas a estados específicos determinados por el ambiente; y de ‘libre corrimiento’, en el cual tanto las neuronas visibles como las ocultas se dejan operar libremente.

- Regla Hebbian. La regla de aprendizaje más vieja es el postulado de aprendizaje de Hebb. quien se basó en las siguientes observaciones sobre experimentos neurobiológicos: si las neuronas sobre ambos lados de una sinapsis son activadas sincronizadamente y repetidamente, la longitud de la sinapsis es selectivamente incrementado.

Una propiedad importante de esta regla es que el aprendizaje es hecho localmente, esto es, que el cambio en el peso de la sinapsis sólo depende de las actividades de dos neuronas conectadas. Una sola neurona entrenada usando la regla de Hebbian exhibe una orientación selectiva.

- Reglas de aprendizaje competitivo. A diferencia del aprendizaje de Hebbian (en el cual múltiples unidades de salida pueden ser simultáneamente disparadas), en el aprendizaje competitivo las unidades de salida compiten entre sí para la activación. Como resultado, sólo una unidad de salida es activada en cualquier tiempo dado. Este fenómeno es conocido como el “ganador toma todo”.

El aprendizaje competitivo en ocasiones categoriza los datos de entrada. Patrones similares son agrupados por la red y representados por una unidad

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

simple, este agrupamiento es hecho automáticamente basado en correlación de datos.

La más simple red de aprendizaje competitivo consiste de una sola capa de unidades de salida (una taxonomía). Cada unidad de salida i en la red conecta a todas las unidades de entrada (x_j 's) vía pesos, w_{ij} , $j=1,2,\dots, n$. cada unidad de salida también conecta a todas las otras unidades de salida vía pesos inhibidores pero tiene un propio retro-alimentador con un peso excitatorio. Como resultado de la competencia, solo la unidad i^* con la entrada neta más larga (o la más corta) llegara a ser la ganadora, esto es, $W_{i^*} \cdot X \geq W_i \cdot X, \forall i$, o $\|W_{i^*} - X\| \leq \|W_i - X\|, \forall i$. Cuando todos los vectores de pesos son normalizados, estas dos desigualdades son equivalentes.

Finalmente se puede decir que las reglas de aprendizaje basadas en la corrección de error pueden ser usadas para entrenar redes de alimentación hacia adelante, mientras las reglas de aprendizaje Hebbian han sido usadas para todos los tipos de arquitecturas de red. Sin embargo, cada algoritmo de aprendizaje es diseñado para entrenar una específica arquitectura. Cada algoritmo sólo efectúa bien unas cuantas tareas (Cary, 1992).

Una vez desarrollada la teoría utilizada durante este trabajo, en el siguiente capítulo se dará un panorama acerca de las características del campo a estudiar, con lo que se tendrá una mejor conceptualización de la necesidad de aplicar una técnica como lo es la transformada ondicular.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

2. Descripción de la zona de estudio.

Ya que se ha conceptualizado el tema de transformada ondicular, este capítulo da una descripción de la zona en la que se aplicó la técnica a datos reales de Registros Geofísicos de Pozo y sísmica de reflexión, con el objetivo de comprender la geología presente y poder aplicar transformada ondicular de manera correcta. Primero se da una descripción del marco geológico y posteriormente se puntualizan los criterios de adquisición sísmica, los cuales ayudarán a conocer el campo de aplicación de la transformada ondicular.

2.1. Geología.

El campo Boonsville está localizado en los condados Jack y Wise, en la cuenca Fort Worth, en el Nort-centro de Texas (Figura 2.1). El campo es uno de los más extensos campos de gas natural en Estados Unidos. Actualmente el campo se encuentra produciendo petróleo, pero mayoritariamente gas, el cual proviene de depósitos de arenisca-conglomerática depositados durante la estación Atoka del periodo Pensilvaniano medio. La columna estratigráfica en la Figura 2.1.1 muestra una descripción Post-Mississippiano generalizada de la estratigrafía de la cuenca Fort Worth. La distribución, porosidades y permeabilidades de la arenisca Boonsville y muchos otros yacimientos de areniscas, del Paleozoico superior, en cuencas de intra-continente, han sido caracterizados de manera errónea e impredecible. La explotación y caracterización efectiva de este campo son difíciles debido a que los yacimientos de arenisca son delgados y discontinuos.

Varias formaciones, extendiéndose de Ellenburger (Ordovícico) a la Strawn (Pensilvaniano medio), producen hidrocarburos en el área de Boonsville, pero sólo el sistema del yacimiento “conglomerado bend Atokan” del conjunto de datos disponible es descrito por componentes geológicas (Tanakov, 1997).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

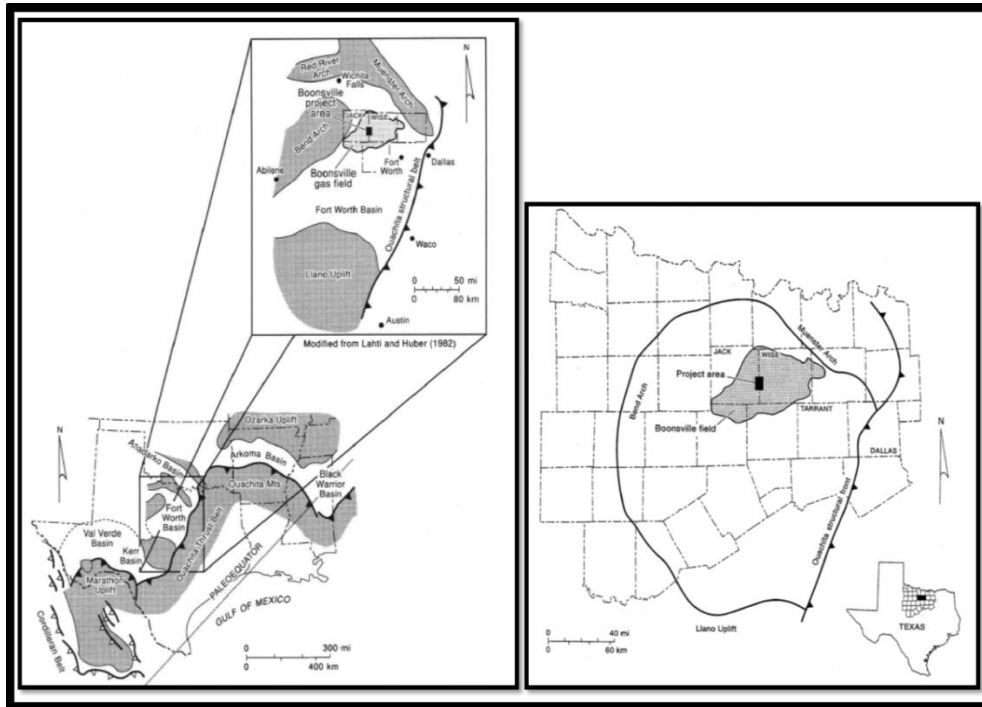


Figura 2.1. Localización del campo Boonsville en los condados de Wise y Jack, Texas. El rectángulo sólido sobre la línea límite Wise-Jack designa el área donde los datos sísmicos 3D fueron adquiridos (Hardage et al., 1995).

| SYSTEM | SERIES | GROUP OR FORMATION | |
|---------------|-------------|-----------------------------------|--------------|
| K | UNDIVIDED | | |
| | WOLFCAMPIAN | | |
| P | | Cisco Group | |
| | UPPER | VIRGILIAN | Canyon Group |
| | | MISSOURIAN | |
| | MIDDLE | DES MOINESIAN | Strawn Group |
| | | ATOKAN | Atoka Group |
| LOWER | MORROWAN | Marble Falls and Canyon Formation | |
| MISSISSIPPIAN | | | |

Gas from Bend Conglomerate

Figura 2.1.1. Columna estratigráfica generalizada post-Misisipiano para la cuenca Fort Worth. Los componentes de los datos geológicos y técnicos base son restringidos al intervalo Bend Conglomerate, el cual en el campo Boonsville es equivalente al grupo Atoka mostrado aquí. Tomado de Thompson (1982).

2.2. Arquitectura del yacimiento.

El “conglomerado Bend” es definido como el intervalo de la base de la caliza *Caddo*, la cual es referida como la máxima superficie de inundación (MSF90) a la cima de la caliza margosa afallada (Hardage et al. 1995). Algunas características de la secuencia *Caddo* son: los hidrocarburos son producidos de yacimientos de arenas delgadas con espesores netos de 0 a 15.24 m de la secuencia, con un espesor bruto de 24 a 45 m; las calizas delgadas tienen espesores conocidos de 0 a 13 m y a la escala sísmica parecen similares; el ambiente de depósito es dominado por un sistema deltaico (Figura 2.2); tanto la arenisca como la caliza son intercalados con secuencias ricas en arcilla y caracterizados por altos valores de velocidades de onda P y densidades, generando así altas impedancias acústicas; siendo la arenisca y caliza también altamente variables lateral y verticalmente.

Más de una superficie de erosión ocurre dentro de la secuencia genética Boonsville-Atokan, lo cual permite definir con mayor precisión las unidades de yacimiento. Muchas de estas superficies de erosión están dispersas, y el truncamiento de estratos más viejos puede ser identificado en secciones de cruce de registros de pozo. Estas superficies pueden ser discontinuidades representando erosión durante periodos de cambio en el nivel del mar. Los mecanismos primarios de entrapamiento son facies y reducción de permeabilidad, y la explotación efectiva de estos campos es difícil debido a los típicos yacimientos de arenisca delgados y discontinuidades que representan una variedad de ambientes de depósito de complejidad intermitente.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

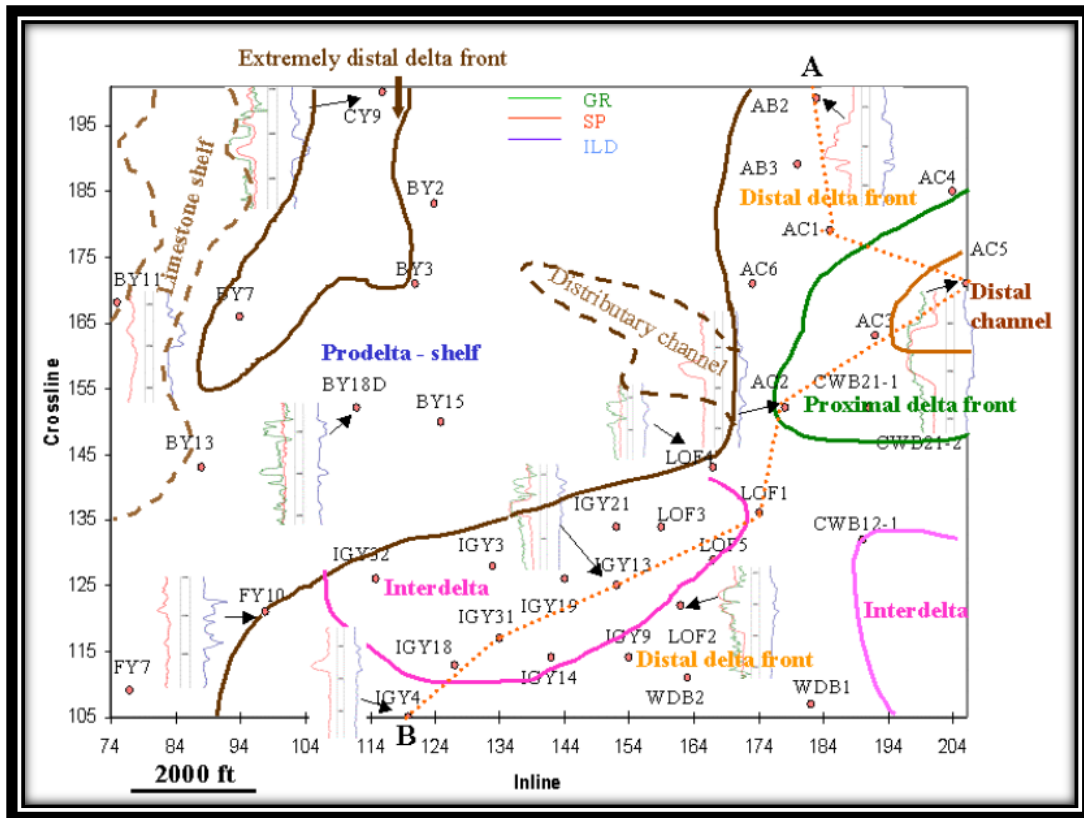


Figura 2.2. Tendencias de registro de pozo representativas y sub-facies de depósito de la secuencia Caddo basada en datos de pozo, con una posible caliza de plataforma y canales distributarios basados en inversión sísmica, (Wayne 2002).

El sistema de depósito del grupo Atoka Pennsilvaniano ha sido estudiado por Thompson (1982). Sin embargo, estos estudios fueron enfocados principalmente a la entera cuenca Forth Worth. Hardage et al (1995) analizaron la distribución del yacimiento y las sub-facies de depósito usando unos cuantos pozos típicos de esta área de estudio, pero su modelo no es lo suficientemente detallado para ser usado en el análisis de facies de la secuencia delgada Caddo. Así, un modelo de depósito no fue establecido sobre la distribución del yacimiento y la discriminación entre areniscas y calizas.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

El principal sistema deltaico fue dividido en cuatro sub-facies deltaicas, canales distales en el margen este, frente deltaico próximo en el este, delta distal extendiéndose al sur y al noroeste e inter-delta en el sur y suroeste.

El segundo sistema deltaico observado en los datos de pozo fue detectado en la esquina noroeste. Sin embargo, el principal cuerpo deltaico permanece fuera del área de estudio (Figura 2.2) y la relación de este sistema deltaico (o subsistema) con el delta principal al este permanece no claro.

El resto de la región es dominado por el pro-delta o plataforma, conteniendo arcillas y calizas. La tendencia de los registros SP es una línea base delgada mientras los patrones del registro GR es un *boxcar*. El *boxcar* indica la caliza del pro-delta. Ningún yacimiento fue encontrado en las sub-facies del pro-delta, y además, se reconocieron areniscas arcillosas no productoras.

El espesor máximo de la caliza reconocido en las sub-facies pro-deltaicas es de 30 ft en los pozos BY11 y BY13. Sin embargo, los datos simulados de impedancia acústica revelan que podría existir una estrecha zona más delgada de caliza orientada norte-sur al oeste (Tanakov, 1997).

2.3. Características del yacimiento.

Dentro del área de estudio, el espesor del “conglomerado Bend” se encuentra entre 1,000 y 1,200 ft (300-360 m). La Figura 2.3 ilustra 13 secuencias genéticas mayores presentes dentro de este intervalo. Estas secuencias genéticas consisten de una sucesión de facies estrato-creciente hacia arriba, caracterizadas por una respuesta en los registros de rayos gama de zonas mayormente arcillosas en la base de la secuencia a zonas más limpias hacia la cima, siendo cada secuencia definida y limitada por lutitas marinas impermeables, marcando la clave de superficies de máxima inundación. Las secuencias del yacimiento de mayor producción descritas por el conjunto de datos son las unidades Caddo y Vineyard, las cuales en su cima y cerca de la

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

base del “conglomerado Bend” han sido completadas en la mayoría de las secuencias. La mayoría de estos intervalos son productores de gas, aunque muchas de estas secuencias son también productoras de aceite en la porción noreste y sureste del área de este proyecto. Las secuencias Caddo son primariamente productoras de aceite.

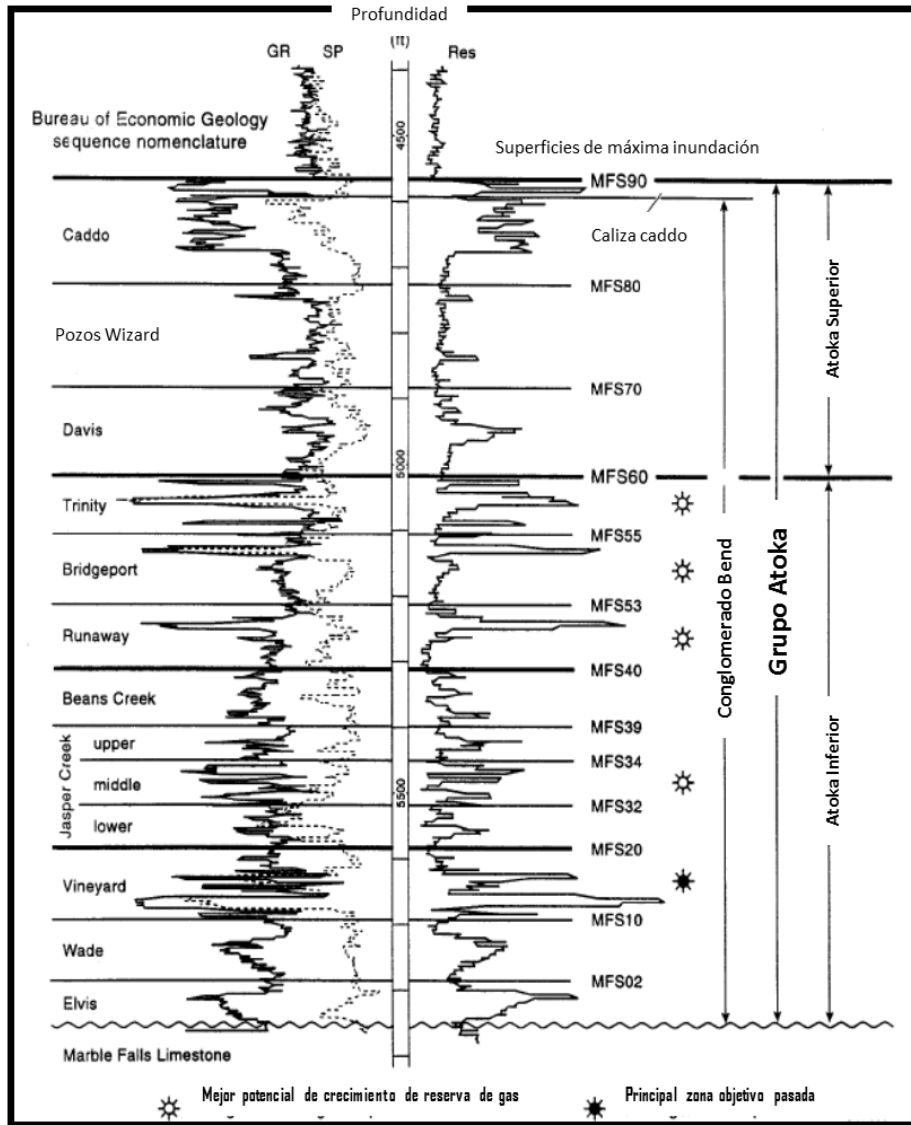


Figura 2.3. Nomenclatura estratigráfica usada para definir secuencias genéticas del conglomerado Bend en el campo Boonsville. El Conglomerado Bend es el intervalo de la base de la caliza Caddo a la cima de la caliza Marble Falls. El termino MFS es una abreviatura para superficie de máxima inundación (Hardage et al. 1995).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

El mapa en la Figura 2.3.1 muestra como existen varios intervalos con contenido de hc's de conglomerado Bend entre estas dos secuencias de yacimiento primario a través del área de estudio. Existe una significativa variación lateral y vertical en el potencial productivo de la porción central del "conglomerado Bend".

El mapa en la Figura 2.3.2 ilustra la cantidad de pies de hidrocarburo total existente entre los niveles Caddo y Vineyard, lo cual indica una variación considerable en las facies de yacimiento.

Típicamente el "conglomerado Bend" es encontrado en el rango de profundidades de 4,500 a 6,000 ft (1350-1800 m). Dependiendo del intervalo y profundidad, el estimado para presiones iniciales varía entre 1,400 y 2,200 psi. La temperatura de yacimiento es cerca de 150° F, y la gravedad típica del gas es de 0.65 a 0.75. Los rangos de espesor de zona productora van de 5 a 30 ft en cada secuencia. El yacimiento es relativamente delgado con valores de permeabilidad variando de menos de 0.1 mD a mayores a 10 mD.

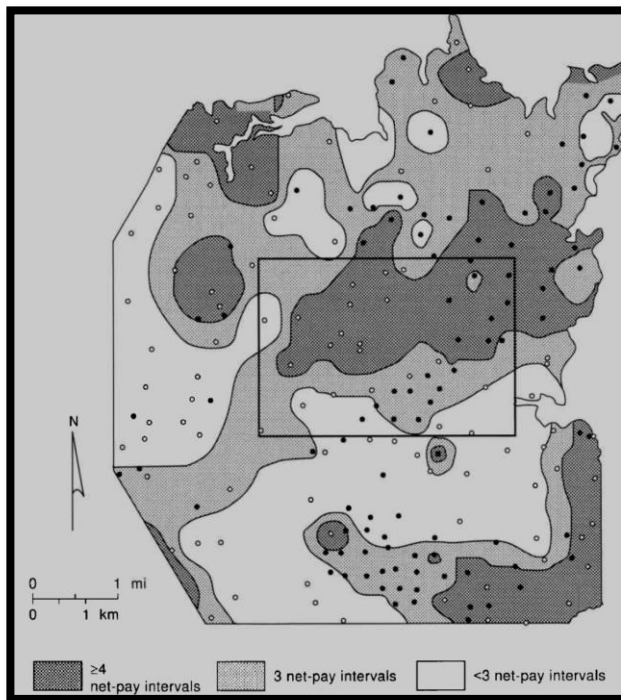


Figura 2.3.1. Intervalos con contenido de hc's ocurriendo entre las secuencias Caddo y Vineyard a través del área de estudio de Boonsville. El área encerrada define los límites del conjunto de datos públicos (Hardage et al 1995).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

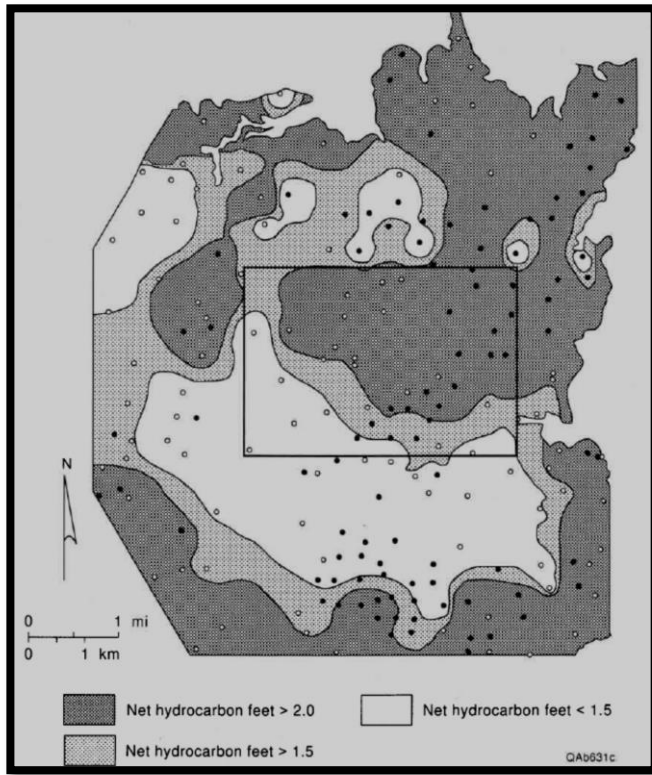


Figura 2.3.2. Distribución del espesor neto de hidrocarburo entre las secuencias Caddo y Vineyard. El área encerrada define los límites de datos públicos (Hardage et al 1995).

2.4. Marco estructural y estratigráfico

Varias zonas de falla de escala pequeña y siguiendo patrones cerca de la vertical en mapas estructurales de tiempo, están presentes en toda la sección del “conglomerado Bend”. La mayoría de estas fallas de ángulo alto, inversas y normales tienen menos de 100 ft (30 m) de desplazamiento y están típicamente sobre el orden de 20 a 30 ft (6 a 9 metros). La inspección de la sísmica interpretada en mapas de estructura Caddo (Figura 2.4) muestra que varias depresiones ocurren a través de la superficie Caddo. Hardage et al., (1995) interpretan estas características como resultado de la disolución y subsecuente episodio de colapso de cavidades cársticas en unidades carbonatadas de plataforma del Paleozoico. La presencia de las estructuras colapsadas influyó la distribución de facies de arenisca en el yacimiento dentro de varias secuencias

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Atokan. Esto es un factor importante que necesita ser considerado cuando se evalué la compartimentalización de yacimientos de “conglomerado Bend”. Karts paleozoicos profundos significativamente influenciaron los procesos de sedimentación más someros y en ocasiones crearon barreras de flujo parciales inter-pozo.

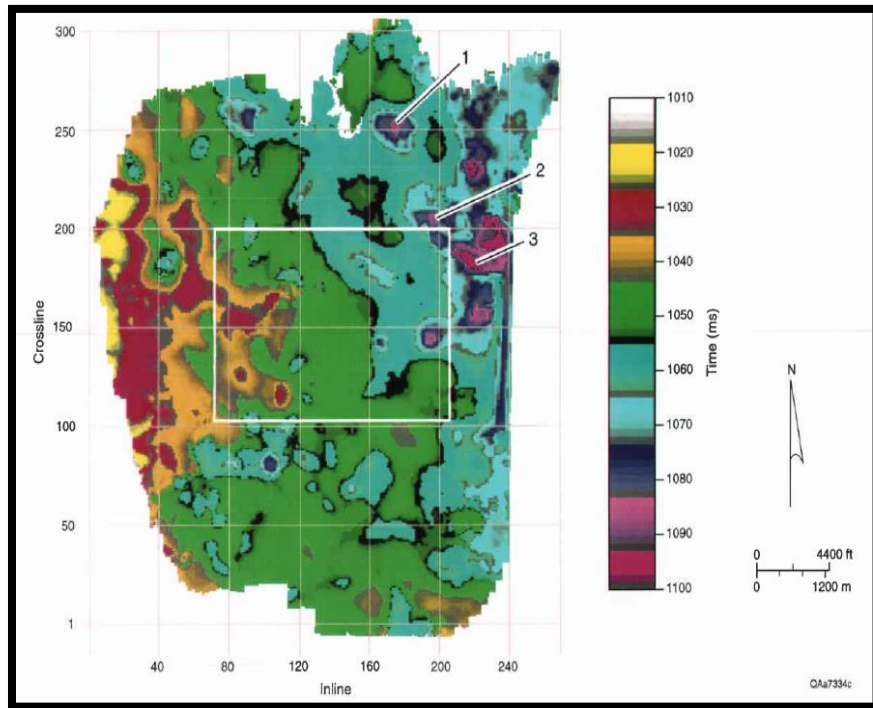


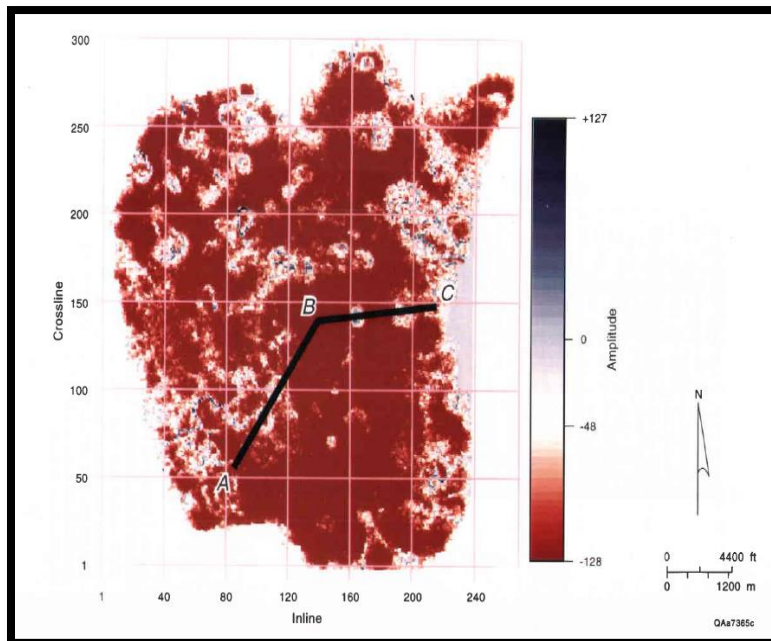
Figura 2.4. Mapa estructural en tiempo de la cima de Vineyard, una importante secuencia cerca de la base del Bend Conglomerate, (Hardage et al 1995).

En la figura anterior, las depresiones etiquetadas 1, 2 y 3 reflejan disoluciones kársticas Ellenburger originándose cerca de 100 ft (aproximadamente 305 m) más profundas en la sección. Estas depresiones se encuentran directamente debajo de las depresiones Caddo 1, 2 y 3 mostradas en la ilustración cubierta. Comparando este mapa estructural Vineyard con el mapa estructural de la más somera Caddo muestra que el número de depresiones generadas por karst incrementa con la profundidad. El área rectangular define el límite de los datos públicos (Hardage et al 1995).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

2.5. Datos de pozo y sísmica 3-D

Financiado por Arch Petroleum, Enserch y OXY USA, Inc, la sísmica 3D fue llevada a cabo en un área de 67.34 km², pero la región rectangular disponible para el estudio público (Figura 2.4.1) tiene sólo un área de 12.95 km². Los datos de sísmica 3D consisten de 110 * 110 ft (33 * 33 m) de bins apilados con números de traza (inline,X) incrementándose de oeste a este, y números de línea (crossline,Y) incrementándose de sur a norte. La esquina noreste del estudio es localizada en la traza 206 y línea 201, y la esquina suroeste está localizada en la traza 74 y esquina 105. Los valores de longitud y latitud para las cuatro esquinas del estudio fueron trasladados a valores X y Y UTM para la zona norcentral (4202) de los U.S, *Stated Plane Coordinate System* y el datum norteamericano. La Tabla 2.1 describe las cuatro esquinas de los datos públicos de sísmica 3D, empezando de la esquina sureste y yendo en sentido de las manecillas del reloj.



Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

amplitud disminuye a casi cero y en ocasiones cambia de signo algebraico. El perfil sísmico ABC se muestra en la Figura 2.4.2. (Hardage et al. 1995).

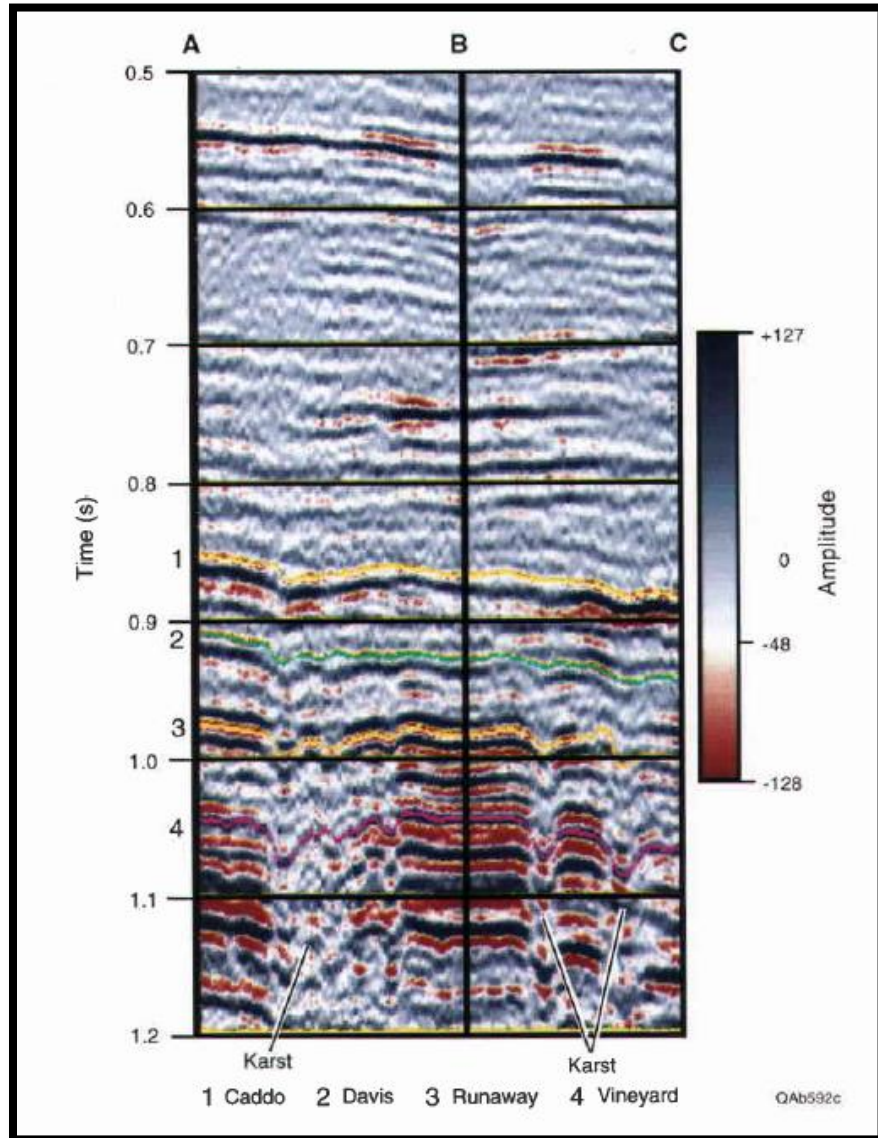


Figura 2.4.2. Perfil sísmico ABC. Este perfil pasa a través de un mayor de sísmica interrumpida entre A y B y dos áreas más pequeñas entre B y C. Note que el colapso de karst se extiende a bastante profundidad; Ellenburger está debajo de esta ventana de datos en un tiempo doble de aproximadamente 1.3 s. Este perfil debe ayudarnos a reconocer la apariencia del fenómeno generador de karst cuando se revisan los datos sísmicos 3D (Hardage et al 1995).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Con el objetivo de lograr una mejor imagen de los yacimientos de capa delgada y satisfacer requerimientos legales impuestos sobre la adquisición sísmica de la región, se han utilizado como fuente pequeñas cargas de pentonita direccional situadas en agujeros de tiro someros (3 m). Esto produce remarcablemente un espectro de señal de banda amplia excediendo los 200 Hz.

Sin embargo, análisis de grabación de campo mostraron que los datos contienen una considerable cantidad de ruido *ground roll*, y sólo unos cuantos eventos de reflexión pueden ser vistos. Esto ocasionó un problema al procesar los datos.

| Traza | Línea | Longitud | Latitud | X Localización | Y Localización |
|-------|-------|----------|---------|-------------------|-------------------|
| 74 | 105 | -97.9416 | 33.1789 | 1864886 | 550461 |
| 74 | 201 | -97.9413 | 33.2080 | 1865021 | 561020 |
| 206 | 201 | -97.8938 | 33.2076 | 1879540 | 560838 |
| 206 | 105 | -97.8941 | 33.1786 | 1879406 | 550279 |

Tabla 2.1. Coordenadas de las esquinas del área de estudio sísmico 3D.

Los datos de campo fueron procesados por Trend Technology, Midland, Texas. Parte de este *full-fold*, volumen de datos 3D migrados en tiempo han sido liberados para uso público. Este tipo de datos post apilamiento es aceptable para la interpretación estructural; sin embargo, para propósitos de extracción de atributos sísmicos es muy crítico asegurar que el espectro de amplitud sea preservado en cada etapa del procesamiento de los datos. Desafortunadamente, los datos pre apilamiento no están disponibles en el conjunto de datos públicos y se asume que una pequeña distorsión del espectro de amplitud se originó durante el procesado de los datos de campo.

En dirección vertical 2000 puntos fueron grabados con una tasa de muestreo igual a 1 ms. Los datos tienen un amplio rango de frecuencias de

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

aproximadamente 10 a 115 Hz. El datum estático para corregir por variaciones en elevación de superficie fue aplicado usando un datum de referencia sísmica (SRD) con elevación de 900 ft encima del nivel del mar. Después de la migración en tiempo, cada bin representa una traza, y para el área del proyecto existen 133 trazas en la dirección x y 97 trazas en la dirección y con una longitud de cada traza de 2000 muestras (Figura 2.4.3).

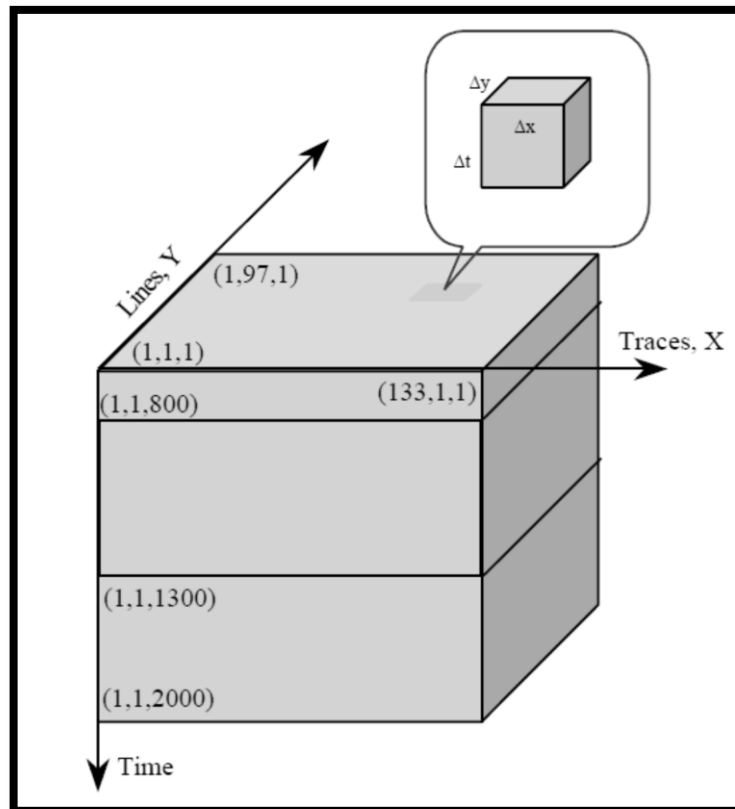


Figura 2.4.3. Esquema del cubo sísmico 3D. Ventana temporal conteniendo el intervalo de 800 a 1300 ms del conglomerado Bend que fue cortado y usado en el estudio. Tanakov (1997).

El conjunto de datos públicos contiene información de 38 pozos localizados en cuatro arrendamientos dentro del área rectangular mostrada en la Figura 2.4.4. Tres compañías, Arch Petroleum, Enserch, y OXY USA operaron estos arrendamientos. Varios pozos en el área del proyecto fueron perforados en los 50's. En algunos casos, los operadores de estos pozos cambiaron a través de los

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

años, y muchos de los datos de producción temprana no están disponibles. Así, el área de este trabajo cubre los pozos correspondientes a 5 localizaciones debido a la accesibilidad de datos de registros y de producción bien definidos.

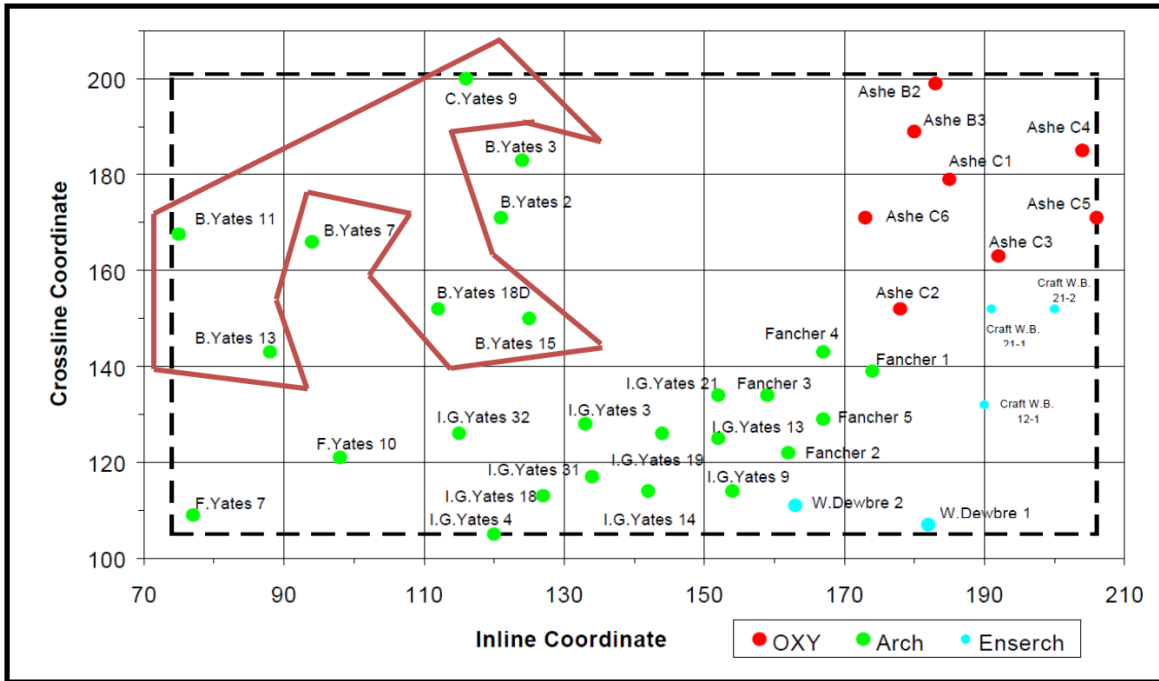


Figura 2.4.4. Mapa de conjunto de datos públicos mostrando coordenadas inline y crossline de los datos de la malla sísmica 3D y la localización de pozos dentro del mismo. Nótese el área en color rojo correspondiente a los pozos tomados para este estudio. Tanakov 1997.

Finalmente, por las características geológicas del campo Boonsville, es necesario aplicar una técnica que permita resolver la complejidad estratigráfica, con la cual se pueda diferenciar las facies geológicas y aumentar la resolución para la correcta definición de aquellos cuerpos arenosos relacionados a yacimientos petroleros.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

3. Aplicaciones.

Se procede a la aplicación de la transformada ondicular a registros geofísicos de pozo y datos sísmicos de reflexión, en la que se muestra la metodología a utilizar durante el procesamiento e interpretación de datos. El primer paso, será el análisis de impedancias, posteriormente, se implementara un análisis, procesamiento e interpretación de los registros geofísicos de pozo mediante transformada ondicular para la definición de zonas de interés y finalmente se aplicara la transformada ondicular para el procesamiento de datos sísmicos de reflexión, integrando así la información mencionada para definir zonas con probable impregnación de hidrocarburos.

3.1. Análisis de impedancias.

Usar datos integrados de sísmica 3D con datos de registros para construir el modelo de depósito del yacimiento es un trabajo rutinario y la estratigrafía juega un rol importante. Sin embargo, es común para secuencias delgadas exhibir cambios en los patrones de traza sísmica con terminación mal definida. Este trabajo, posee un desafío adicional: cómo distinguir, entre yacimientos de espesor delgado y no, yacimientos de espesor delgado cuando parecen similares en la escala sísmica.

El promedio de la impedancia acústica de la arcilla, arenisca y caliza del campo Boonsville es de 30000, 36000 y 40000 $\text{ft/s} \cdot \text{g/cc}$ respectivamente (Figura 3.1), indicando que es posible separar con confianza los yacimientos de arenisca de los no yacimientos de caliza mediante la identificación de sus impedancias acústicas. Sin embargo la discriminación es difícil en este campo, debido a que las capas de arenisca y caliza se muestran similares en la escala sísmica.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

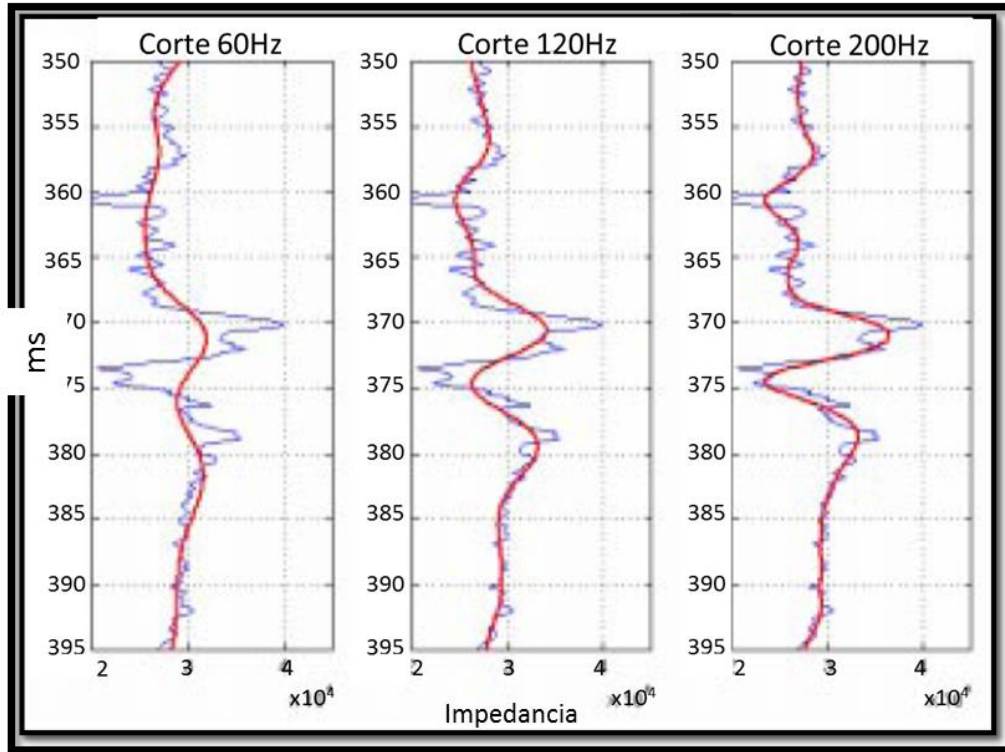


Figura 3.1. Muestra del contraste de impedancia en Boonsville. Pennington (2002).

La Figura 3.1 muestra la capa rápida correspondiente al tiempo doble de 370 ms es una caliza, y la capa rápida correspondiente al tiempo doble de 378 ms es una arenisca; las otras formaciones son mayormente arcillas. La impedancia original es mostrada en azul en todas las trazas, y la impedancia filtrada es mostrada en rojo, usando un suavizado con la ondícula de Morlet. Nótese que por debajo de 120 Hz, la distinción entre capas caliza y arenisca es insignificante.

Un registro sísmico de pozo tiene una resolución menor de 5 ft (1.5 m) en comparación con la resolución sísmica, por arriba de los 50 ft (16 m) para el conjunto de datos Boonsville, lo cual es posible verificar mediante el cálculo de la resolución sísmica y la comparación de esta con la de registros de pozo. El ancho de banda de la frecuencia de los datos sísmicos de Boonsville es de 15 a 120 Hz mientras que el ancho de banda de las frecuencias del registro de velocidad es de 0 a 500 Hz. Así, es necesario un filtrado para escalar el ancho de

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

banda de frecuencia de los datos de pozo a los datos sísmicos. Como resultado de la aplicación de la transformada ondicular, las altas impedancias de las capas delgadas son promediadas con impedancias cercanamente más bajas. El efecto final es que la impedancia más alta del no yacimiento de caliza parece estar cercana a la impedancia del yacimiento de arenisca. Un tratamiento más completo del problema lo reporta Backus (1962) promediando las capas delgadas, con detalles dependiendo del contenido de frecuencias de la ondícula, pero el efecto total casi será la reducción completa de las más altas impedancias resueltas. Así, dos tipos de rocas podrían ser fácilmente similares en escala sísmica y llegar a ser difíciles de distinguir sólo a partir de la interpretación de un conjunto de datos sísmicos.

3.2. Aplicación de Redes Neuronales

Se llevó acabo la implementación de redes neuronales para la creación del registro de pozo neutrón en el pozo Billy Yates 15, el cual ya tenía un registro de neutrón previo, sin embargo, ya que su registro estaba editado y mostraba cortes en los bordes era indispensable tener un registro de alta calidad para la evaluación petrofísica posterior.

El primer paso para la implementación de la red neuronal, fue tomar los registros del pozo Billy Yates 18D y con ellos dar las entradas para el entrenamiento de nuestra red. Los registros que se tenían en el pozo BY18D eran varios, sin embargo el criterio utilizado para la elección de las entradas fue con base en las características de medición. Así, se tomaron los registros de Densidad (RHOB), Rayos Gamma (GR) y Factor Fotoeléctrico PEF; para entrenar a la red y obtener una convergencia con el registro de neutrón (NPHI) (Figura 3.2). De inicio se analizó que no existiera dependencia entre los registros tomados para poder llevar a cabo la optimización de la red (Figura 3.2.1), ya que si fuesen variables dependientes no sería necesario tomar dos entradas con un comportamiento similar, pues esto crearía redundancia en el proceso.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

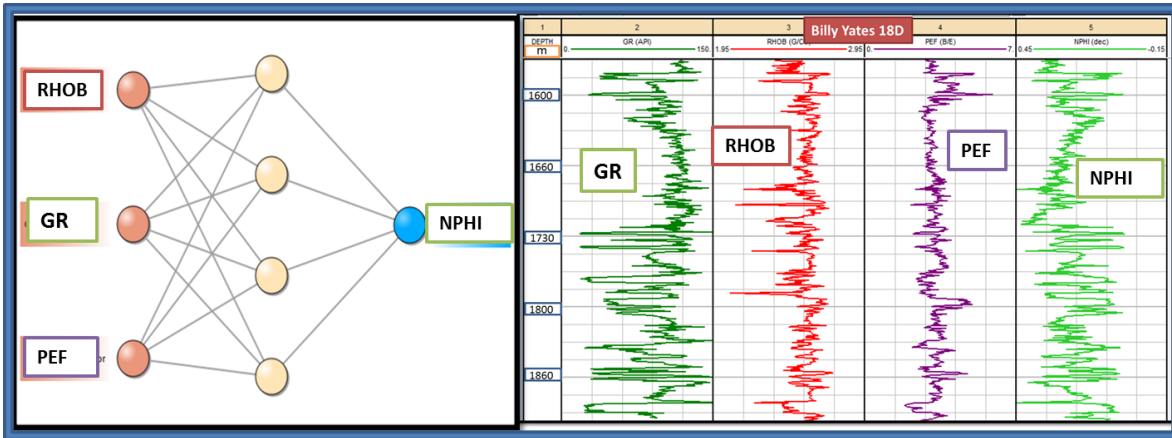


Figura 3.2. Arquitectura de la red utilizada. A la izquierda se observa la conexión de las entradas en el registro BY18D características de una red feed-forward con perceptrón de una capa. A la derecha se presentan los registros de entrada para la red neuronal.

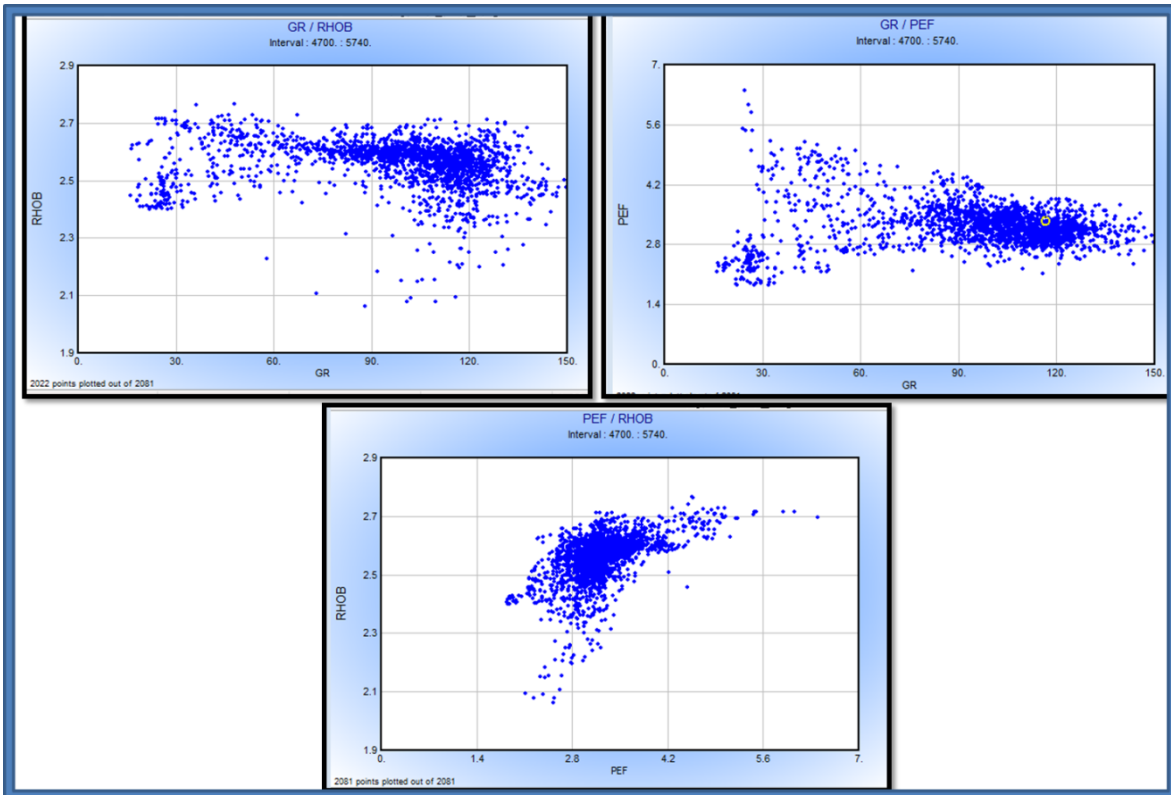


Figura 3.2.1. Muestra la independencia entre los registros utilizados para el entrenamiento de la red neuronal.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Las neuronas fueron organizadas dentro de capas que tienen conexiones unidireccionales entre ellas. Se utilizó un aprendizaje supervisado, o aprendizaje con un “instructor”, donde la red fue dotada con una respuesta correcta (salida), en este caso el registro de neutrón. Los pesos fueron determinados para permitir que la red produjera respuestas tan cerca como sea posible a la respuesta correcta conocida. Así, exploró la estructura fundamental en los datos o correlaciones entre patrones y los organizó dentro de categorías de dichas correlaciones.

La ejecución fue mejorada a través del tiempo por medio de una actualización iterativa de los pesos en la red. La red fue habilitada para aprender automáticamente de ejemplos atractivos, además de seguir una serie de reglas especificadas.

Para diseñar el proceso de aprendizaje, primero se entrenó a la red en un modelo conocido (Pozo BY18D), esto es, una vez conocida la información disponible para la red, se procedió a entrenar la red para finalmente aplicarla al pozo BY15 (Figura 3.2.2). Por otro lado, fue indispensable el entendimiento de la actualización de los pesos de la red, esto es, ver cuales reglas de aprendizaje gobiernan el proceso de actualización.

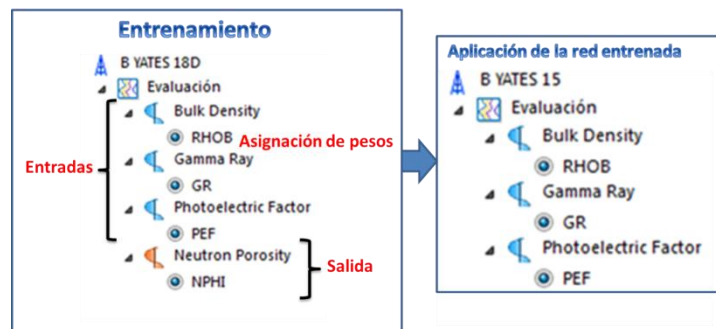


Figura 3.2.2. A la izquierda se muestran los valores de entrada y salida para entrenar la red; a la derecha son mostrados los valores de entrada para la implementación de la red previamente entrenada en la reconstrucción del registro neutrón para el pozo BY15.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

El proceso o flujo de trabajo consistió en tomar los registros del pozo BY18D, entrenar la red neuronal y por medio de un proceso de 200 iteraciones durante el aprendizaje y actualización de los pesos, el sistema convergió a la solución (salida) NPHI, revisando, a cada iteración, el error y comparando en base a la norma establecida (Figura 3.2.3). Una vez que se había entrenado la red, se llevó a cabo su implementación para la reconstrucción del NPHI en el pozo BY15 con entradas de densidad (RHOB), rayos Gamma (GR) y factor fotoeléctrico (PEF).

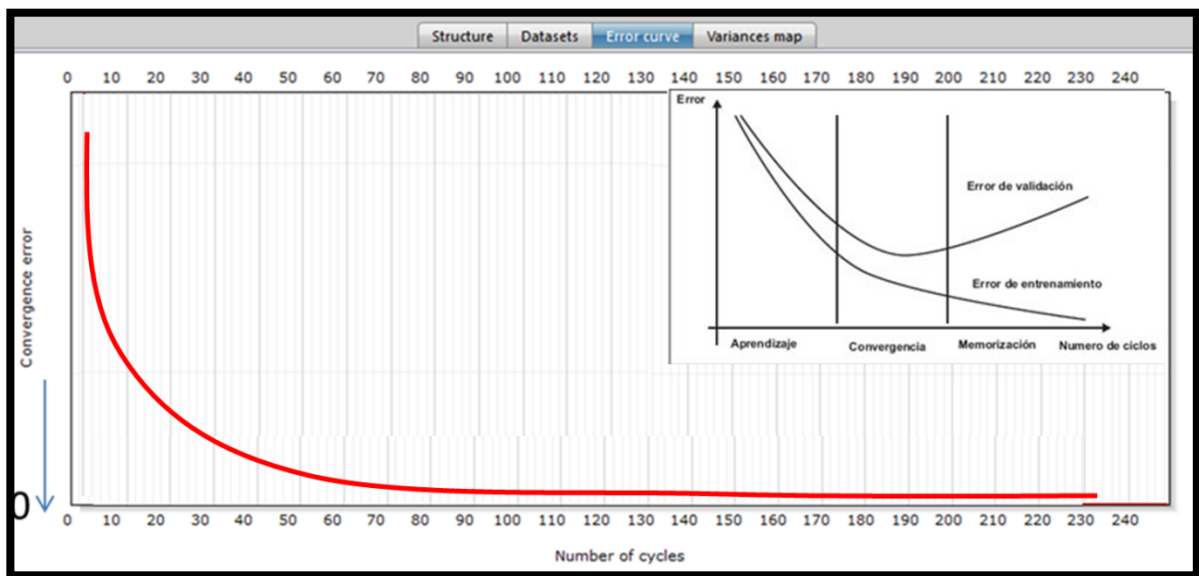
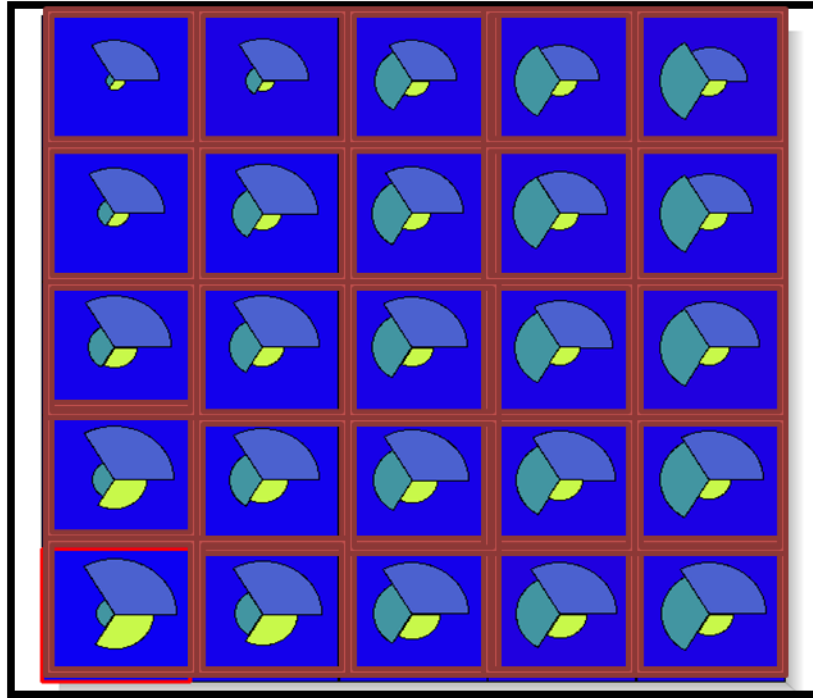


Figura 3.2.3. Convergencia. Se observa cómo en relación al tiempo, el proceso iterativo converge con el modelo (salida) NPHI para el pozo BY18D, reduciendo el error con base en la norma correspondiente.

Para cada iteración del aprendizaje se asignan mayores pesos a cada una de las entradas, correlacionando con la salida deseada mediante reconocimiento de patrones, dichos pesos estarán teniendo fluctuaciones en base a cada iteración según el avance de aprendizaje. Para cada combinación en base a la respuesta de los registros se alimentarán las unidades neuronales (Figura 3.2.4).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.



*Figura 3.2.4. El aprendizaje es ejecutado con un mapa 5*5 de vectores neuronales. Cada unidad neuronal es alimentada por una combinación de respuestas de registros de pozos específicos. Hay tres registros de entrada en este trabajo: cada nodo refleja una composición espectral específica que puede ser desplegada como un diagrama de rosa. El tamaño de cada porción está relacionado a la respuesta del registro.*

El resultado final de aplicar redes neuronales al registro neutrón para el pozo BY15, muestra importantes mejoras, en el intervalo de 1490-1540 se puede notar de manera significativa la aplicación de la red (Figura 3.2.5).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

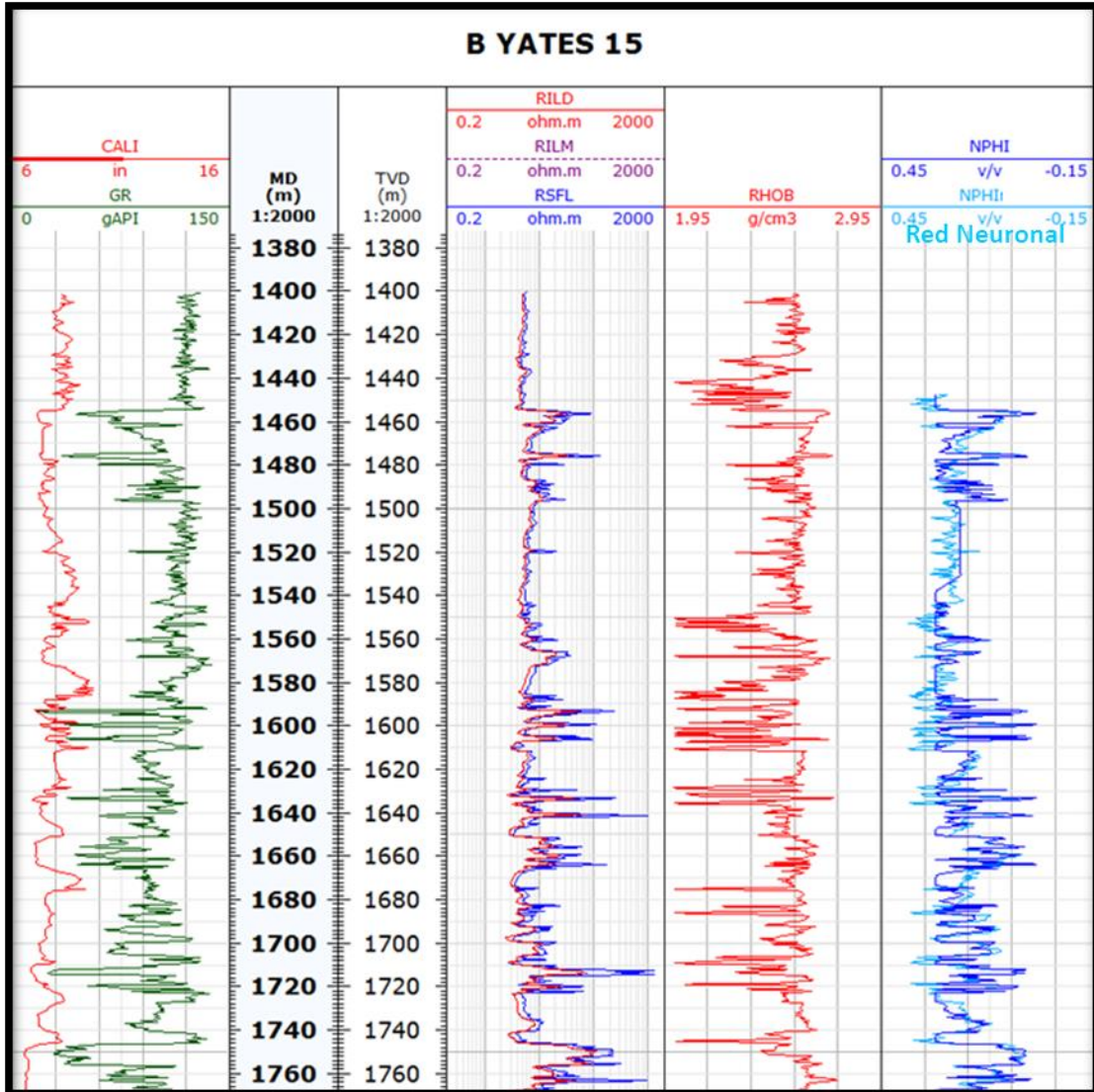


Figura 3.2.5. Resultado de la red neuronal al registro neutrón. Se muestra en azul rey el registro NPHI original, y en color azul pastel el registro NPHI obtenido con la aplicación de redes neuronales.

Tal y como se observa en la figura 3.2.5, para el intervalo 1580-1610m, la porosidad es diferente entre NPHI y NPHI obtenida mediante redes neuronales, esto es debido a que probablemente NPHI fue calculado a partir del RILD, por lo que presenta una pobre-estimación de porosidad debido a la presencia de probables zonas de impregnación o compactación.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Es importante mencionar que estudios alrededor del mundo muchas veces carecen de información robusta acerca de la confiabilidad de los registros de pozo, ya sea por cuestiones de mala supervisión en la adquisición o inconvenientes durante el desarrollo del pozo. Lo anterior da entrada a la aplicación de las redes neuronales en la reconstrucción, he inclusive validación de datos de RGP.

Otro punto que queda claro aquí, es que teniendo información completa de registros para pozos vecinos, no sólo auxiliará en la tarea de calibración y seguimiento de horizontes sísmicos, si no también permitirá al intérprete de RGP validar su información y si así fuese necesario, dar complemento a la misma mediante la implementación de redes neuronales usando pozos adyacentes.

3.3. Aplicación de la transformada ondicular al procesado de RGP.

Uno de los principales objetivos de la aplicación de registros de pozo es en primer lugar, re-escalar la resolución del pozo a la resolución de la sísmica 3D, dado que cada uno de ellos trabaja en un rango diferente banda de frecuencias. Como se ha indicado en capítulos anteriores, el rango de frecuencias de los registros de pozo es mayor que el de los datos sísmicos, por lo que el filtrado de las frecuencias es una parte fundamental para reconocer patrones correspondientes a yacimientos de capas delgadas (Rivera et al., 2004).

Por otro lado, el filtrado de la señal es un proceso delicado, ya que si no se hace a detalle se puede eliminar información de interés para el estudio llevado acabo. En este contexto, es de gran importancia llevar el análisis de la señal de manera clara y a un alto nivel de procesamiento, tomando así, todos los puntos en cuenta que nos ayuden a tener los resultados esperados.

Por tal razón se tomaron 5 pozos del campo Boonsville, los cuales mostraban información suficiente para hacer una evaluación petrofísica y como una

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

justificación extra, contenían la mayor información disponible de registros geofísicos de pozo necesarios para la evaluación petrofísica y la correlación con los datos sísmicos 3D.

El flujo de trabajo en el tratamiento de RGP mediante la implementación de la transformada ondicular se muestra en la Tabla 3.3. Es importante mencionar que el proceso es bastante rápido desde el punto de vista de rendimiento computacional, lo cual refuerza el uso de la técnica como una herramienta valiosa al procesamiento de las señales.

| PASOS | DESCRIPCION |
|---|---|
| Carga de registros de pozo (.LAS) | Carga en Matlab y almacenamiento en la matriz principal. |
| Descomposición aplicando DWT | Para 2^N escalas. Coeficientes de detalle y de aproximación. |
| Análisis de escalogramas mediante CWT. | Despliegue en 2D (escala – tiempo). Observar mayores perturbaciones en RGP. |
| Elección de escalas a reconstruir la señal del RGP. | Análisis de escala, tomando en cuenta los cambios asociados a comodidad del proyecto. |
| Reconstrucción mediante IDWT. | Una vez analizada la señal se procede a reconstruirla con las escalas de nuestro interés. |
| Guardar la nueva señal pre procesada. | Despliegue de la señal para su almacenamiento y posterior aplicación. |

Tabla 3.3. Flujo de trabajo para el procesamiento de RGP en la zona.

A continuación se explican cada uno de los pasos seguidos durante el procesamiento de señales (Registros de pozo). Además se muestran los pozos

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

utilizados con la información de utilidad para aplicar transformada ondícula (Tabla 3.3.1).

| Pozo | Címa (m) | Base (m) | Secuencia | Zona | MARCADORES (m) | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | MFS_30 | MFS_36 | MFS_39 | MFS_40 | MFS_53 | MFS_55 | MFS_60 | MFS_70 | MFS_80 | MFS_10 |
| Billy Yates 11 | 1732.37 | 1713.9 | Wineyard | Lower Atoka | 1683 | 1680 | 1580 | 1578 | 1601 | 1624 | 1645 | 1689 | 1689 | 1785 |
| Billy Yates 13 | 1725.108 | 1746.6108 | Wineyard | Lower Atoka | 1639 | 1680 | 1538 | 1591 | 1615 | 1637 | 1658 | 1675 | 1714 | 1780 |
| Billy Yates 15 | 1593.19 | 1599.6 | Trinity | Lower Atoka | 1654 | 1685 | 1550 | 1602 | 1628 | 1649 | 1673 | 1691 | 1734 | 1789 |
| | 1712.41 | 1714.2 | Jasper Cr | | | | | | | | | | | |
| | 1719.3768 | 1719.9 | Jasper Cr | | | | | | | | | | | |
| | 1748.6376 | 1751.1 | Wineyard | | | | | | | | | | | |
| Billy Yates 18D | 1620.6 | 5624.8 | Runway | Lower Atoka | 1443 | 1472 | 1540 | 1574 | 1615 | 1637 | 1661 | | 1721 | |
| | 1679.41 | 1682.2 | Jasper Cr | | | | | | | | | | | |
| | 1698.96 | 1701.5 | Jasper Cr | | | | | | | | | | | |
| | 1707.49 | 1708 | Jasper Cr | | | | | | | | | | | |
| Cap Yates 9 | 1586.78 | 1588 | Trinity | Lower Atoka | 1452 | 1476 | 1540 | 1580 | 1622 | 1638 | 1660 | 1685 | 1719 | 1754 |
| | 1733 | 1737.7 | Wineyard | | | | | | | | | | | |

Tabla 3.3.1. Datos de pozo. Se observan los diferentes pozos y sus correspondientes formaciones, así como intervalos marcadores de superficies de Máxima Inundación.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Tal como lo muestra la Tabla 3.3, el flujo de trabajo es en un amplio sentido fácil de adaptar a los datos de RGP ya que en lo referente a análisis de señales la transformada ondicular es una herramienta robusta.

Tal y como se mencionó con anterioridad, la transformada ondicular es una poderosa herramienta para el análisis de señales, no sólo por la ventaja de adaptarse a las características de la señal misma sino también porque permite la localización de anomalías que muchas veces son difíciles de detectar como lo son cambios repentinos, picos o saltos anómalos, ruido en la señal, etcétera.

Lo anterior, deja a la transformada ondicular en ventaja a otros métodos como lo es, por ejemplo, el análisis de Fourier, ya que este último permite observar el contenido de frecuencias de una señal pero no la localización de cada frecuencia dentro de la señal, lo cual la WT si lo permite.

Una vez tomadas las consideraciones pertinentes para la elección de pozos, se procedió a aplicar la transformada ondicular continua a los registros de los pozos BY11, BY13, BY15, BY18D y CY9 respectivamente, con el objetivo de observar rasgos en diferentes escalas; ver en que rango de profundidad se encontraban (localización espacial) y finalmente poder reconstruir a partir de la aplicación de la transformada ondicular discreta tomando sólo en cuenta aquellas escalas que mostrasen variaciones y características, y que como más adelante se verá corresponden a cambios de interés prospectivo. Con base en lo anterior, una vez reconstruida la señal es permisible resaltar los rasgos en respuesta del registro geofísico y posteriormente dar una interpretación más detallada a nuestros datos.

Por otro lado este procedimiento también permite analizar los datos y mandarlos a escala sísmica, siempre y cuando la anterior y la escala de RGP no difieran en gran proporción (en unidades de Hz's).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

El procedimiento se llevó a cabo mediante la programación en MATLAB® y el flujo de trabajo que se siguió fue el siguiente Figura 3.3:

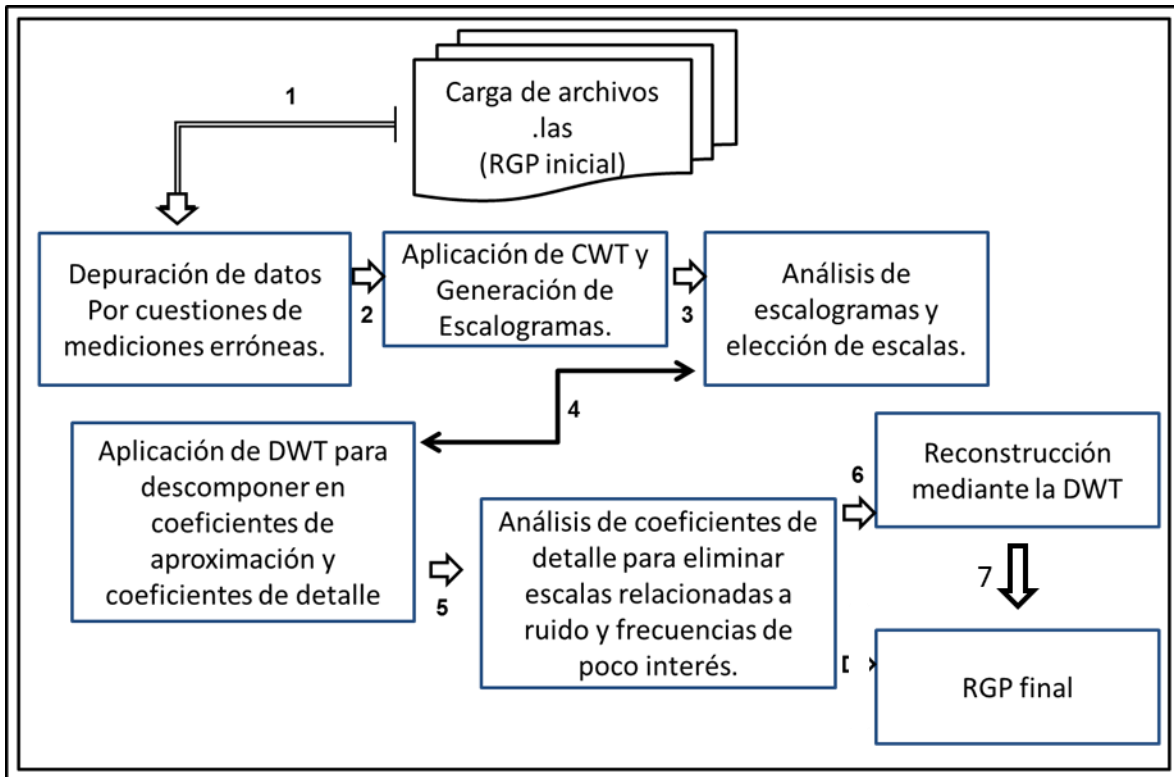


Figura 3.3. Flujo de trabajo durante la programación en Matlab® para la aplicación de transformada ondicular a RGP.

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.3 muestra cada paso que se siguió para aplicar la transformada ondicular, y por su parte de manera gráfica la Figura 3.3.2, muestra el procedimiento que se siguió, donde podemos observar lo siguiente:

1. Carga de RGP. Para una adecuada carga de los datos primero se editaron aquellos registros que mostraban problemas de adquisición y se completaron como lo fue el caso del registro NPHI para el pozo BY15 mediante la implementación de redes neuronales.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

2. Aplicación de la CWT. Mediante la aplicación de la transformada ondicular continua de Morlet, se generaron los escalagramas de los registros disponibles para cada pozo y se analizaron las escalas en las cuales se observaban anomalías o rasgos que pudiesen dar una respuesta de interés.

3. Aplicación de la DWT. Una vez elegidas nuestras escalas de interés para cada registro, se aplicó la transformada ondicular discreta con el objetivo de trabajar con los coeficientes de detalle, los cuales están relacionados a ruido y frecuencias altas, pero también a rasgos de interés detallado. Es importante mencionar que una de las ventajas de la transformada ondicular discreta, es que permite discriminar en una señal la respuesta asociada a ruido de aquella asociada a cambios de interés desde el punto de vista petrolero (Figura 3.3.1). En esta parte del proceso se buscó mediante un previo análisis de la señal aplicando la CWT, primero eliminar las escalas relacionadas con ruido y después aquellas que salían de escala sísmica. Sin embargo, al implementar la CWT se observó que no era factible solucionar el problema de ruido, solamente permitía definir aquellas escalas que contribuían con mayor peso en la elección de zonas de interés, de las cuales se tenía información de datos de producción.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

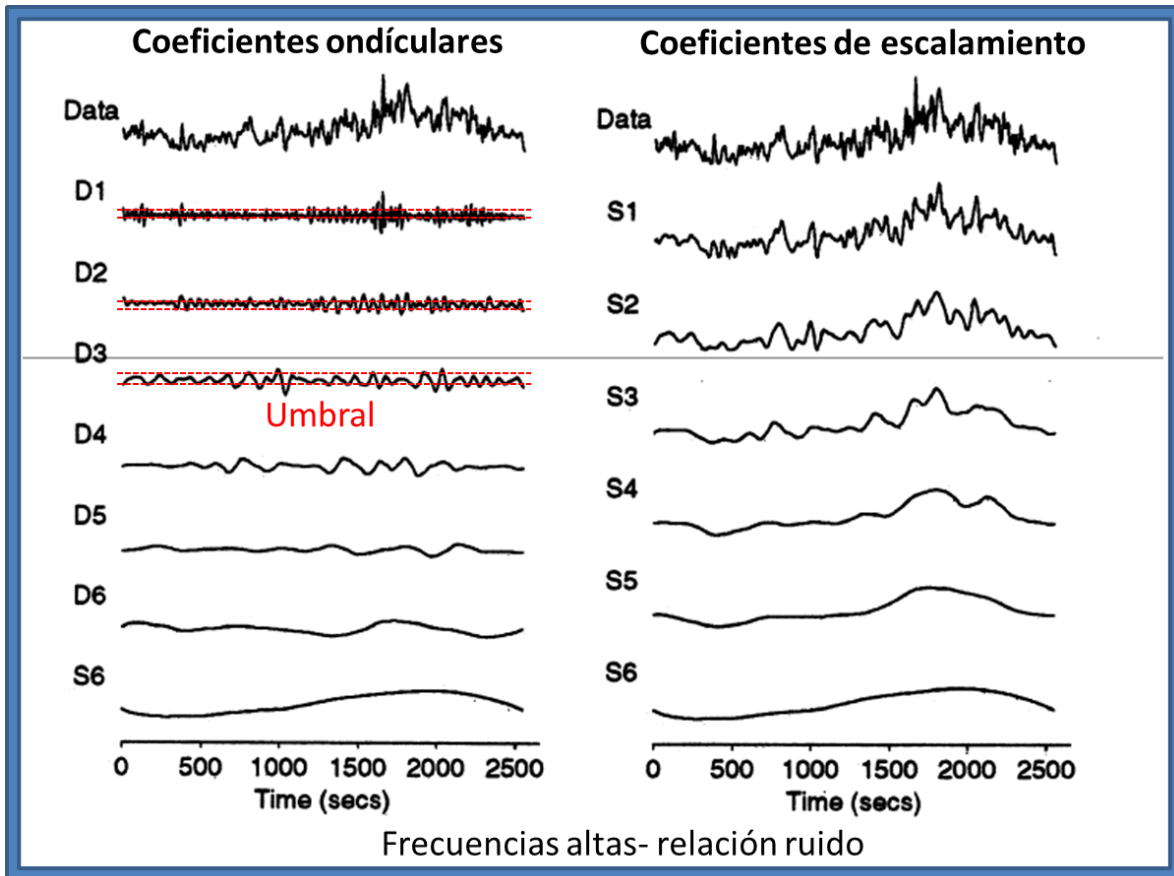


Figura 3.3.1. Descomposición de datos de lluvia durante un periodo de 10 semanas. En ella se observan los coeficientes ondículaes relacionados a altas frecuencias y los de escalamiento a bajas frecuencias. Modificada de Kumar 1997.

Por lo anterior, se procedió a la implementación de la transformada ondicular discreta, esta vez utilizando una ondícula base de coiflet, con lo que fue posible obtener los coeficientes de detalle relacionados a la presencia de ruido y trabajar con ellos mediante el análisis multiresolución para remover dicho ruido de la señal de registros de pozo, tal y como lo muestra la figura 6.1.1, donde se observa la descomposición de la señal y se discriminan mediante un criterio de umbralización aquellas frecuencias relacionadas a ruido. Donoho et al. (1993)

En este punto es de suma importancia aclarar que la resolución de un RGP es mayor a la resolución sísmica, sin embargo esto tiene un factor relativo ya que

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

para este caso de estudio la resolución sísmica permite ver paquetes de estratos de decenas de metros a diferencia de la sísmica convencional, la cual permite ver cientos de metros. Lo anterior indica que mandar los registros a escala sísmica es factible para este estudio en particular.

4. Reconstruir la señal. Finalmente una vez analizadas las escalas de interés se procede a reconstruir la señal con la aplicación de la DWT, obteniendo un conjunto de RGP para cada uno de los pozos del área de interés.

Cabe mencionar que el flujo de trabajo fue llevado a cabo en Matlab®, implementando un algoritmo realizado por el autor de este trabajo.

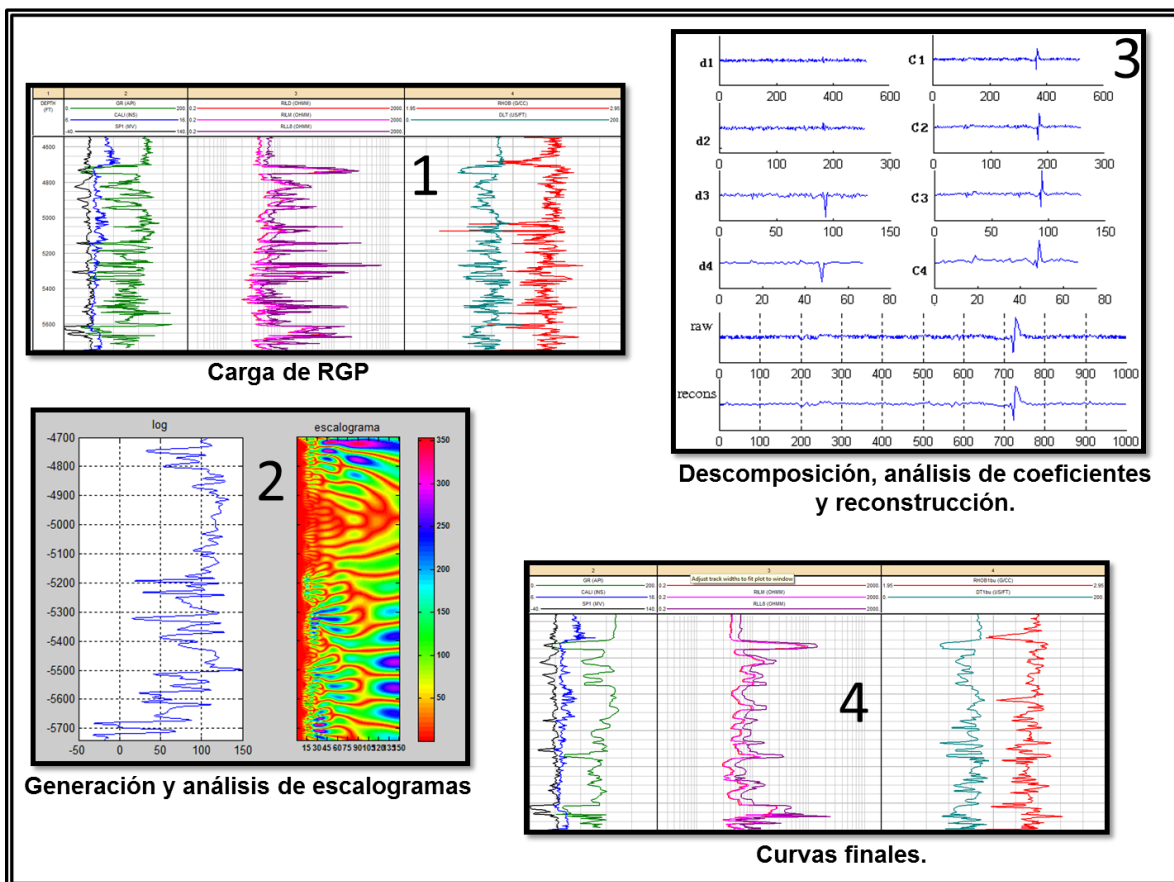


Figura 3.3.2. Procedimiento a seguir para aplicar la transformada ondicular.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

3.4. Billy Yates 18D.

Para el pozo BY18D cuya localización se muestra en la Figura 3.4, se tienen los registros de pozo mostrados en la Figura 3.4.1, a los cuales se les aplicó la transformada ondicular continua sin considerar el caliper, utilizando una ondícula de Morlet y se observó a partir del análisis de escalogramas lo siguiente:



Figura 3.4. Localización de los pozos en el área de estudio. Tomada de Google Earth 2013.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.



Figura 3.4.1. RGP para el pozo BY18D.

- En los registros sínicos, rayos gama, resistividad y densidad, se logra observar una evidente respuesta por parte del escalograma en las escalas 20, 45, 60 y 75 respectivamente (Figura 3.4.2) para el rango de profundidad correspondiente al intervalo de 5317-5331 metros.
- Dicha respuesta reforzada con las evaluaciones petrofísicas, es consistente con los datos de producción reportados en Hardage (1995) por para este pozo, cuyos valores fueron de 20 MMscf de gas acumulado y 0.07 MSTB de aceite acumulado.
- Las escalas antes mencionadas que muestran una respuesta en valores altos de los coeficientes ondulares, corresponden a rangos de frecuencias entre los 13 y

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

35 Hz, lo cual supone espesores de capa de 44 metros en el caso de las escalas mayores, y 14 metros para el rango de las escalas menores, lo anterior tomando como referencia una velocidad promedio del medio de 2300 m/s para el cálculo de la resolución vertical mediante el criterio de Raleigh (Figura 3.4.3), el cual está establecido definiendo la separación entre picos y valles de patrones de difracción desde dos puntos de objetos fuentes (Jenkins y White, 1957): $\lambda=(1/4)(v/f)$, donde λ es la longitud de onda, f la frecuencia dominante y v es la velocidad del medio.

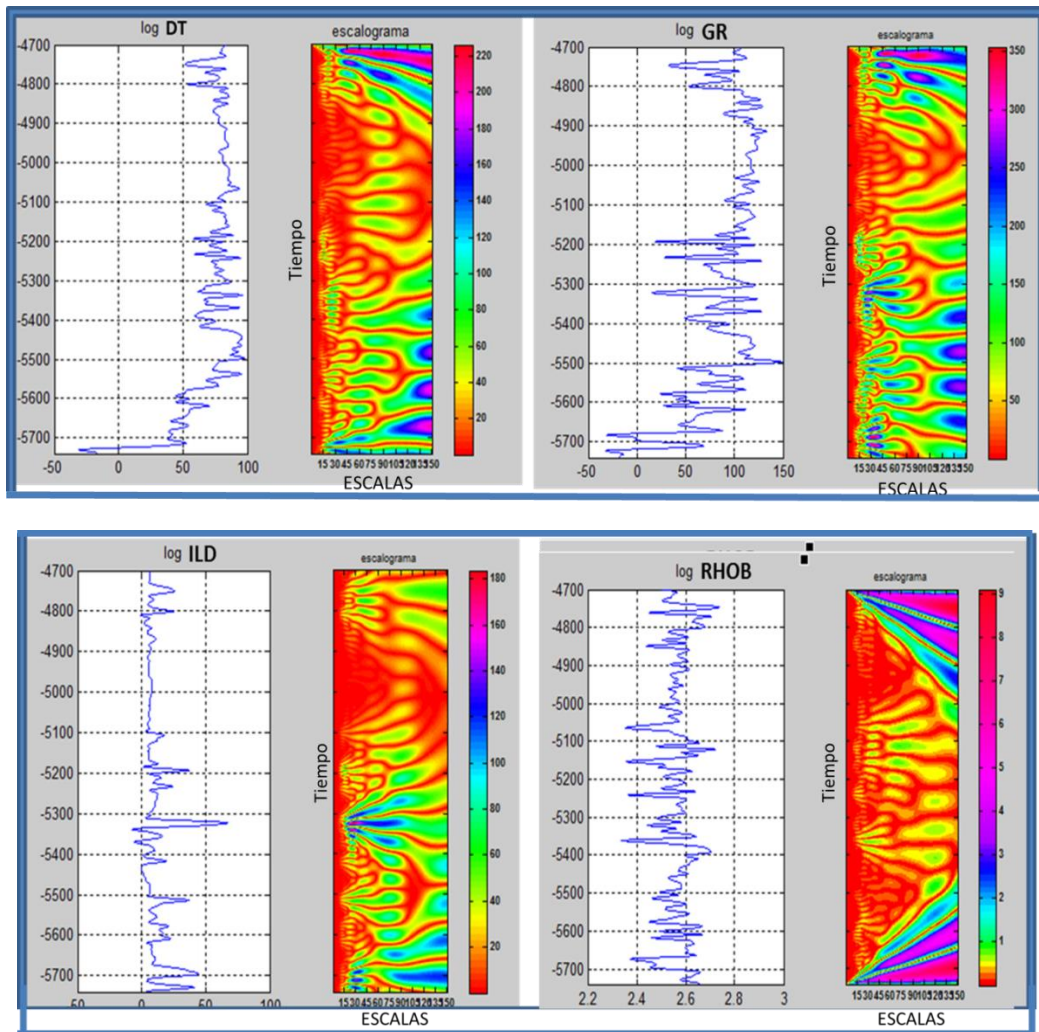


Figura 3.4.2. Muestra los registros del pozo Billy Yates 18D con sus respectivos escalogramas generados mediante la aplicación de transformada Ondicular Continua.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

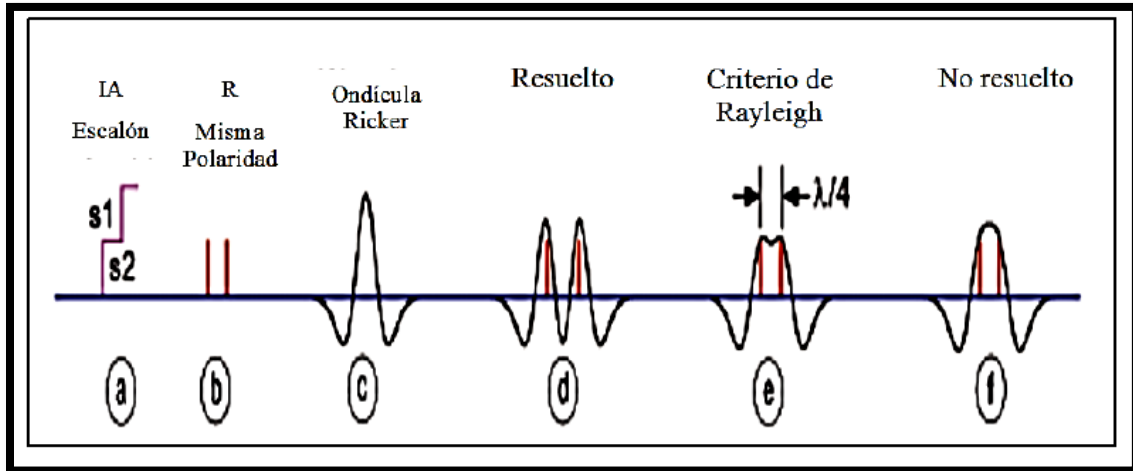


Figura 3.4.3. Criterio de resolución sísmica de Raleigh (Zeng, 2009).

- Hay que recordar que la sísmica de Boonsville está en el rango de 15 a 120 Hz, por lo que las escalas que muestran una respuesta para el intervalo de interés se pueden observar en la sísmica como rasgos característicos gracias a la resolución de la misma.

Una vez que se analizaron los registros y sus respectivos escalogramas para la elección de las escalas representativas, se procedió a aplicar la transformada ondicular discreta con el objetivo de reconstruir la señal con el aporte de las escalas previamente elegidas. En este caso, se buscó por medio de la descomposición analizar y eliminar las escalas que no eran importantes por no mostrar respuesta en el intervalo de interés (con base en datos de producción), esto recordando que los coeficientes de detalle obtenidos a partir de la transformada ondicular discreta eran de primordial interés para la discriminación entre la respuesta debida a ruido y aquella debida a rasgos importantes en la señal.

Finalmente, se procedió a la reconstrucción de la señal obteniendo los registros procesados como producto final (Figura 3.4.4).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

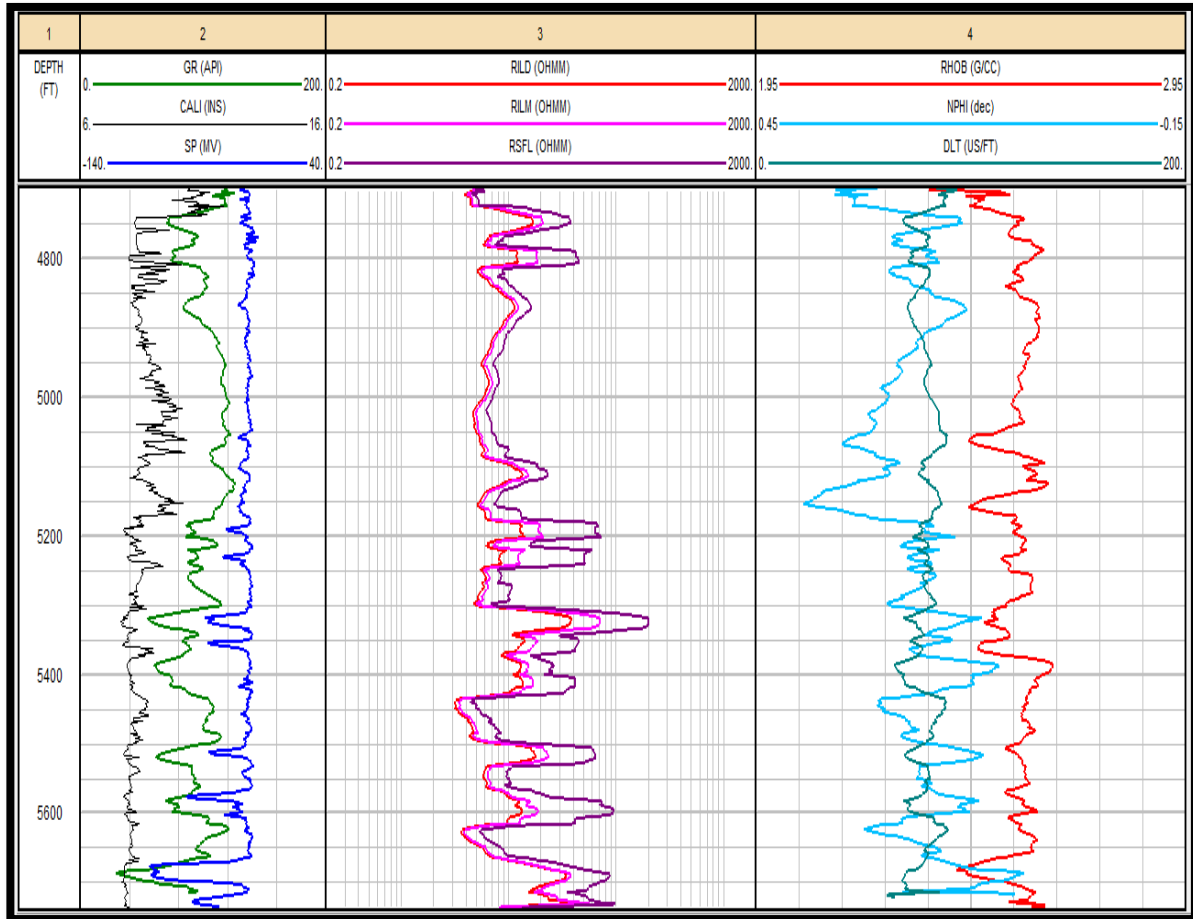


Figura 3.4.4. Registros resultantes de la aplicación de la Transformada ondicular al pozo Billy Yates 18D.

3.5. Billy Yates 13.

Para el pozo BY13 cuya localización se muestra en la Figura 3.4, se tienen los registros de pozo mostrados en la Figura 3.5, a los cuales se les aplicó la transformada ondicular continua, utilizando una ondícula de Coiflet 3 y se observó a partir del análisis de escalogramas lo siguiente:

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

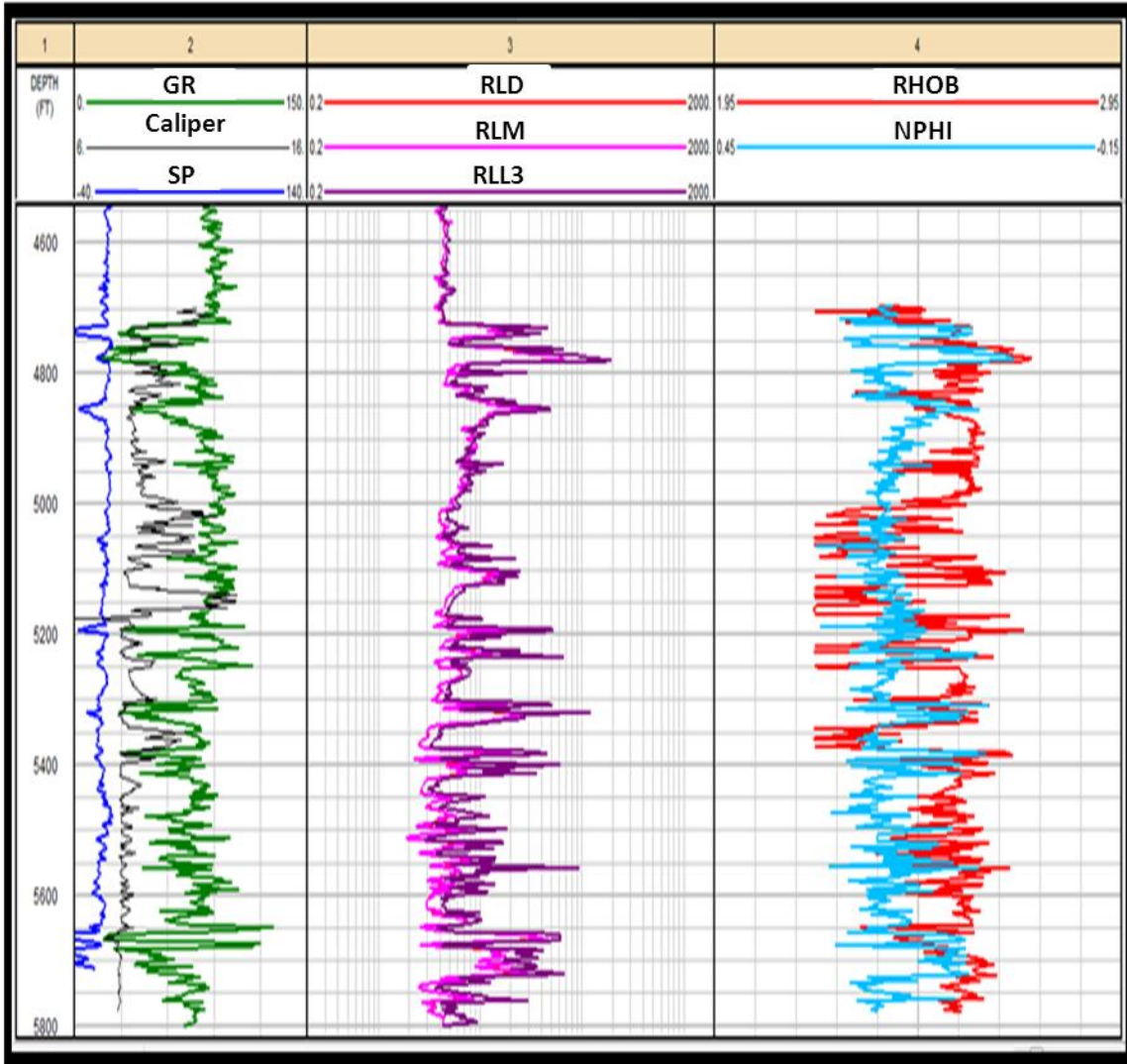


Figura 3.5. RGP para el pozo BY13.

- En los registros rayos gama, resistividad y densidad, se logra observar una evidente respuesta (caracterizada por valores altos de los coeficientes ondiculares) por parte del escalograma en las escalas 15, 30, 45 y 70 respectivamente (Figura 3.5.1) para el rango de profundidad correspondiente a los 5660-5691 metros.
- Para este pozo se reporta una producción de 352 MMscf de gas acumulado (Hardage, 1995), y como rasgo importante tenemos una buena respuesta (caracterizada por valores altos de los coeficientes ondiculares) en los escalogramas para la zona de interés.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- Se tiene un amplio contenido de frecuencias en cuanto a la respuesta de los escalogramas, el cual va de los 13 a los 38 Hz, lo cual hace pensar en espesores de capa variantes de 44 metros en el caso de las escalas mayores y 14.5 metros para el rango de las escalas menores.

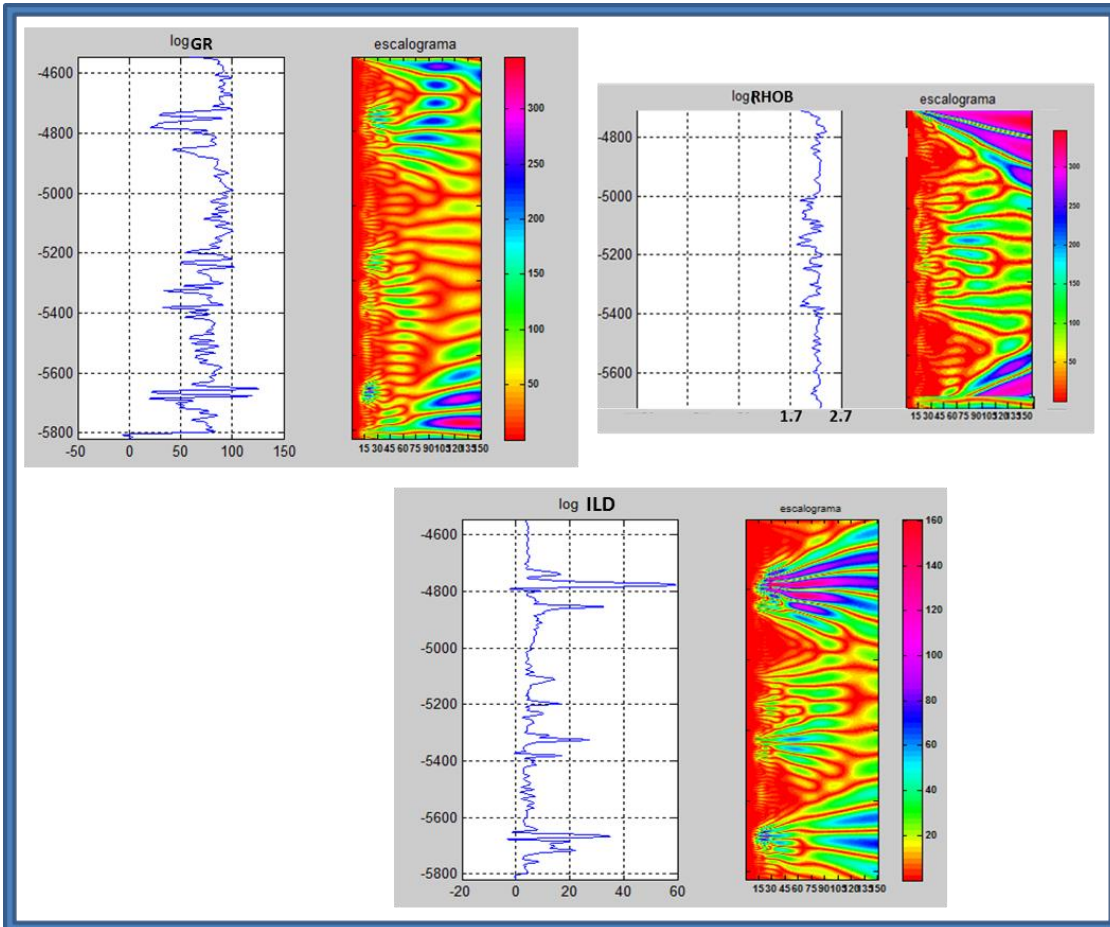


Figura 3.5.1. Muestra los registros del pozo Billy Yates 13 con sus respectivos escalogramas generados mediante la aplicación de transformada Ondicular Continua.

Finalmente, se procedió a la reconstrucción de la señal obteniendo los registros procesados como producto final (Figura 3.5.2).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

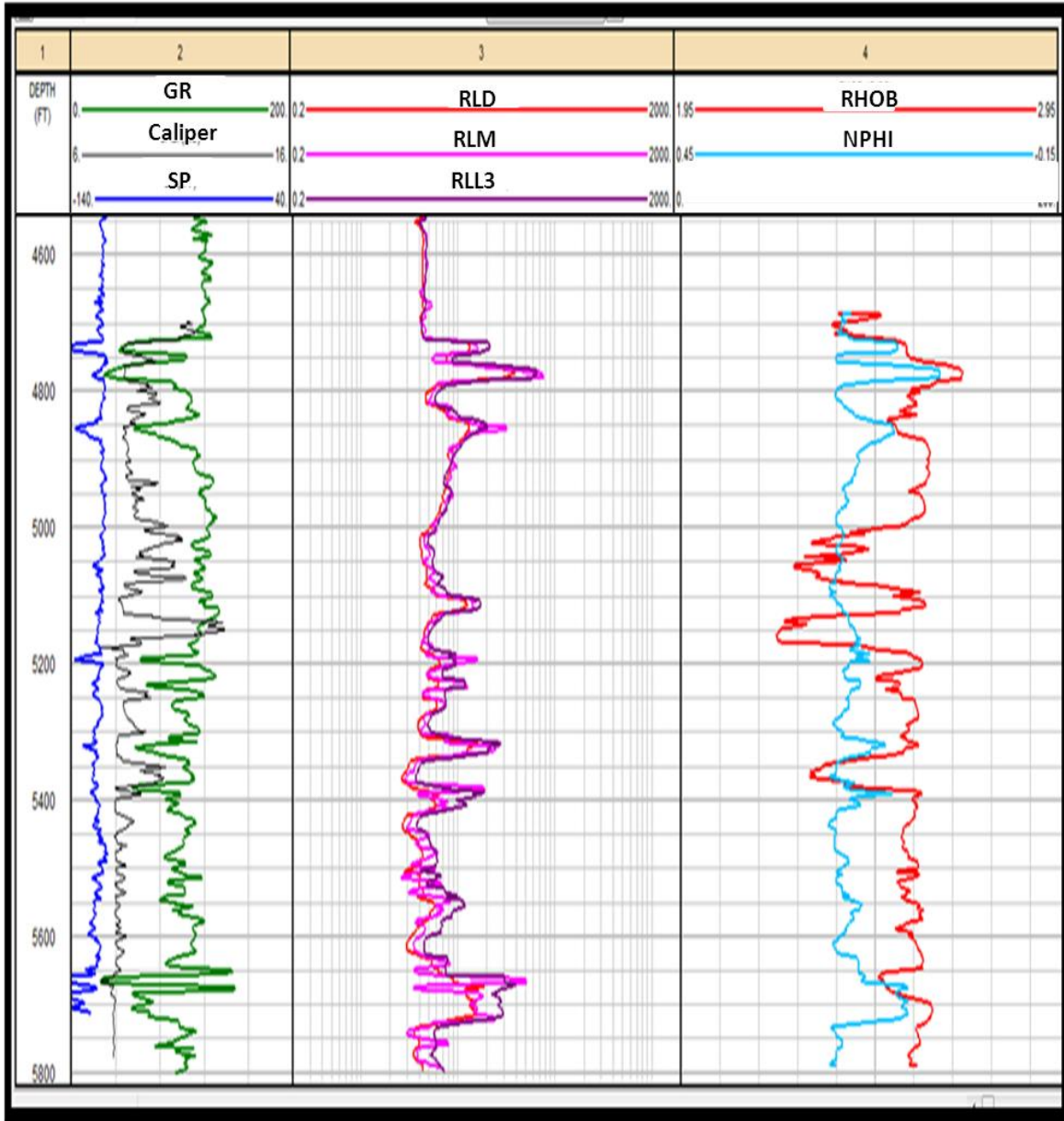


Figura 3.5.2. Registros resultantes de la aplicación de la Transformada ondicular al pozo Billy Yates 13.

3.6. Billy Yates 15.

Para el pozo BY15, se tienen los registros de pozo mostrados en la Figura 3.6, los cuales al aplicárseles la transformada ondicular continua y a partir del análisis de escalogramas indicaron lo siguiente:

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

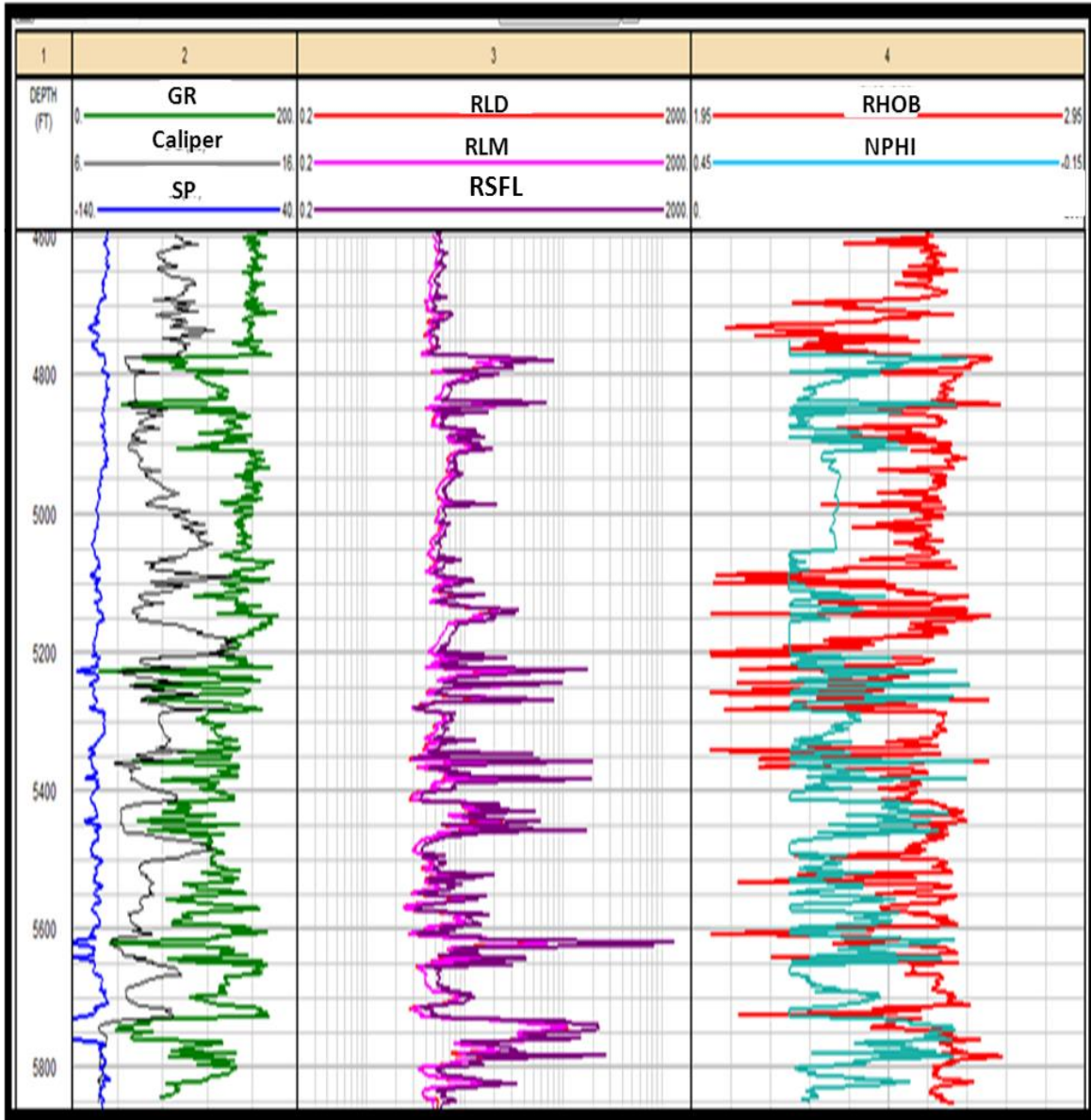


Figura 3.6. RGP para el pozo BY15.

- En los registros rayos gama y resistividad, se logra observar una evidente respuesta (magnitud de coeficientes ondiculares) por parte del escalograma en las escalas 15, 30, 45 y 70, 105, 125 respectivamente (Figura 3.6.1) para el rango de profundidad correspondiente a los intervalos 5227-5248, 5618-5624, 5641-5643 y 5737-5745 metros respectivamente.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- La producción que se reporta para este pozo es de 544 MMscf de gas acumulado y 1.3 MSTB de aceite acumulado (Hardage, 1995).
- El análisis de escalogramas nos indica que las frecuencias se encuentran entre 8 y 38 Hz, lo cual supone espesores de capa de 90 metros en el caso de mayores escalas y 14.5 metros para el rango de menores escalas. Ya para este pozo y tomando en cuenta los antes analizados se puede observar que por resolución sísmica se tienen arenas que producen en el orden de 6 a 30 metros en espesor, lo cual supone una alta variabilidad con lo que el resultado de los escalogramas se justifica en cuanto a su amplio contenido de frecuencias.
- Sin embargo, este pozo produjo en arenas de 6, 21, 2 y 8 metros para los intervalos antes mencionados, lo que nos indica que la resolución sólo nos permitirá ver completamente la arena de 21 metros debido al contenido de frecuencia. En este caso si queremos visualizar arenas de menor espesor, es necesario utilizar otra ondícula que nos lo permita.

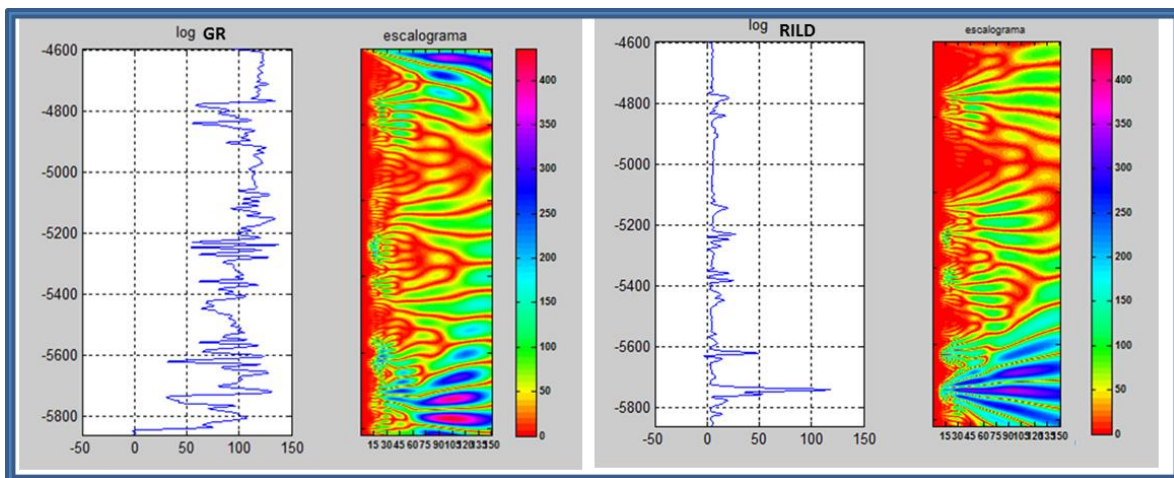


Figura 3.6.1. Muestra los registros del pozo Billy Yates 15 con sus respectivos escalogramas generados mediante la aplicación de transformada Ondicular Continua.

Finalmente, se procedió a la reconstrucción de la señal obteniendo los registros procesados como producto final (Figura 3.6.2).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

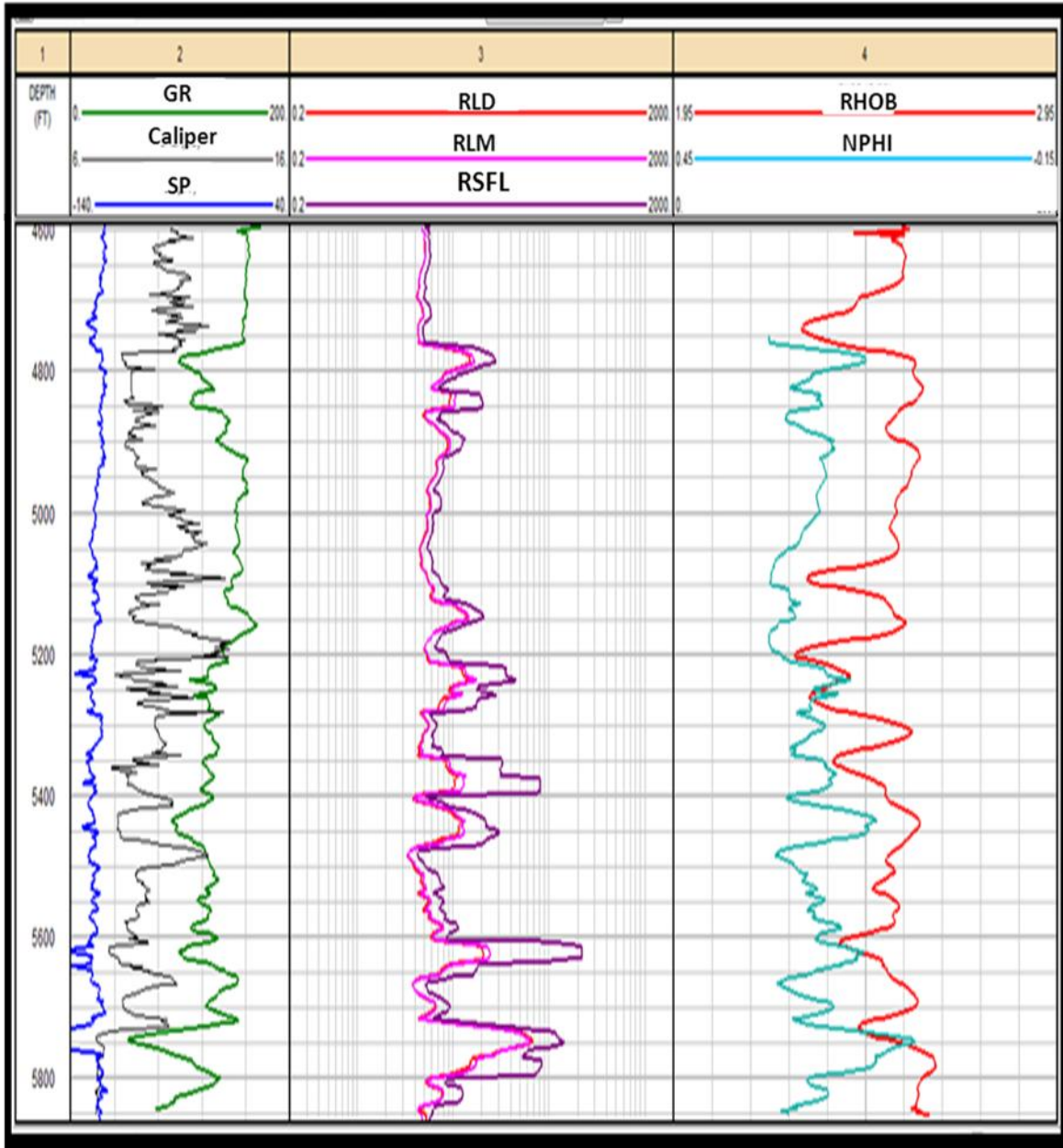


Figura 3.6.2. Registros resultantes de la aplicación de la Transformada ondicular al pozo Billy Yates 15.

3.7. Billy Yates 11.

Para el pozo BY11 cuya localización se muestra en la figura 3.4, se tienen los registros de pozo mostrados en la Figura 3.7, a los cuales se les aplicó la

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

transformada ondicular continua y se observó a partir del análisis de escalogramas lo siguiente:

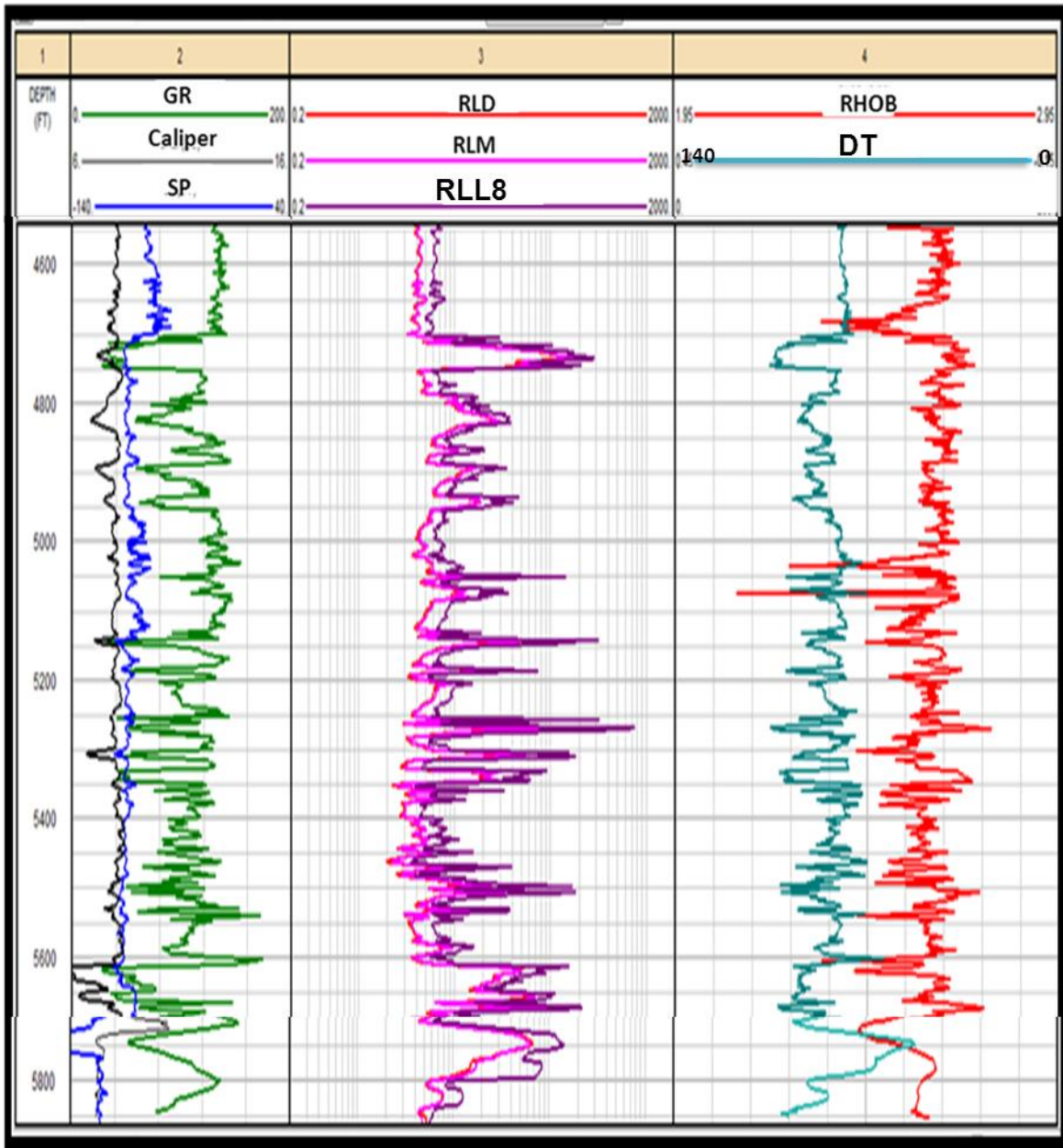


Figura 3.7. RGP para el pozo BY11.

- En los registros sísmicos, rayos gamma y resistividad, se logra observar una evidente respuesta por parte del escalograma en las escalas 15, 30, 45 y 70 y 90

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

respectivamente (Figura 3.7.1) para el rango de profundidad correspondiente a 5618-5623 metros.

- Dicha respuesta es consistente con los datos de producción para este pozo, cuyos valores fueron de 899 MMscf de gas acumulado.
- Debido a los rangos de frecuencias entre los 12 y 38 Hz, los cuales suponen espesores de capa de 70 metros en el caso de mayores escalas y 14.5 metros para el rango de menores escalas, no es posible observar espesores por debajo de 14.5 metros como es el intervalo para el que produce este pozo a nivel de sísmica. Nuevamente si se requiere ver esta información es necesario utilizar una ondicula que nos permita ver espesores de esta magnitud.

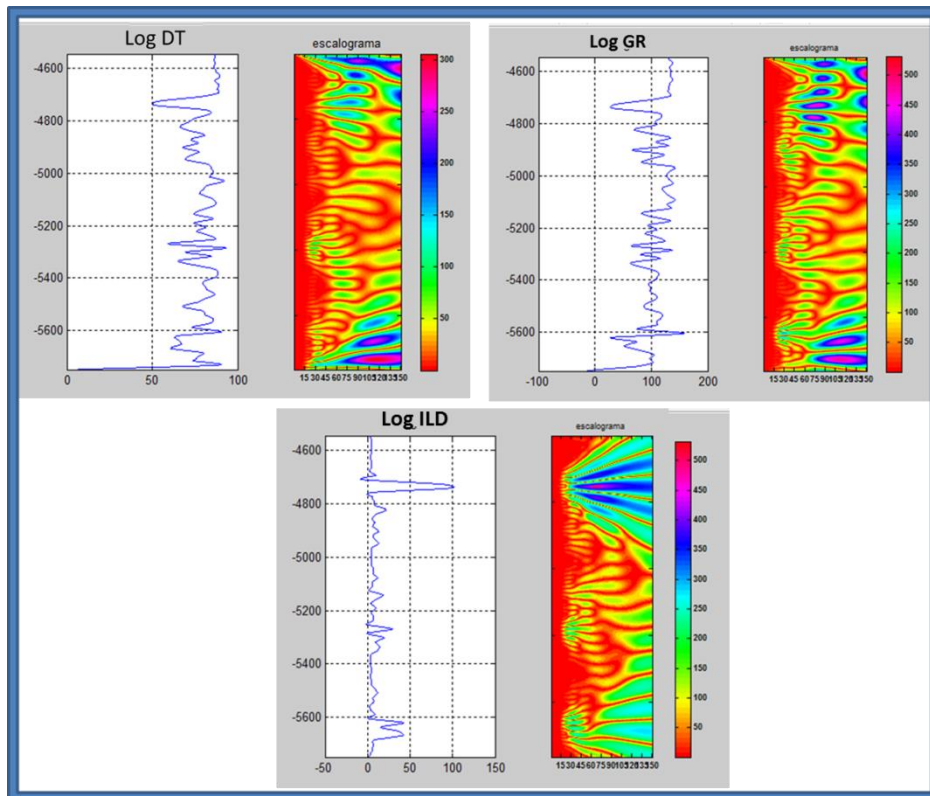


Figura 3.7.1. Muestra los registros del pozo Billy Yates 11 con sus respectivos escalogramas generados mediante la aplicación de transformada Ondicular Continua.

Finalmente, se procedió a la reconstrucción de la señal obteniendo los registros procesados como producto final (Figura 3.7.2).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

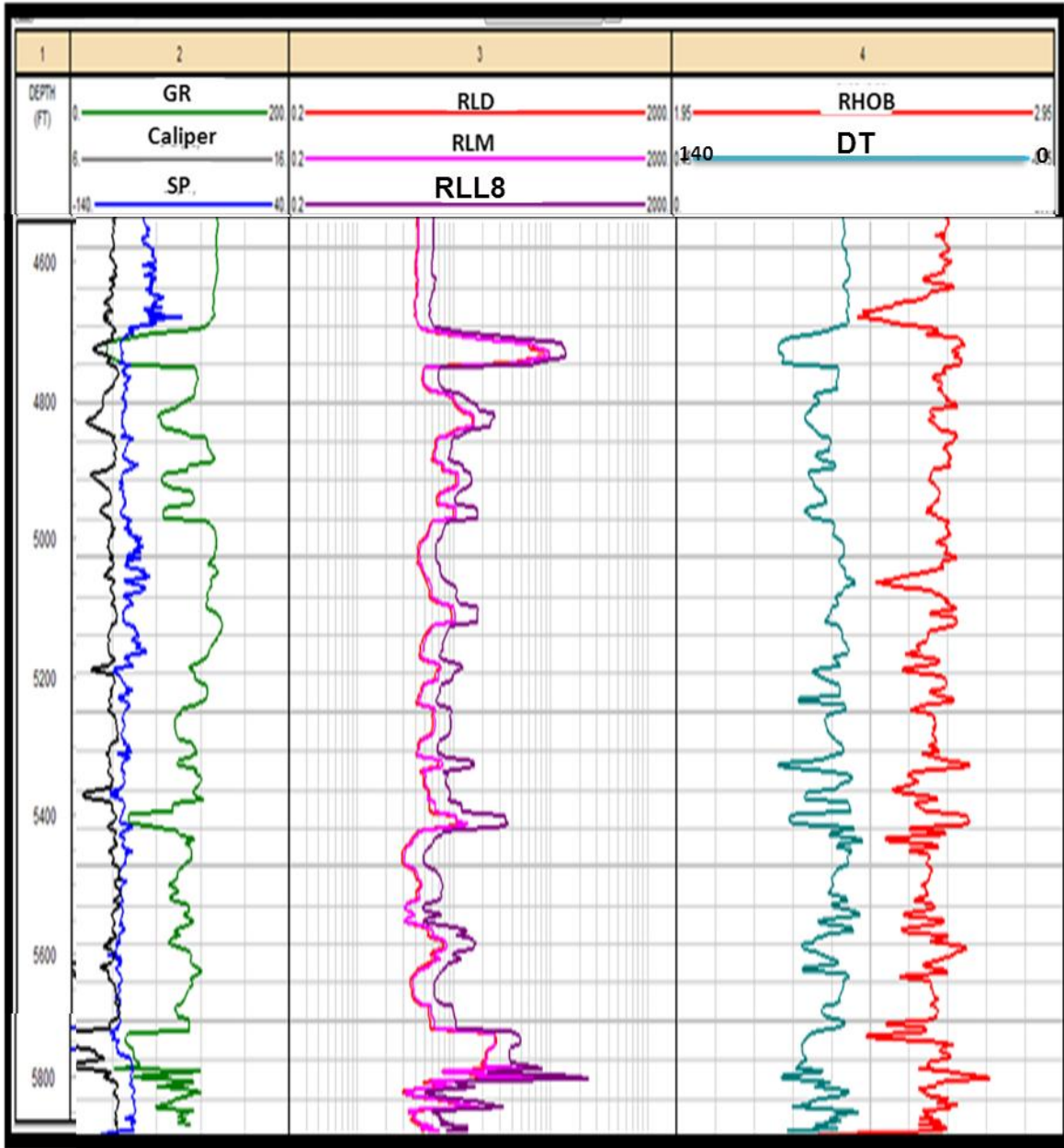


Figura 3.7.2. Registros resultantes de la aplicación de la Transformada ondicular al pozo Billy Yates 11.

3.8. Cap Yates 9.

Finalmente para el pozo CY9 cuya localización se muestra en la Figura 3.4, se tienen los registros de pozo mostrados en la Figura 3.8, a los cuales se les aplicó

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

la transformada ondicular continua y se observó a partir del análisis de escalogramas lo siguiente:

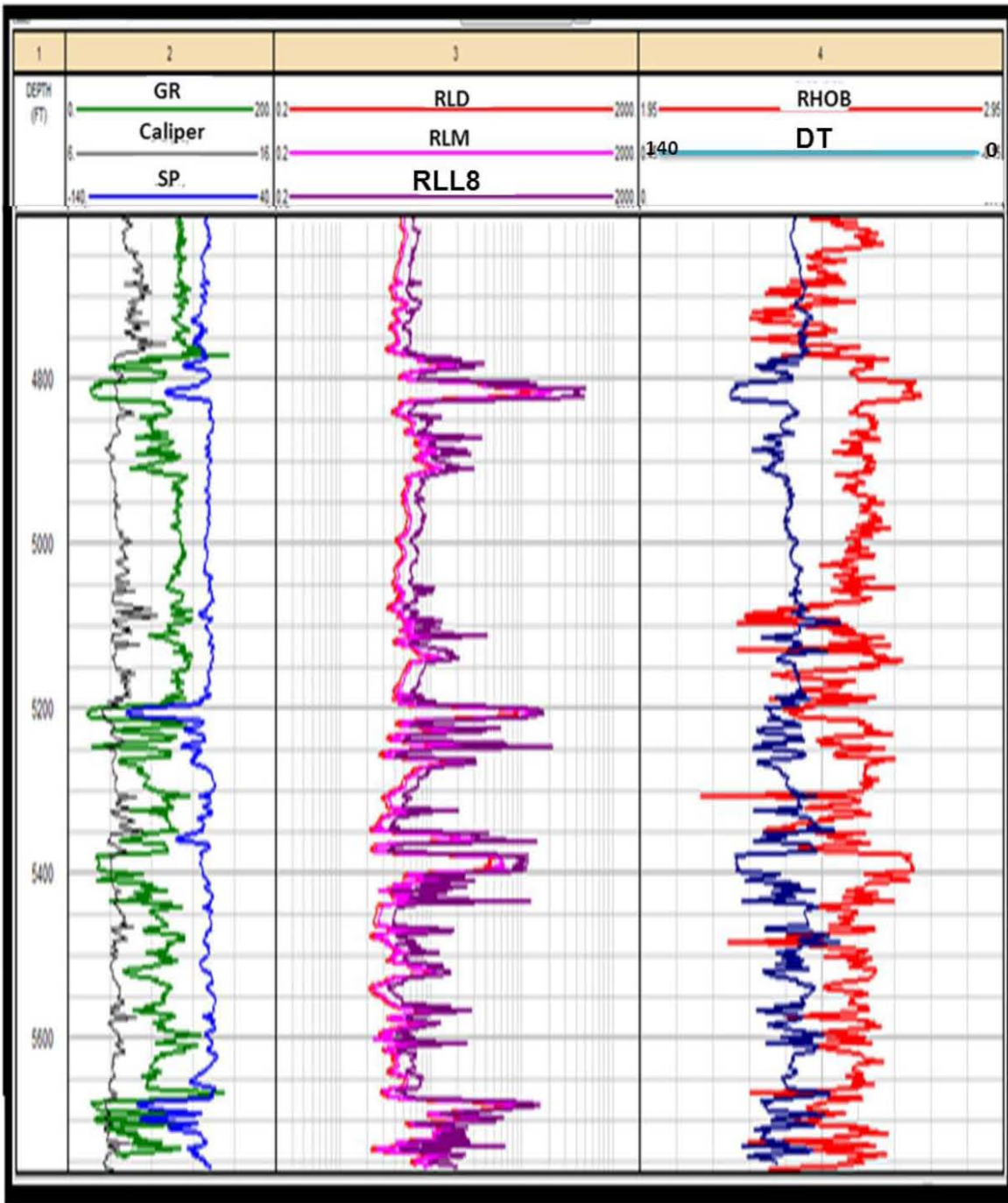


Figura 3.8. RGP para el pozo CY9.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

- En los registros sínicos, rayos gama y resistividad, se logra observar una evidente respuesta por parte del escalograma en las escalas 15, 30, 45 y 70 y 90 respectivamente (Figura 3.8.1) para el rango de profundidad correspondiente a los intervalos 5206-5210 y 5686-5701 metros respectivamente.
- Dicha respuesta es consistente con los datos de producción para este pozo, cuyos valores fueron de 2110 MMscf de gas acumulado (Hardage, 1995).
- Nuevamente se observan frecuencias en el rango de 12 a 38 Hz con lo que no sería posible resolver espesores de capa como en los que produce este pozo.

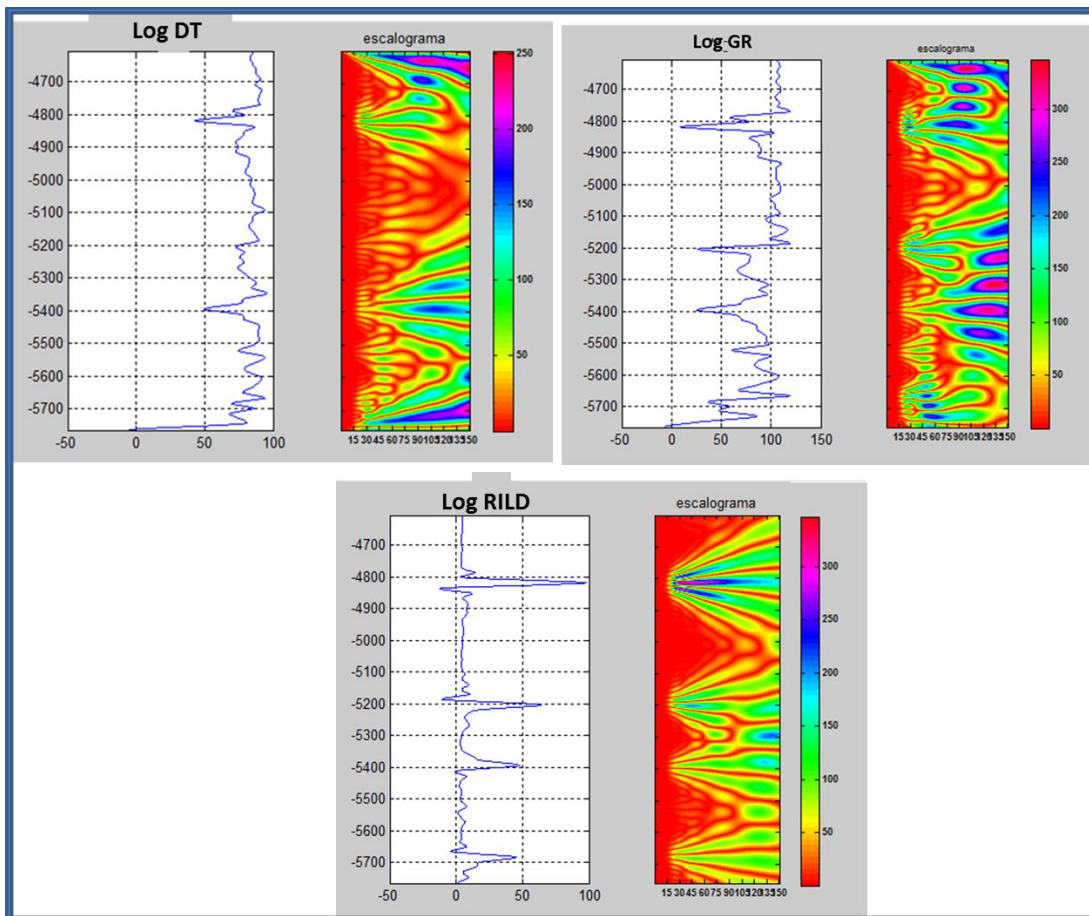


Figura 3.8.1. Muestra los registros del pozo Cap Yates 9 con sus respectivos escalogramas generados mediante la aplicación de transformada Ondicular Continua.

Finalmente, se procedió a la reconstrucción de la señal obteniendo los registros procesados como producto final (Figura 3.8.2).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

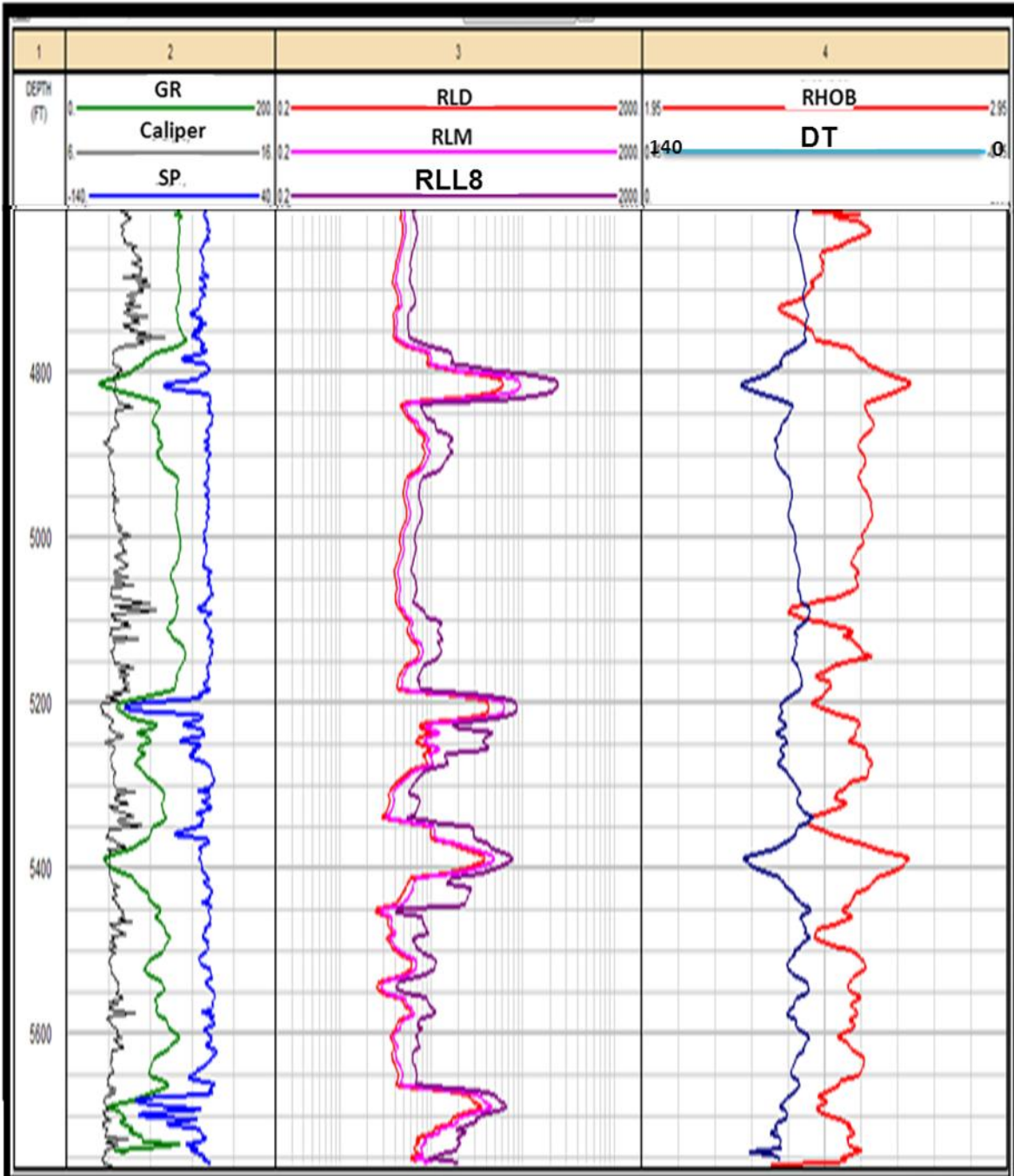


Figura 3.8.2. Registros resultantes de la aplicación de la Transformada ondicular al pozo Billy Yates 11.

Tal como se observa en el análisis anterior, el contenido de frecuencias que muestran respuesta a la impregnación de hidrocarburo no precisamente será correlacionable con la sísmica en tanto esta última carezca de la resolución

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

adecuada para que se de dicha correlación, por lo tanto es necesario analizar en qué grado la transformada ondicular puede resolver el problema de caracterizar las zonas de interés de una manera adecuada.

Finalmente, ya que se han procesado e interpretado los RGP mediante transformada ondicular, en los siguientes puntos (4 y 5) se verá la aplicación de la FFT a datos de sísmica de reflexión para un campo en México y la aplicación de la transformada ondicular para el área considerada en este estudio (campo Boonsville Texas) respectivamente, con el objetivo de ver la diferencia entre cada una de las técnicas, y así poder confirmar las ventajas de la transformada ondicular sobre la transformada de Fourier.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

4. Aplicación del atributo de descomposición espectral mediante FFT.

Con el objetivo de comparar la transformada ondicular con la FFT, se procedió al mapeo e implementación de la FFT de un canal visto en la sísmica procedente de un campo de México. El proceso es descrito a continuación:

Se llevó a cabo el mapeo de un paleocanal de aproximadamente 140 m² de área y 2 m de ancho (Figura 4.1) para una zona al sureste de México. La sísmica que se tiene presenta una resolución vertical máxima de 15 metros, lo cual permite visualizar mediante la aplicación de atributos sísmicos el desarrollo del paleocanal.

El paleocanal que se desea caracterizar mediante la aplicación de atributos sísmicos, muestra una geometría sinuosa con desarrollo meándrico, lo que permite observar planicies de inundación, barras de crecimiento, zonas de diques, entre otras.

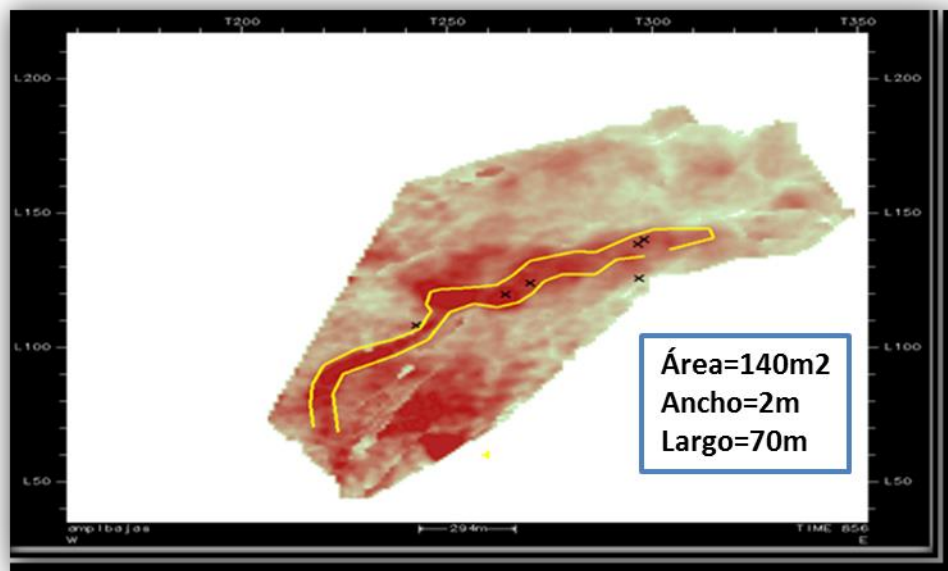


Figura 4.1. Dimensiones del canal sobre un horizonte de arena previamente mapeada.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Debido a las dimensiones del canal en relación a la resolución sísmica es permisible mediante el uso de atributos sísmicos, definir cada una de las geometrías y rasgos del paleocanal.

Los atributos aplicados fueron: intensidad de reflexión, amplitud, máxima amplitud negativa y por último descomposición espectral.

La metodología utilizada fue la siguiente:

1. Interpretación de cima correspondiente a la arena.
2. Aplanado del horizonte de la arena.
3. Aplicación del conjunto de atributos sísmicos.

De lo anterior, se dio seguimiento de la arena con entrada negativa con base en el cambio de impedancia acústica, recordando que al encontrarnos en un ambiente fluvial, se buscaba poder seguir el horizonte que respondía a la amplitud relacionada para dar una interpretación óptima del mismo.

Posteriormente, se llevó acabo el aplanado del horizonte, ya que se pretendía llevarlo a un punto temporal para el cual la descripción geométrica del canal discriminara la contribución del echado, dado que esto afectaba desde el punto de vista de la visualización sísmica. Para este fin se tomó una ventana de tiempo para el acotamiento de la arena y se llevó al nivel de referencia intermedio de la misma hacia un tiempo t , en el que se logró observar el canal en un mismo tiempo.

Una vez realizado el aplanado del horizonte, se aplicó una pareja de atributos, intensidad de reflexión y máxima amplitud negativa respectivamente, los cuales nos resaltaron la geometría del canal y distribución del mismo (Figura 4.2).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

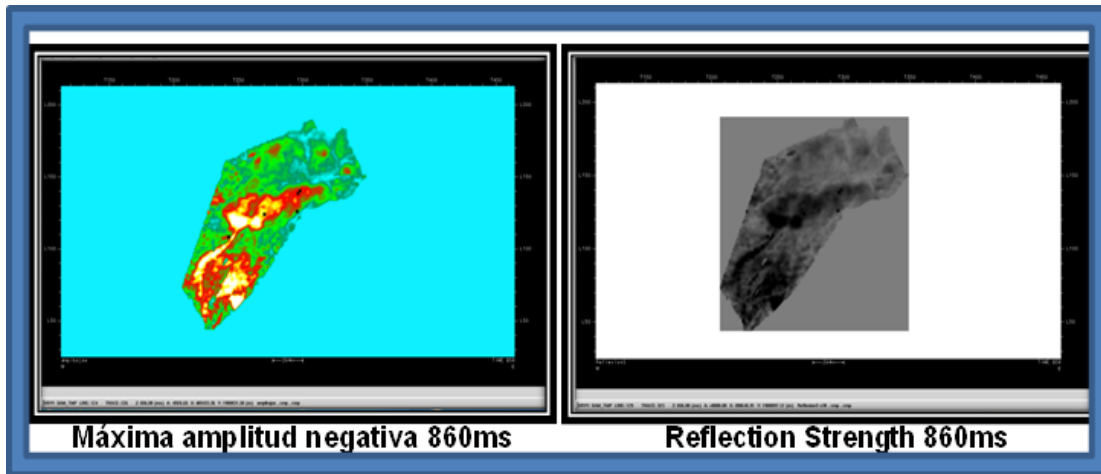


Figura 4.2. Atributos aplicados de intensidad de reflexión y máxima amplitud negativa. En ella se muestra el canal delimitado por el contraste de amplitud y reflexión.

Una vez aplicados los dos atributos mencionados arriba, se logró visualizar el canal y con información de pozos cercanos se analizó la respuesta de Registros de Pozo, para corroborar junto a los datos sísmicos la geometría del canal. Los datos de Registros de Pozo muestran una respuesta en la continuidad de la arena (Figura 4.3) caracterizada por la respuesta de resistividad alta, la cual denota consistencia con los registros de resistividad en donde existe la presencia de anomalías de amplitud que pudiesen estar relacionadas con hidrocarburo.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

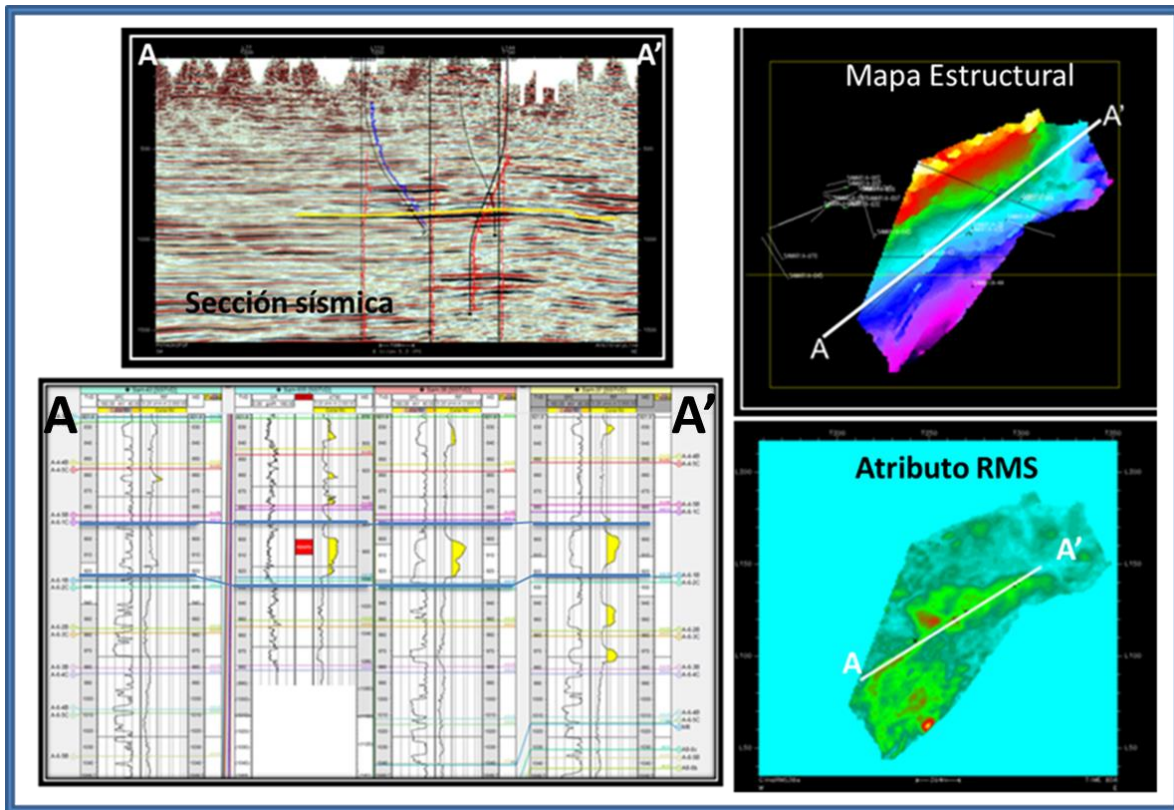


Figura 4.3. Muestra el horizonte interpretado (esquina superior derecha), sección sísmica con los pozos a través del perfil AA' y sus correspondientes registros (esquina inferior izquierda) y finalmente una sección mostrando la continuidad de la arena interpretada.

Un dato importante que dan los registros es que en todos los pozos que quedan a la orilla de los límites del canal o que salen de sus límites, su respuesta en resistividad muestra valores bajos; recordando que el registro de resistividad muchas veces indica anomalías que pudiesen estar relacionadas con hidrocarburos. Por su parte todos aquellos pozos que contactan al canal presentan una respuesta considerable en el registro de resistividad (resistividad alta).

Finalmente, se aplicó el atributo de descomposición espectral que de manera resumida lo que hace es descomponer la señal en un rango de banda de frecuencias, con lo cual se observan aquellas frecuencias que mejor describen la

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

geometría del canal y estén asociadas a la distribución del mismo. Una vez tomadas las frecuencias de interés, se realiza una reconstrucción con el aporte de dichas frecuencias. En este caso se observaron tres frecuencias que resaltaban el canal (20, 32 y 40 Hz) (Figura 4.4).

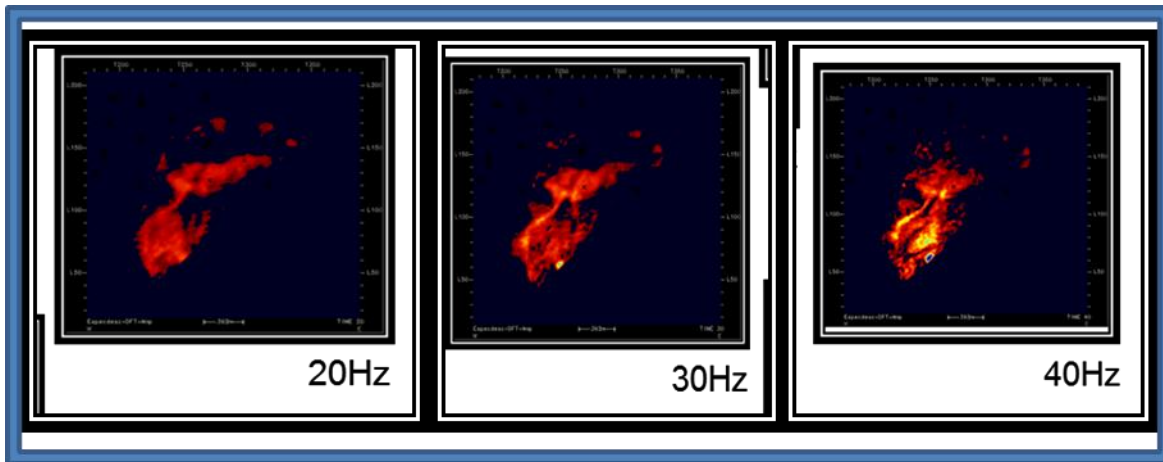


Figura 4.4. Resultado del análisis de descomposición espectral, nótese la definición del canal y sus características para cada rango de frecuencias.

Al aplicar la reconstrucción se logró definir el canal y con la aportación de datos de pozos cercanos la delimitación e interés del mismo (Figura 4.5).

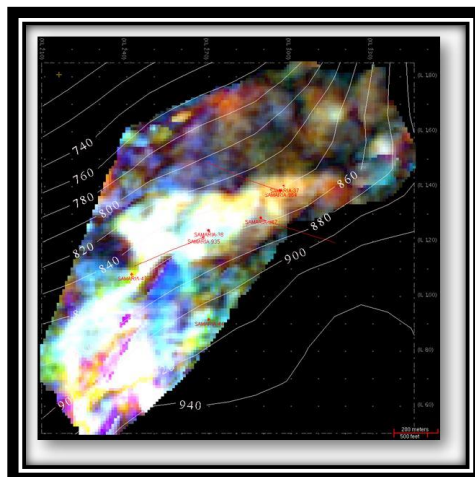


Figura 4.5. Reconstrucción espectral con la contribución de las frecuencias de 20 (rojo), 32(verde) y 40 Hz (azul) respectivamente.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

A manera de conclusiones, se ha observado que la FFT permite ver el aporte de frecuencias relacionadas a la distribución de un cuerpo de arena con probable impregnación de hidrocarburos, sin embargo existen varias desventajas descritas a continuación:

Debido a que la FFT es aplicada en una ventana de tiempo y se lleva a cabo la descomposición en varias bandas de frecuencias por cada traza sísmica (considerando un intervalo de tiempo de 750ms a 800 ms), el aporte de frecuencias no permite describir el canal ya que Fourier trabaja con señales estacionarias y como la traza sísmica es de carácter multicomponente, no es posible definir los cambios de frecuencia con respecto al tiempo.

En este caso de estudio el canal tiene un echado aproximado de 35 grados por lo que la variación de frecuencia es muy evidente a lo largo de la ventana utilizada, generando así, problemas en la definición del canal por la gran redundancia que presenta la FFT (Figura 4.6), lo cual sería resuelto con la aplicación de transformada ondicular.

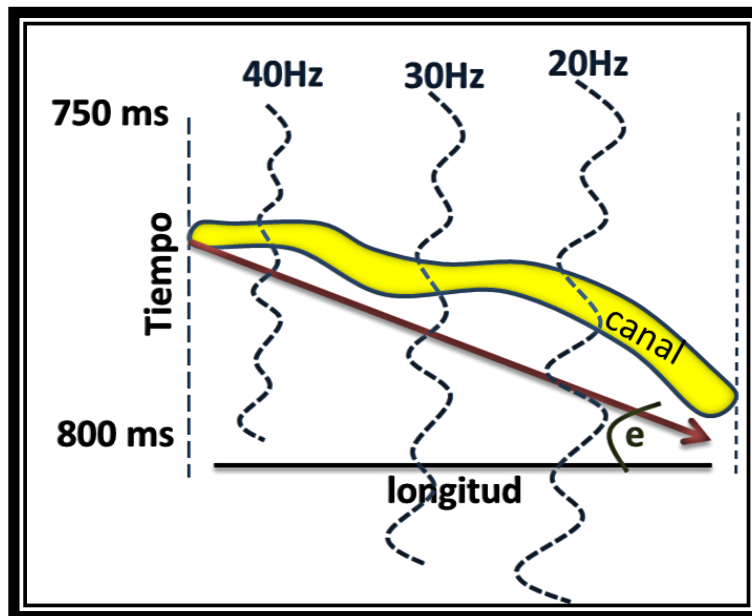


Figura 4.6. Muestra el canal con echado e y las frecuencias asociadas a la definición del mismo.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

5. Aplicación de la Transformada ondicular discreta como atributo sísmico.

Una vez mostrada la desventaja de la FFT, en este punto se presenta la aplicación de la transformada ondicular para solucionar dichas limitantes. En este caso se utilizarán los datos sísmicos del campo Boonsville Texas.

Hoy en día uno de los mayores atributos sísmicos utilizados en la industria petrolera es la descomposición espectral, sobre todo cuando se pretende evidenciar la morfología de canales en sistemas de depósito fluvial.

Sin embargo como ya se ha mencionado con anterioridad, la técnica que se utiliza con mayor frecuencia es el análisis de Fourier, la cual ante la transformada ondicular tiene evidentes desventajas, siendo las más importantes la localización temporal y el análisis señal ruido. Es por ello que un ejercicio interesante es la comparación de las dos técnicas antes mencionadas.

En este trabajo se aplicó la transformada ondicular discreta a los datos sísmicos primero para la descomposición espectral y después para la reconstrucción de la información sísmica siguiendo el mismo criterio usado para los registros de pozo. Los detalles del procesamiento de la sísmica para la aplicación de la DWT se pueden consultar en González Flores (2013).

Lo primero que se llevó acabo fue la comparación en varias líneas sísmicas entre la transformada ondicular y la transformada de Fourier (Figura 5.1), donde se puede ver que se delinear mejor las anomalías en la descomposición por medio de la transformada ondicular continua utilizando la ondícula de Morlet

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

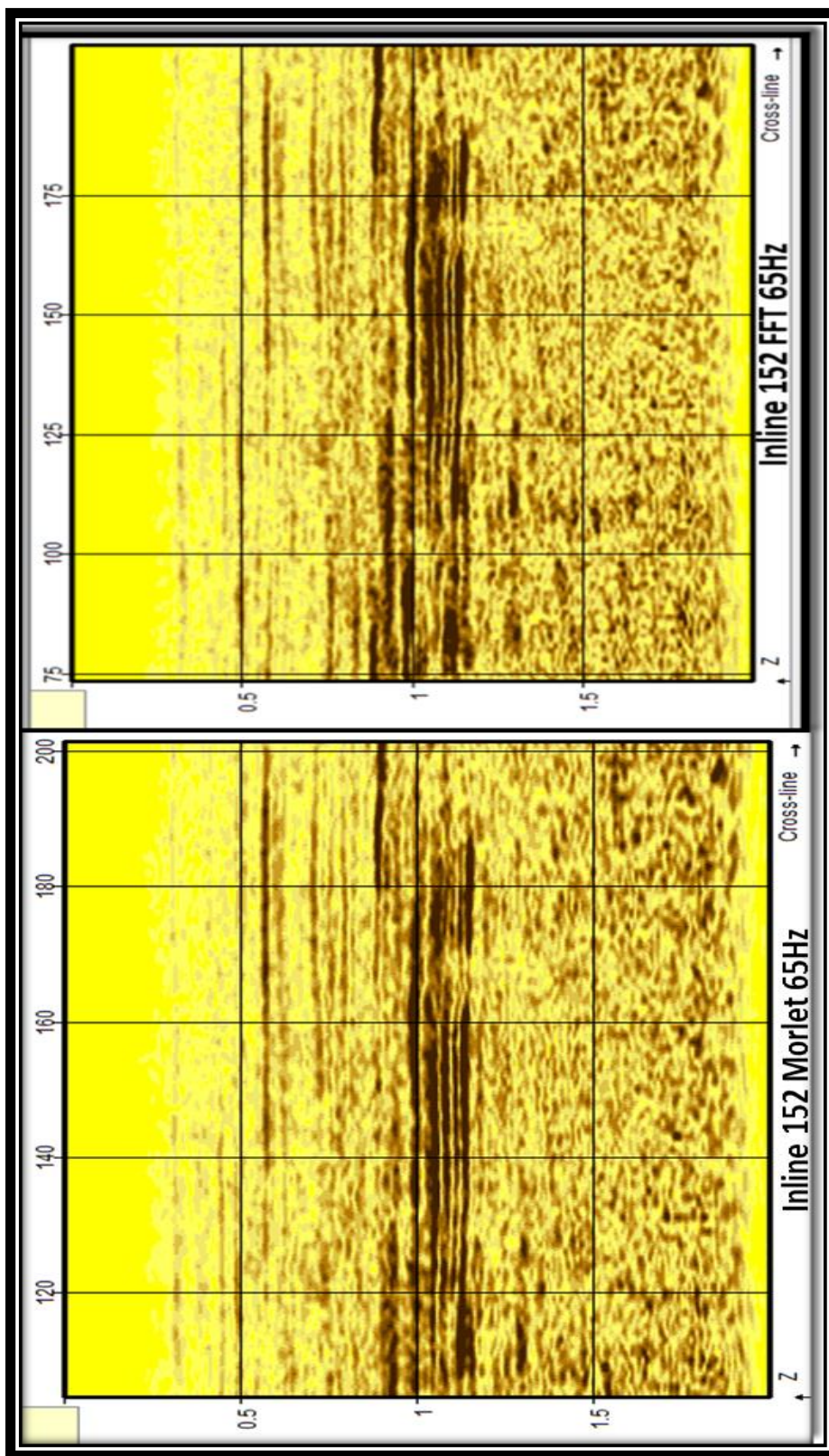


Figura 5.1. La figura muestra una comparación entre la transformada ondicular y la transformada de Fourier para la frecuencia de 65Hz. La ondícula utilizada en este caso es la de Morlet.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Es evidente, al observar la Figura 5.1, que la transformada ondicular tiene la ventaja de dar el contenido de frecuencia y la localización espacial en un mismo instante, lo cual no sólo permite delinear los cuerpos de mejor forma si no que es posible observar cambios laterales y verticales para las diferentes anomalías sísmicas.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

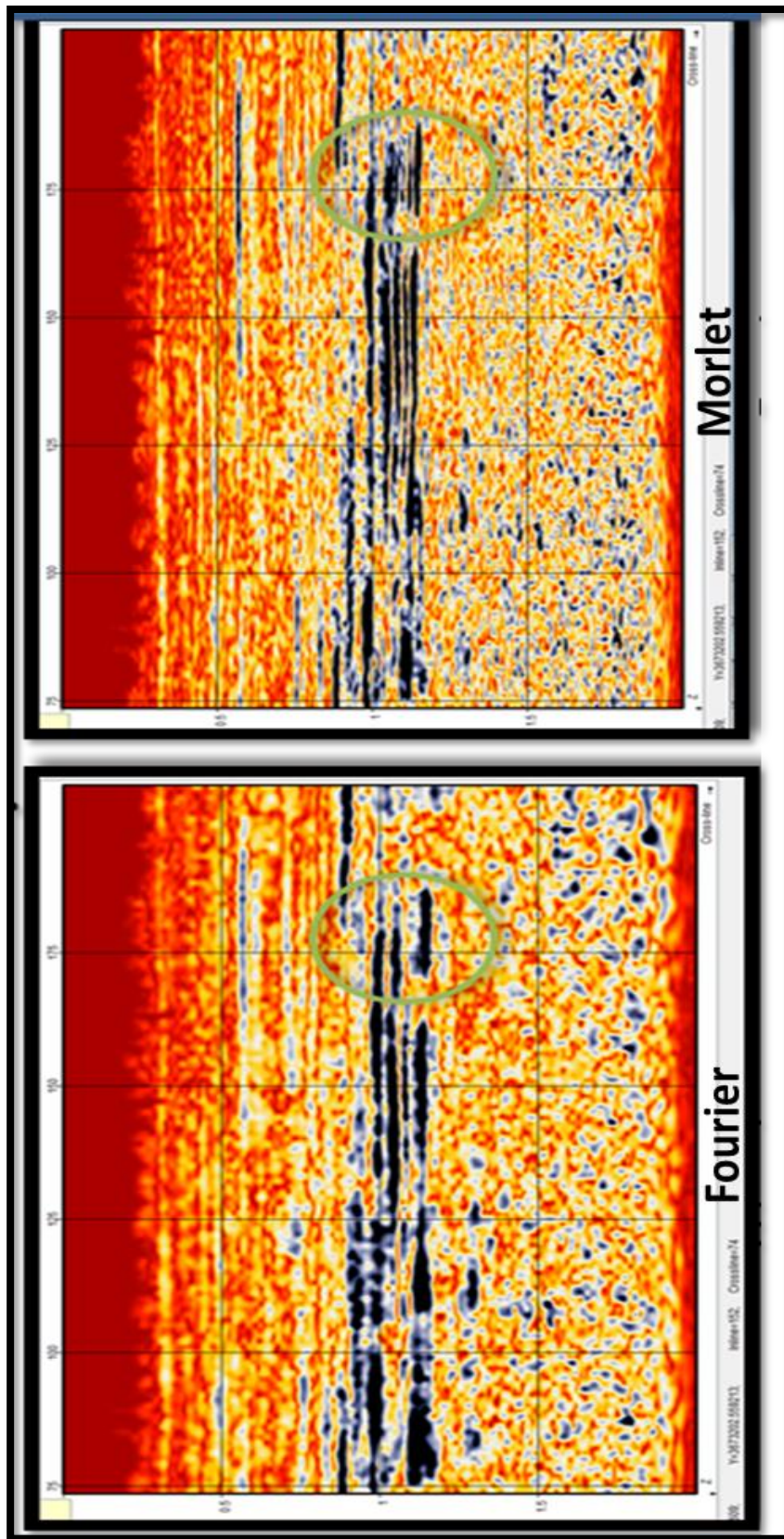


Figura 5.2. Comparación a 35 Hz para la traza sísmica 74 entre transformada wavelet y de Fourier. Se observa en el círculo verde una evidente diferencia.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Otra de las ventajas de la transformada ondicular es que se pueden visualizar capas delgadas en cuerpos de arena y discriminarlos de cuerpos sobrepuestos aprovechando al máximo la resolución sísmica (Figura 5.2).

Una vez dilucidadas las ventajas de aplicar la transformada ondicular, se procedió a la calibración del atributo aplicado con base a la respuesta de registros geofísicos de pozo y datos de producción, para ello se efectuó la evaluación petrofísica de los pozos y así poder ver probables zonas de interés y como estas respondían al atributo de descomposición espectral usando el método de transformada ondicular. De lo anterior se observó que las anomalías sísmicas coincidían con zonas de interés como resultado del procesamiento de registros de pozo (evaluación petrofísica).

Tal como lo muestra la Figura 5.3, los intervalos de interés (marcados con un círculo rosa) fueron obtenidos mediante la evaluación petrofísica del pozo Billy Yates 15 y se observa que de los cuatro intervalos (a profundidades de 1595, 1711, 1720 y 1750 respectivamente) solo el intervalo cuya profundidad corresponde a 1595 metros coincide con la anomalía sísmica, lo anterior es debido a que la resolución aun aplicando descomposición espectral mediante la transformada de Fourier no permite observar intervalos por debajo de 13 metros.

Además, cabe mencionar que aun cuando las anomalías parecen de gran rango en tiempo, la evaluación evidencia que dicha respuesta también es producto de la presencia de caliza, por lo que el conocimiento del campo será muy importante siempre que se quiera hacer una óptima interpretación del mismo.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

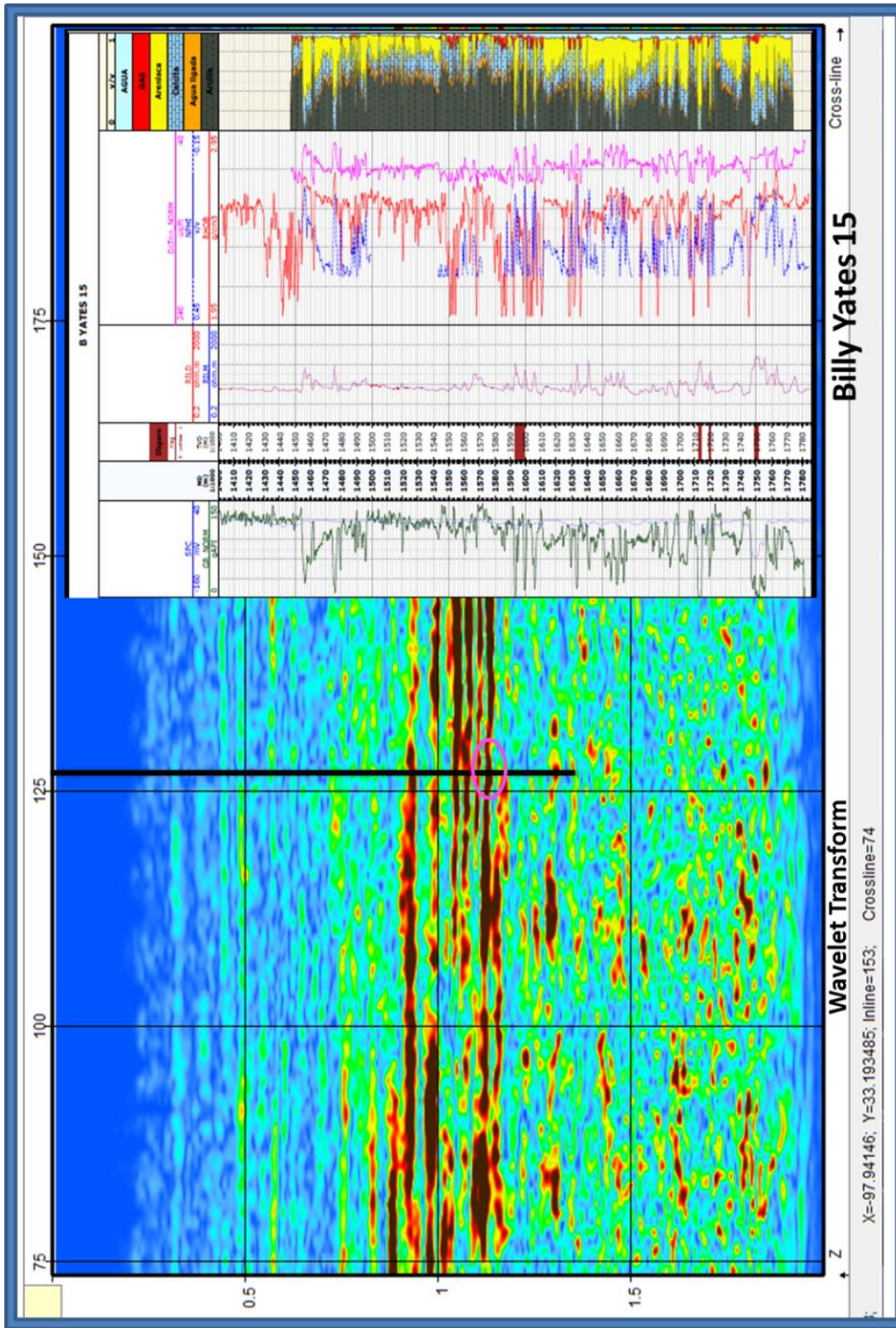


Figura 5.3. Aplicación de la transformada ondicular para la descomposición espectral y análisis para el pozo Billy Yates 15.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

De igual forma la Figura 5.4 permite observar que para el intervalo de interés (1730m) en el pozo Billy Yates 13, donde se observa presencia de gas, hay una correspondencia en respuesta con la anomalía sísmica arrojada por la transformada ondicular continua. Por otro lado, la Figura 5.1, en donde se aplicó Fourier no muestra respuesta que se pueda correlacionar con los resultados de pozo.

Un punto de gran importancia que es posible observar en la sísmica, es que existen anomalías de mayor energía por encima del intervalo de interés, sin embargo no significa que sean debido a presencia de gas, simplemente son probables respuestas sísmicas a la litología de la zona, ya que hay que recordar que tal como lo muestra la evaluación petrofísica existe intercalación de arenisca y caliza.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

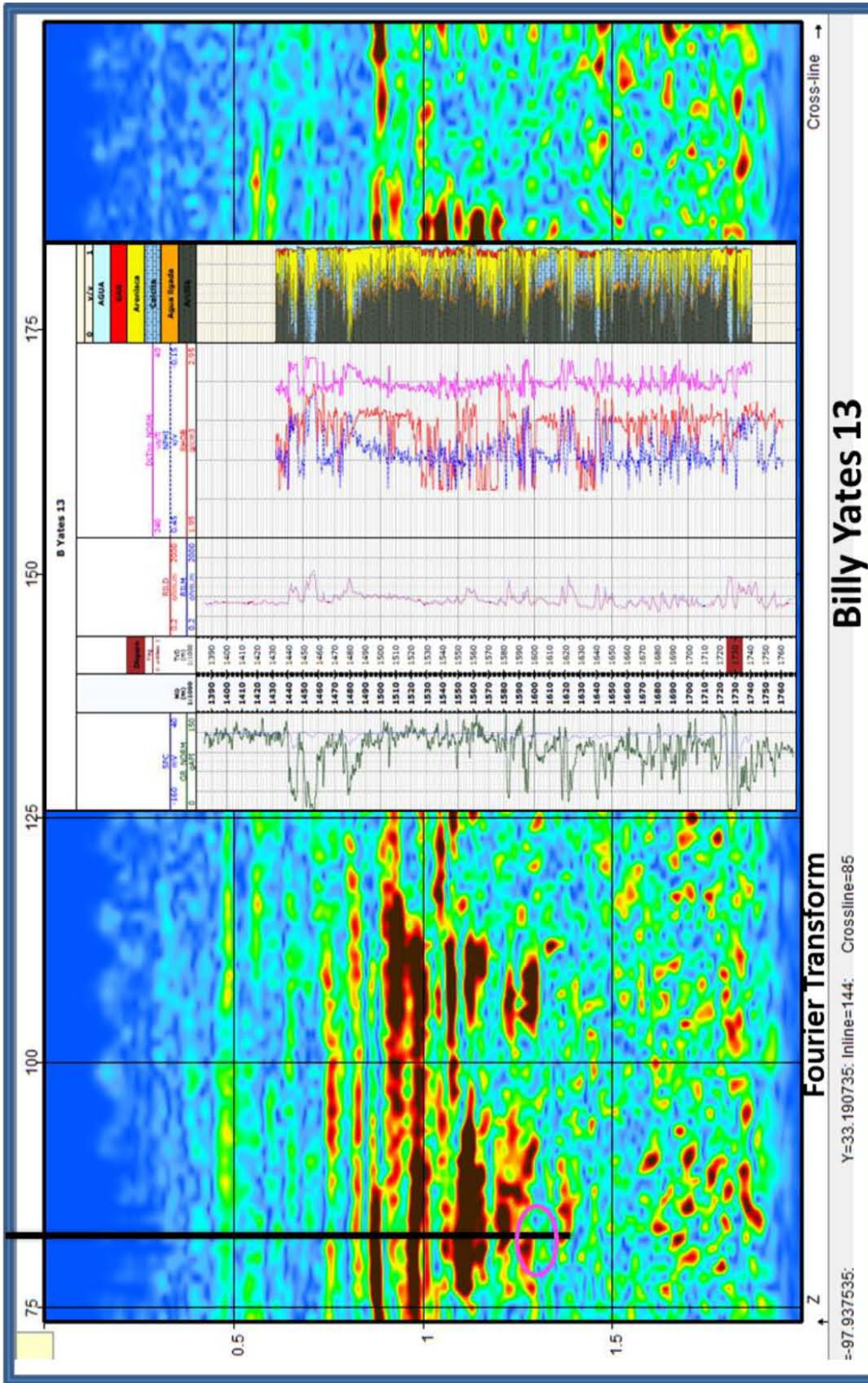


Figura 5.5. Aplicación de la transformada de Fourier (65 Hz) para la descomposición espectral y análisis del pozo Billy Yates 13.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Otro pozo de gran importancia como resultado de la transformada ondicular fue el Billy Yates 18D (Figura 5.6), en este caso sólo se logró ver el intervalo marcado en la figura con un círculo rosa que correspondía a 1621 metros, nuevamente la resolución y complejidad geológica tuvo gran influencia en la respuesta del atributo sísmico. Sin embargo se observa que existe un intervalo a la profundidad de 1720 metros donde la evaluación petrofísica ve un cuerpo de arenisca bien desarrollado con probable impregnación de gas, el cual en la sísmica es bien delineado y aun cuando no existen datos de producción para dicho intervalo no se descarta la posibilidad de que sea explotable; quizás habría que ver si algún otro pozo ya estaba drenando ese intervalo y por esta razón no se disparó para explotar este cuerpo de arenisca.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

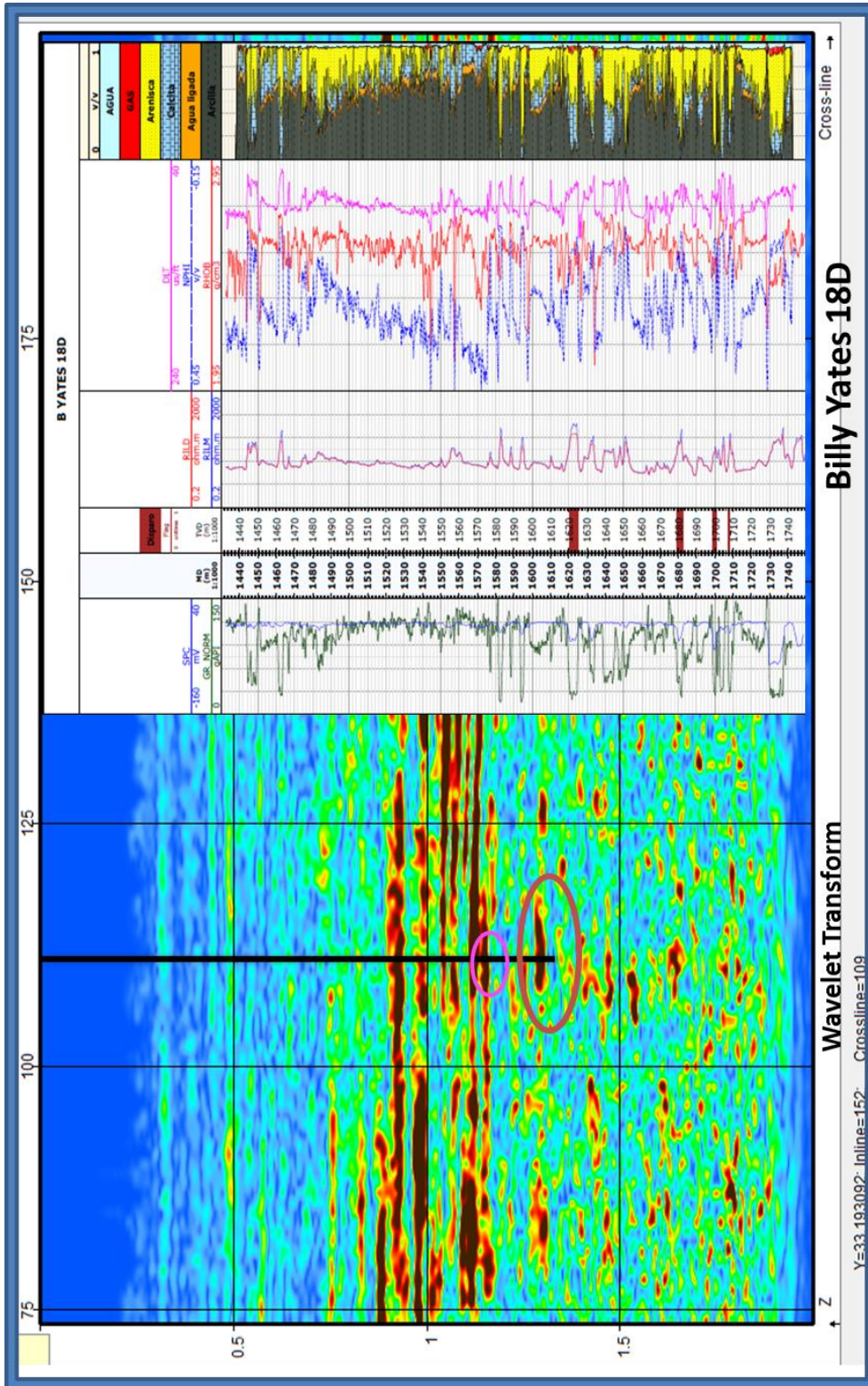


Figura 5.6. Muestra el análisis mediante transformada ondicular continua para el pozo Billy Yates 18D.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Para el análisis del pozo Billy Yates 11 hay varias cosas que son muy interesantes:

Primero observamos que para el intervalo de interés que indica presencia de gas (evaluación petrofísica) que se muestra marcado con círculo rosa en la Figura 5.7, existe una respuesta del atributo sísmico.

Segundo, para el intervalo marcado con un círculo color marrón (Figura 5.7) se observa después de analizar los resultados de petrofísica, que corresponde a un cuerpo calcáreo; lo anterior refuerza el hecho de que si bien el atributo de descomposición espectral mediante transformada ondicular permite delinear cuerpos de arena con probable impregnación de hidrocarburo, también es indicador de aquellos relacionados a la presencia de caliza.

Lo anterior es bastante lógico si se piensa que el contraste de frecuencias está relacionado a: litología, fluidos y arcillosidad, y que al caracterizar el área de estudio la descomposición espectral permitirá delinear cuerpos y discriminar entre ellos, pero no precisamente nos dará zonas exactas con impregnación de hidrocarburos pero si probables zonas donde se encuentre el mismo.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

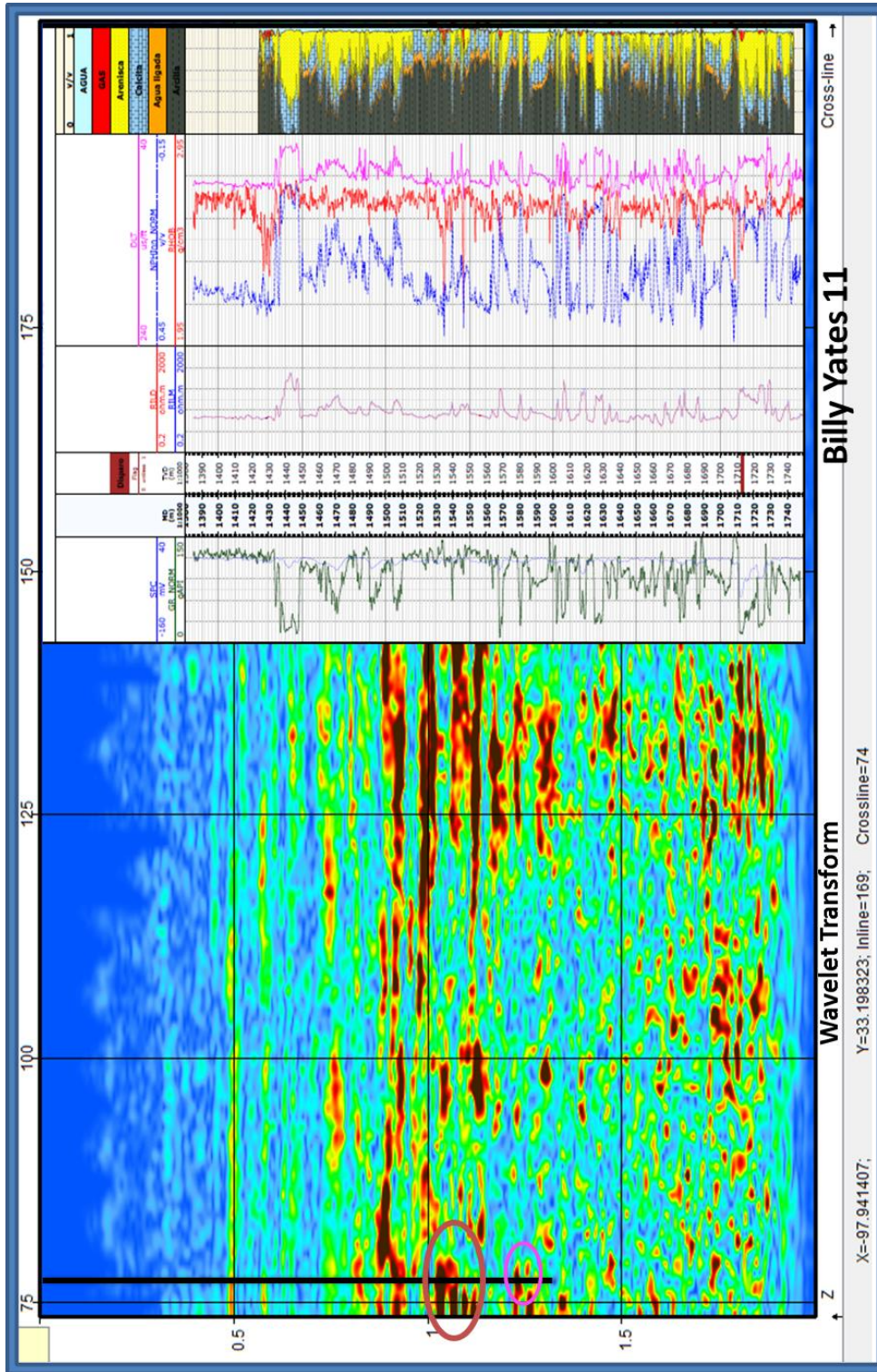


Figura 5.7. Muestra el análisis para el pozo Billy Yates 11. La zona marcada con círculo rosa indica el cuerpo de arena a 1710 metros y el círculo color marrón indica el cuerpo de caliza a la profundidad de 1440 metros.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

De los pozos hasta ahora analizados y tomando como referencia el Billy Yates 11, es posible comenzar a pensar que el análisis de frecuencias se debe hacer por separado con datos de pozos observando la respuesta en frecuencia para las areniscas y posteriormente para las calizas; esto permitirá caracterizar la zona con mayor precisión. Además cabe mencionar que en este análisis se observó que la frecuencia que mejor representaba las anomalías sísmicas expuestas correspondía al rango de frecuencias de 50 a 65 Hz.

La Figura 5.8 muestra el análisis para el pozo Cap Yates 9 para cubrir los cinco pozos expuestos en este trabajo de tesis, en ella se observa que para el intervalo de interés con impregnación de gas hay una respuesta sísmica asociada, lo que indica que nuevamente el atributo sísmico da resultados importantes.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

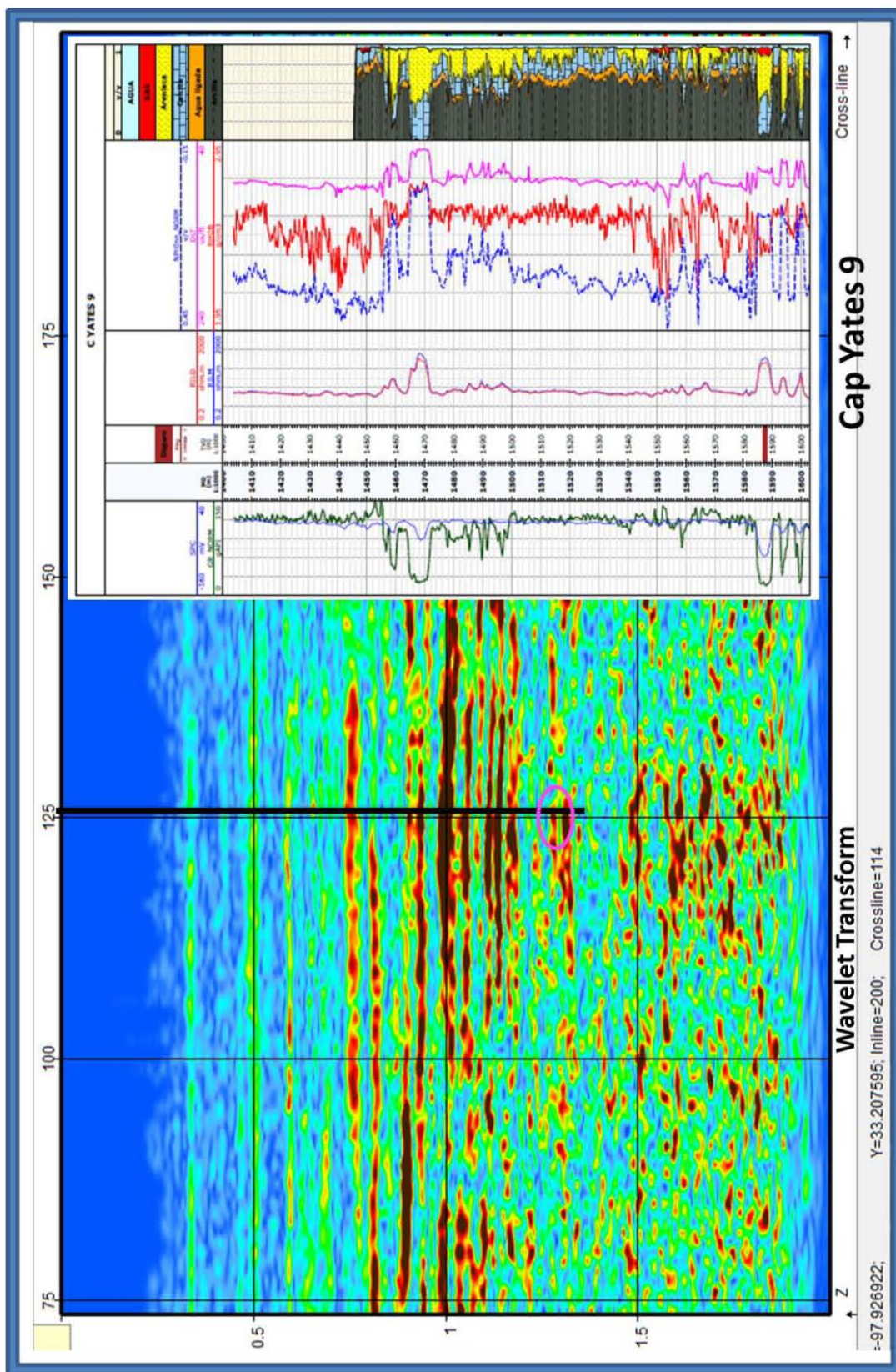


Figura 5.8. Análisis para el pozo Cap Yates 9.

6. Análisis Mediante Transformada Ondicular Discreta.

Hasta ahora se ha visto la aplicación de la transformada ondicular y sus ventajas, sin embargo sólo se ha tomado una frecuencia para mostrar como calibra nuestro atributo con la sísmica y el realce de las características litológicas de los datos sísmicos. Pero es importante que también se muestre el resultado de descomponer, analizar y elegir las escalas o frecuencias para posteriormente reconstruir la señal sísmica y poder resaltar las características de interés. Para ello se utilizó la transformada ondicular discreta, la cual muestra ventajas importantes sobre la transformada ondicular continua (Figura 6.1), una de las cuales es que permite una mejor delineación y definición de anomalías.

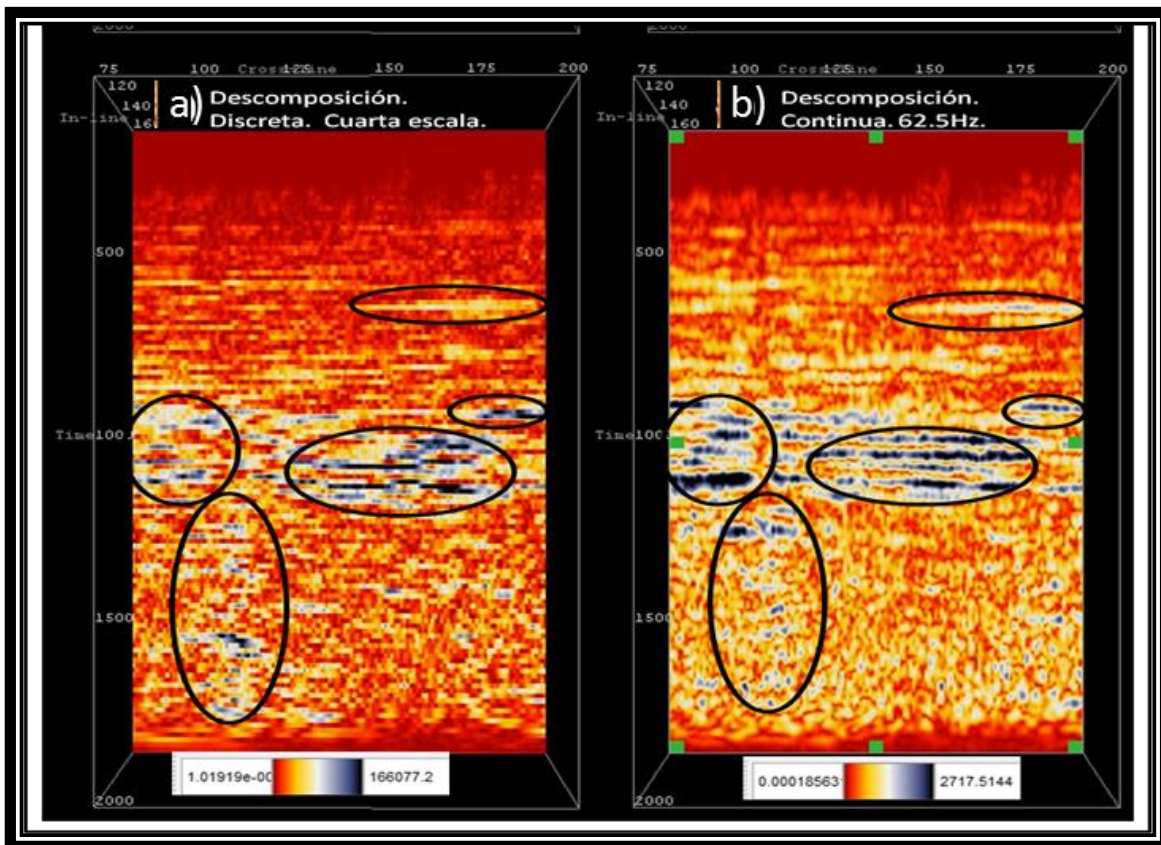


Figura 6.1. Línea sísmica 161. La imagen a) muestra la descomposición a la cuarta escala utilizando transformada Ondicular Discreta utilizando Daubichies y

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

en b) se muestra su correspondencia para una frecuencia de 62.5 Hz utilizando transformada ondicular continua usando Morlet.

Por lo anterior, se procedió a la descomposición espectral utilizando DWT según el flujo mostrado en capítulos anteriores (González-Flores, 2013) y se analizó el comportamiento de anomalías para cada una de las líneas y trazas.

Finalmente se eligieron las escalas predominantes con base al resalte de anomalías sísmicas y se efectuó la reconstrucción sísmica.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

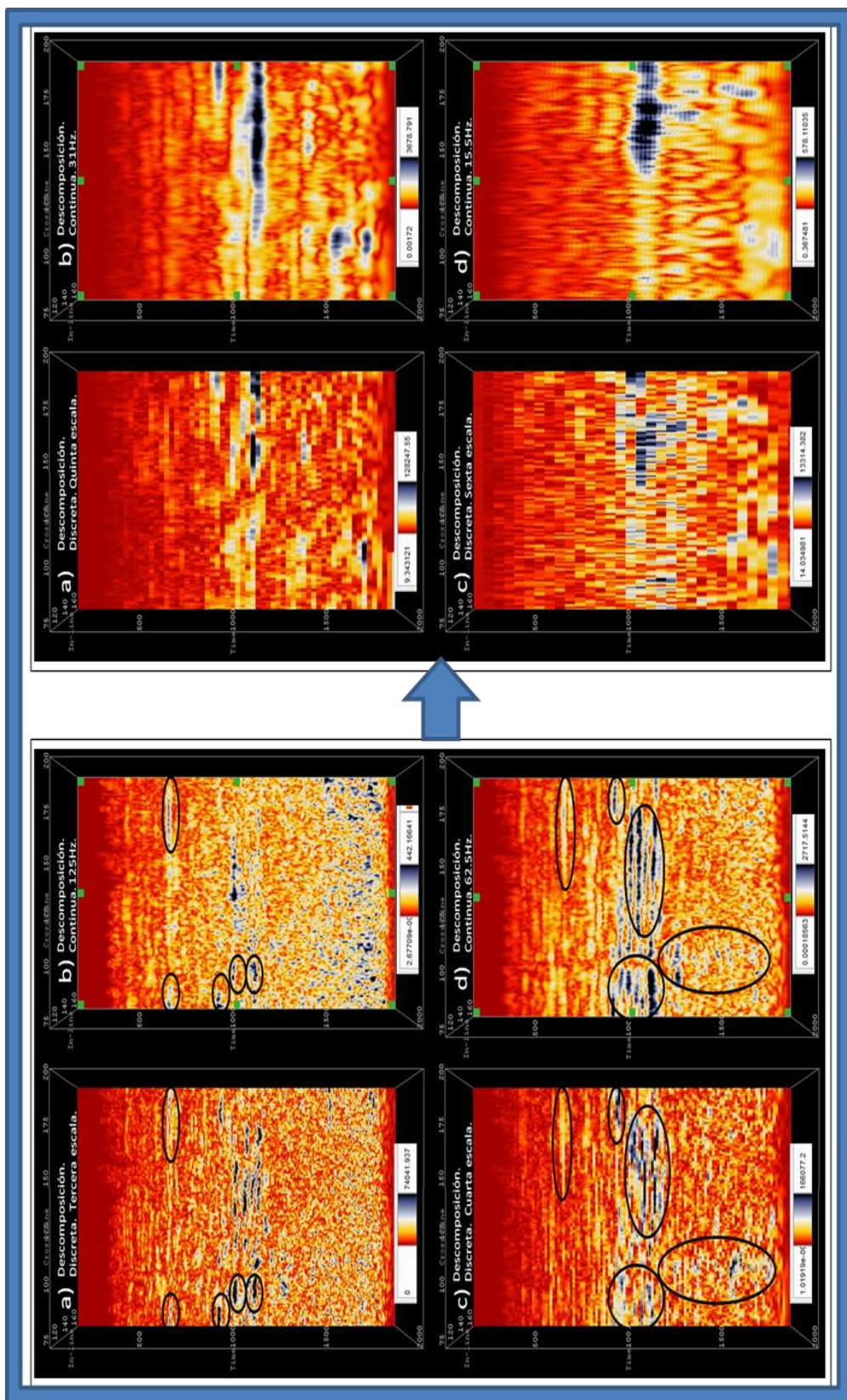


Figura 6.2. Muestra el resultado de la descomposición espectral, observando en la figura izquierda la descomposición discreta a una tercer y cuarta escala, las cuales corresponden a 125 y 62.5 Hz en la descomposición continua. Por su parte la figura de la derecha muestra la descomposición discreta a quinta y sexta escala correspondientes a 33 y 15.5 Hz para la continua.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Tal cómo se observa en la Figura 6.2, la DWT es una herramienta poderosa, no sólo porque reduce el tiempo de procesamiento sísmico, sino también porque permite delinear y definir con mayor precisión las anomalías que evidentemente están relacionadas a zonas de interés petrolero.

Cabe mencionar que con base en el análisis de escalas se eligieron para la reconstrucción las escalas 4 y 5, recordando que si bien existe una correspondencia entre escala y frecuencia, las primeras comparten un rango de las segundas, lo cual dice que al elegir 2 escalas no se eligen únicamente 2 frecuencias sino un rango de las mismas.

Por su parte la Figura 6.3 muestra la aplicación de transformada ondicular en todo el cubo de Boonsville para una frecuencia de 65 Hz y la comparación de utilizar un modelo de inversión generalizado mediante redes neuronales (Chen, 1996); puntualizando que la transformada ondicular se muestra en este caso para una rebanada de tiempo y la que representa el modelo de inversión es el resultado final, sin embargo para ese tiempo la transformada ya muestra características muy similares.

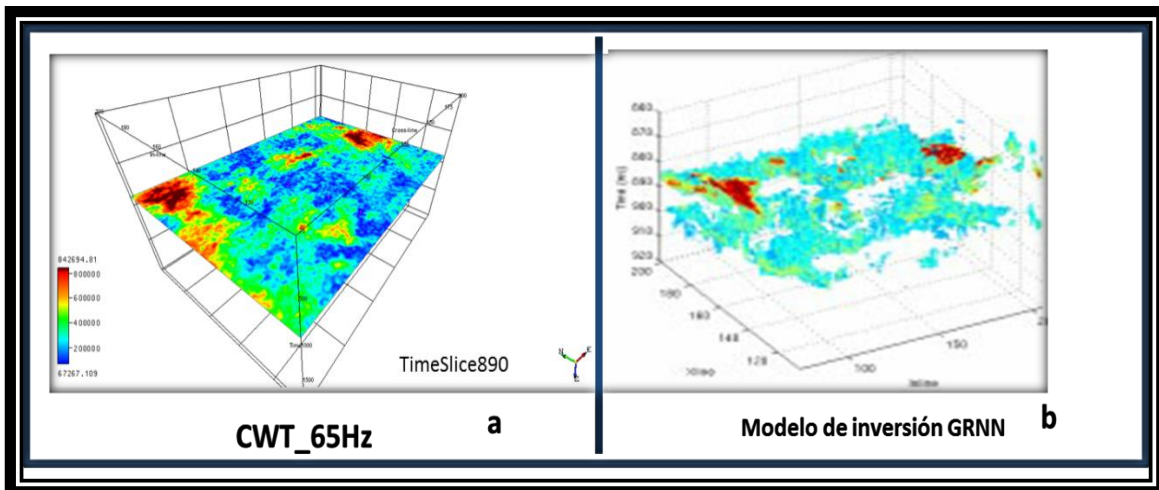


Figura 6.3. La figura muestra: a. Una rebanada de tiempo a 890 ms con el atributo de descomposición espectral usando CWT en 65 Hz y b. Resultado del modelo de inversión generalizado mediante redes neuronales.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Se observa que la transformada ondicular continua delinea cuerpos relacionados a facies sísmicas que en el área de Boonsville corresponden a cuerpos de ambientes deltaicos, en donde es posible observar que para una escala correspondiente a la frecuencia de 65 Hz (Figura 6.3), el delineamiento de cuerpos es bastante evidente.

Ahora bien si se lleva a cabo una comparación de respuesta de atributo tal y como se muestra en la Figura 6.3 donde se observa una relación en respuesta entre la transformada ondicular y el modelo de inversión utilizando redes neuronales es posible ver que la transformada ondicular muestra facies que calibradas con información de pozo podrían delimitar cuerpos relacionados a posible impregnación de hidrocarburo bajo las restricciones antes mencionadas en este trabajo.

Aquí, lo que se hace con el modelo de inversión mediante redes neuronales, es aplicar un filtrado pasa bajos a las componentes de valores de alta frecuencia de las impedancias obtenidas de registros de pozo en orden a sobre escalar la frecuencia sísmica con base a las frecuencias de pozo. La técnica de redes neuronales intenta construir una relación no-lineal entre los atributos sísmicos y la impedancia forzando el procesamiento para incorporar toda la información posible incluso si algo de esta información es ruido. En este caso se aplicó un filtro de alto corte de 120 Hz (máxima componente de frecuencia) a los registros de impedancia. Cuatro atributos básicos (amplitud, envolvente, fase instantánea y frecuencia instantánea) fueron usados como conjunto de entrada para la red neuronal. Un modelo convolucional fue aplicado a la mejor relación de estos atributos con la impedancia. Este operador convolucional fue consistente con el modelo geofísico y añadió más variables al vector de entrada, así mejorando la precisión de la red neuronal (Hampson et al., 2001).

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Así, al aplicar la transformada ondicular a una rebanada de tiempo de 890 ms se logra ver que las facies sísmicas coinciden con aquellas obtenidas del modelo de inversión antes descrito (Figura 6.4).

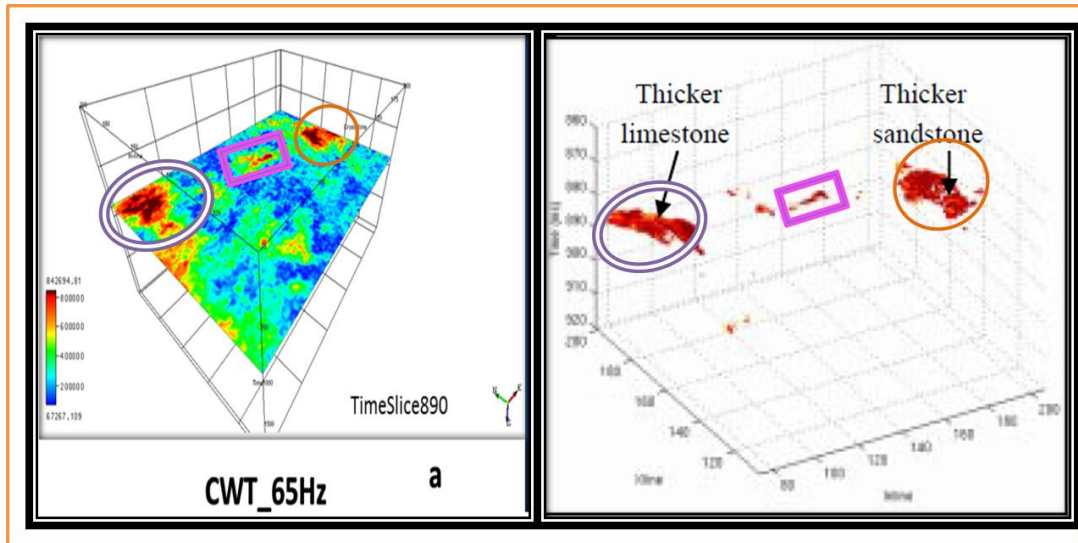


Figura 6.4. Comparación de facies entre la transformada ondicular (izquierda) y el modelo de inversión mediante redes neuronales (derecha).

Por otro lado, la Figura 6.6 nos muestra una última interpretación calibrada con datos de pozo para reforzar la interpretación de la descomposición espectral, en la cual podemos observar una sección sísmica 2-D con los datos originales y la interpretación final con el atributo aplicado. En esta parte de interpretación se tomaron en cuenta la respuesta de los registros según su electro-facies (Figura 6.5), con lo que fue posible identificar la distribución de anomalías y su relación con unidades mediante el manejo de los pozos analizados en esta tesis.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

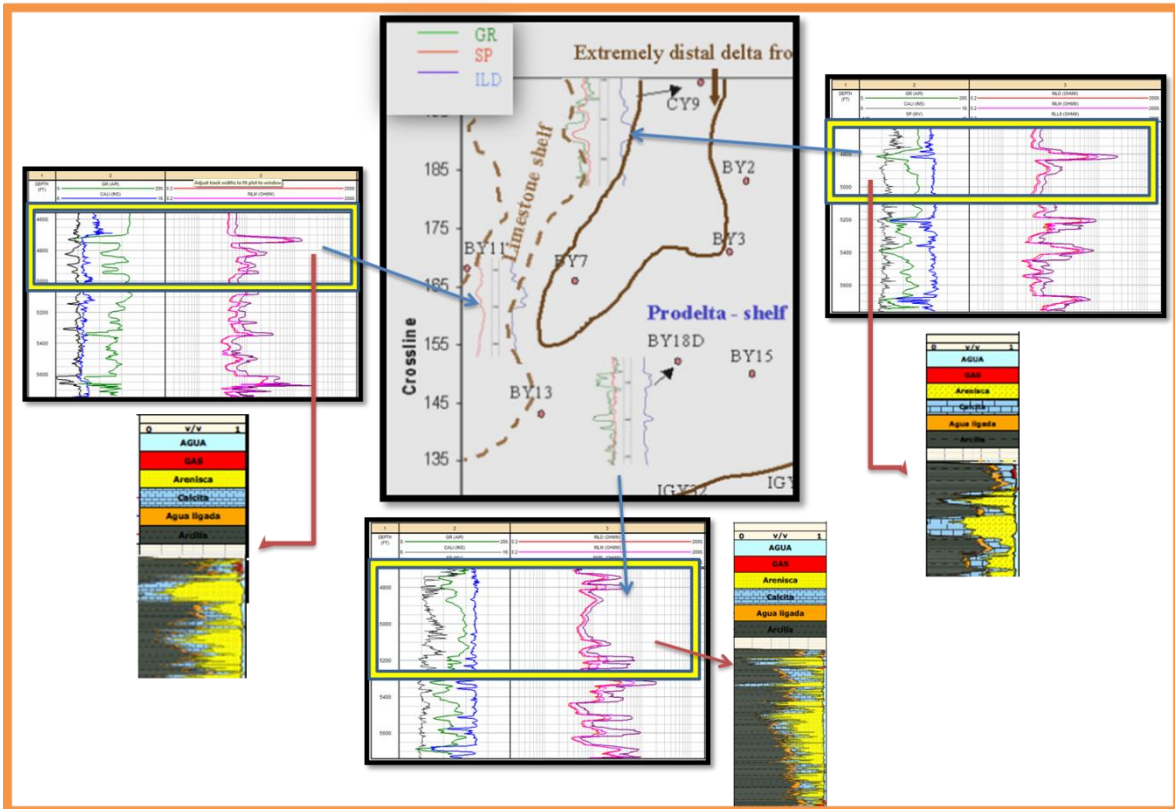


Figura 6.5. Muestra el análisis de electro-facies a partir de los registros de pozo. Al centro se puede observar cada una de las facies dentro de un sistema deltaico y la contribución de los pozos con su respuesta eléctrica y aquella como resultado del análisis mineralógico mediante la evaluación petrofísica.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

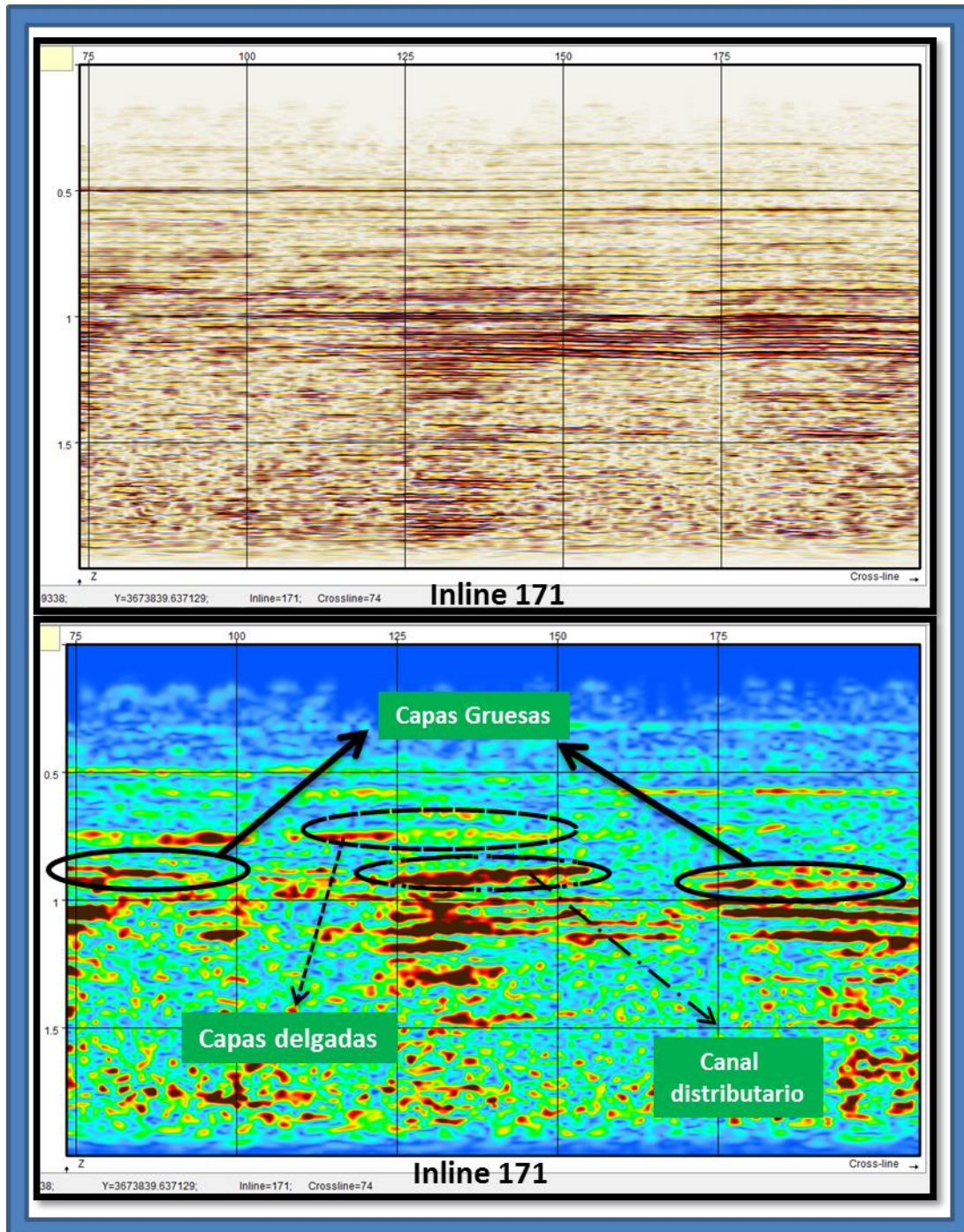


Figura 6.6. Muestra la interpretación final con datos sísmicos, de pozo (RGP) y la aplicación del atributo de descomposición espectral aplicando la ondícula de Daubichies reconstruida con el aporte de las escalas 4 y 5.

La Figura 3.43 evidencia facies que deben sin lugar a dudas de pertenecer a cuerpos de arena o caliza y que son distinguidos mediante su frecuencia pero sin

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

lugar a dudas también por medio de su energía, siendo las calizas las de mayor energía y las areniscas las de menor energía.

Finalmente, después de aplicar la DWT podemos puntualizar lo siguiente:

- Permite distinguir capas delgadas de aquellas de mayor espesor, así como facies interpretadas con el apoyo de registros de pozo (análisis de electro facies).
- Separar facies relacionadas con areniscas (roca almacén) que a su vez corresponden a posibles cuerpos impregnados de hidrocarburos.
- En primera instancia la energía vista como amplitud (anomalías de amplitud) son indicadores indirectos de hidrocarburo, las cuales al calibrarse con datos de pozo (RGP) y la evolución petrofísica reduce el grado de incertidumbre en identificación de zonas de interés petrolero.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Conclusiones.

La transformada ondicular aplicada al análisis de registros Geofísicos de pozo permite resaltar características que otras técnicas tales como la transformada de Fourier no pueden debido a que la primera utiliza funciones adaptativas que son correlacionales con funciones no estacionarias, las cuales son más comunes en el procesamiento de datos Geofísicos.

La transformada ondicular continua permite descomponer la señal a diferentes escalas y analizar su diferente contenido de frecuencia para un intervalo de interés en particular.

Mediante la transformada ondicular discreta es posible descomponer a la señal utilizando una función de escala y una función ondicular, con lo que se logra representar a la señal en términos de aproximación y detalle, permitiendo hacer un análisis más minucioso de los datos, con el que se puede discriminar ruido de señal de interés a nivel de detalle.

Este trabajo permitió en primer lugar descomponer a la señal de los registros de pozo, analizarla en diferentes rangos de frecuencias y elegir aquellas que mejor representaran las zonas con impregnación de hidrocarburos, con lo que utilizando la transformada ondicular discreta se reconstruyó a la señal con el aporte de frecuencias de interés y posterior a esto correlacionarlo con la información sísmica.

Se trabajó en la implementación de un programa para el análisis ondicular, mismo que fue realizado por el autor de esta tesis, con lo que se logró analizar la información, comprobando así la factibilidad de la técnica de transformada ondicular.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

La información obtenida de la descomposición espectral utilizando transformada ondicular permite establecer zonas relacionadas con facies de interés petrolero y delinear cuerpos relacionados a roca almacén.

Un probable discriminador entre cuerpos de arenisca y caliza después de aplicar la descomposición espectral puede ser la energía que presentan los cuerpos delineados por cierto rango de frecuencias.

Para una zona como la de Boonsville la aplicación del atributo de descomposición espectral mediante transformada ondicular discreta, continua, o ambos, facilitan la identificación de facies sísmicas relacionadas a zonas de interés petrolero.

La comparación con métodos como el de inversión mediante redes neuronales, refuerza la aplicación de la transformada ondicular y refleja su importancia en el análisis y caracterización de yacimientos petroleros.

El trabajo integral de la información de registros geofísicos de pozo y sísmica de reflexión permite conceptualizar un área de interés y adicionalmente si se implementa una técnica en común que permita relacionar un dato con otro, aumenta las probabilidades de disminuir el grado de incertidumbre acerca de un área en particular.

El análisis de electro-facies es importante para definir cuerpos que tengan relación a las facies sísmicas obtenidas mediante el análisis de descomposición espectral sin dejar a un lado el carácter geológico de la información.

El procesado y tratamiento de la señal de pozo puede encontrar una relación entre la sísmica de reflexión y la respuesta del registro del pozo, es decir, se puede enviar el registro geofísico de pozo a escala sísmica para que exista una correlación mayor.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Un análisis de impedancias a partir de los registros de pozo y la aplicación de la transformada ondicular, dará la clave para entender las anomalías presentes en el área de interés desde el punto de vista estratigráfico.

Todos los programas y metodologías en el tratamiento de datos geofísicos de pozo, fueron propuestos por el autor de esta tesis, demostrando su funcionalidad mediante los resultados de la misma.

Finalmente, para zonas de complejidad estratigráfica como la de Boonsville el análisis ondicular es una alternativa ampliamente aceptable.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Bibliografía:

Alzate E. y Branch B., 2006. Correlación de Registros entre pozos con redes neuronales artificiales utilizando múltiples curvas o variables registradas. Escuela de procesos y Energía. Facultad de Minas, Colombia, 87-99.

Backus, G. E., 1962. Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering, *J. Geophys. Res.*, 67(11), 4427–4440

C, Valens., 1999. *A Really Friendly Guide to Wavelets.*

Cary, P. and Upham, W., 1992. "An evaluation of neural networks." *The Leading Edge*, 11(9), 45–47.

Chambers, R. L. and Yarus, J. M., 2002, *Quantitative Use of Seismic Attributes for Reservoir Characterization.* Quantitative Geosciences, 1-22. Inc. Houston, Texas.

Chen, C., 1996. *Fuzzy logic and neural network handbook.* McGraw-Hill, Inc.

Coconi-Morales E, Ronquillo Jarillo y Campos-Enriquez J. O, 2010. Multi-scale analysis of well-logging data in petrophysical and stratigraphic correlation. *Geofísica Internacional.* 49 (2), 55-67.

Daubechies, I., 1992. Ten lectures on wavelets. Society for Industrial and Applied mathematics, vol. 61.

Donoho, D. L., Johnstone, I. M., Kerkyacharian, G. and Picard, D., 1993, *Wavelet shrinkage: Asymptopia* Technical Report. Department of Statistics, Stanford University.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

González Flores, E. 2013. Aplicación de la transformada ondicular al procesamiento e interpretación de sísmica de reflexión. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. U.N.A.M.

Goupillaud, P., A. Grossman and J. Morlet., 1984. Cycle-octave and related transforms in seismic analysis. *Geoexploration*, 23, 85-102.

Grossmann, A. R., Kronland-Martinet y J. Morlet., 1989. Reading and understanding continuous wavelet transform, in *Wavelets: Time-Frequency Methods and phase Space*, edited by J. Combes, A. Grossmann and P. Tchamitchian, 2-20, Springer-Verlag, New York.

Hampson, D., J. Schuelke, and J. Quirein., 2001. Use of multi-attribute transforms to predict log properties from seismic data: *Geophysics*, 66/1, 220-236.

Hardage, B. A., Carr, D. L., Finley, R. J., Lancaster, D. E., Elphick, R. Y. and Ballard, J. R., 1996. Secondary natural gas recovery: Targeted Applications for Infield Reserve Growth in Midcontinent reservoirs, Boonsville Field, Fort Worth Basin, Texas. Appendices. Topical Report, Volume 2, Gas Research Institute and Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin.

Jenkins and White., 1957. *Fundamentals of Optics*. McGraw Hill.

Kumar, P, and E. Foufoula-Georgiou., 1997. Wavelet analysis for geophysical applications, *Rev. Geophys.*, 35(4), 385–412.

Mallat, S. G., 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence.*, 11(7), 674-693.

Mallat, S. and W.L. Hwang., 1992. Singularity detection and processing with wavelets, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 38, 617-642.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

McCulloch and Pitts., 1943. A logical calculus of Ideas Immanent in Neurous Activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5, 115-133.

Rivera, N.A., S. Ray., Jerry L. Jensen., Andrew K., Chan and Walter B. Ayers., 2004. Detection of Cyclic Patterns Using Wavelets: An Example in the Ormskirk Sandstone, Irish Sea. Mathematical Geology, 36(5), 529-543.

Tanakov, Y. M., 1997. Integrated Reservoir description for Boonsville (Texas) field using 3-D seismic, well and production data. The University of Tulsa.

Taner, M., Koehler, F., and Sheriff, R., 1979. "Complex seismic trace analysis." *GEOPHYSICS*, 44(6), 1041–1063.

Taner, M. T., 2001. *Elastic waves in heterogeneous and porous media*, Geophysics, 21, 41-70.

Taner, M. T., Schuelke J. S., O'Doherty R., and Baysal., 1994, *Seismic attributes revisited: 64th Annual International Meeting Society of Exploration Geophysicist*. Expanded abstracts 94, 1104-1106.

Teti, J. G., Jr and H. N. Kritikos., 1992. "SAR ocean image representation using wavelets", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), 1089-94.

Thompson, D. M., 1982. Atoka Group (Lower to Middle Pennsylvanian), northern Fort Worth basin, Texas: Terrigenous depositional systems, diagenesis and reservoir distribution and quality: The University of Texas at Austin, Bureau of economic Geology Report of Investigations No. 125, 62 p.

Vidakovic, B. and Muller P., 1991. Wavelets for kids. Duke University. Paper 3-24.

Aplicación de la Transformada Ondicular al procesamiento e interpretación de Registros Geofísicos de Pozo.

Pennington, W., 2002. Calibration of Seismic Attributes for Reservoir Characterization. Department of Geological and Mining Engineering and Sciences, Michigan Technological University.

Zeng, H., 2009. "How thin is a thin bed? An alternative perspective." *The Leading Edge*, 28(10), 1192–1197.