



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

EXPLORACIÓN, AGUAS SUBTERRÁNEAS, MODELACIÓN Y PERCEPCIÓN REMOTA

Análisis e interpretación de la jerarquía estratigráfica
de depósitos lobulares de aguas profundas usando la
transformada de ondícula.

Caso de estudio: depósitos de la Formación Chicontepec

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(MODELACIÓN)**

PRESENTA:

Raydel Ramos Pineda

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Armando Altamira Areyán

JURADO EXAMINADOR:

Dr. Martin Alberto Díaz Viera (Instituto Mexicano del Petróleo)

Dr. José Manuel Grajales Nishimura (Instituto de Geología, UNAM)

Dr. Víctor Velasco Herrera (Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM)

Dr. Enrique Coconi Morales (Instituto Mexicano del Petróleo)

Ciudad Universitaria, Febrero de 2020.



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.

Créditos de la información petrolera proporcionada por el CNIH a la UNAM.

“Esta tesis utilizó información petrolera proporcionada por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, de acuerdo al anexo C de la licencia de uso de la información a favor de la UNAM, de fecha 11 de diciembre de 2017, bajo la nomenclatura CNIH-C-00417. Dicha información es propiedad de la Nación y su acopio, resguardo, uso administración y actualización, así como de publicación de la misma corresponde a la Comisión Nacional de Hidrocarburos”.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México en especial al Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra por brindarme la oportunidad de continuar creciendo como profesional.

Agradezco al Dr Armando Altamira Areyán por tener la confianza en mí para desarrollar esta investigación.

Agradezco a los Drs Martin Alberto Díaz Viera, José Manuel Grajales Nishimura y Víctor Velasco Herrera por las sugerencias y aclaraciones de dudas.

Dedicatoria

*Esta tesis está dedicada a mi madre querida que lo es todo
para mí*

Resumen

Como resultado de esta investigación, se propone la aplicación de la transformada de ondícula a registros geofísicos de pozos de rayos gamma (sintéticos y reales), para ayudar en el análisis e interpretación de la jerarquía estratigráfica de los depósitos de abanicos de aguas profundas y para estimar el grosor de sus estructuras de empaquetamiento. Nuestro enfoque fue primero, construir una arquitectura estratigráfica de un depósito sedimentario de abanico sintético, compuesto por tres complejos de lóbulos, cuyas facies laterales y verticales cambian de la misma manera que lo hacen los modelos sedimentológicos propuestos por varios autores. Se construyeron registros de pozos sintéticos para tres pozos que atraviesan el modelo conceptual, que también tiene una estructura jerárquica preconcebida y una distribución lateral de los subambientes; luego, la transformada wavelet se aplicó a esos registros sintéticos de cada pozo, utilizando la ondícula madre *coif3*, de los cuales se obtuvieron escalogramas y líneas de coeficientes, como una nueva forma de examinar la estructura de datos. Utilizando la intensidad de los coeficientes de la ondícula y los puntos de inflexión en las líneas de coeficientes, se calcularon los espesores de los diferentes niveles jerárquicos, recuperando la jerarquía estratigráfica propuesta al principio para el modelo, logrando que los detalles más finos de la señal se resalten en las frecuencias altas, que corresponden a los componentes jerárquicos de orden inferior (lóbulo y elementos del lóbulo), mientras que las frecuencias más bajas resuelven intervalos estratigráficos gruesos, que corresponden a los niveles jerárquicos de orden superior (complejos de lóbulo y sistemas de abanicos). La segunda parte de nuestra investigación consistió en aplicar la metodología utilizada anteriormente, a ocho registros de pozos de rayos gamma de un sector en el yacimiento Coyotes. Al aplicar la transformada de ondícula a los ocho registros de pozos de rayos gamma y al usar escalogramas y líneas de coeficientes, se reveló la estructura jerárquica estratégica del depósito siliciclástico (elemento de lóbulo al complejo de lóbulo). Concluimos que nuestro enfoque revela la estructura estratigráfica jerárquica inherente al depósito de abanico, y que el enfoque de líneas de coeficientes es metodológicamente más robusto que una interpretación cualitativa usando escalogramas. Para la porción estratigráfica del campo Coyotes analizada, los espesores calculados por líneas de coeficientes, después de la transformada de ondícula, caen dentro de los rangos reportados para entornos de abanicos de aguas profundas documentados por varios autores en la literatura sobre sistemas de abanicos de aguas profundas.

Abstract

As a result of this investigation, I propose the application of the wavelet transform to gamma ray well-logs (synthetic and real), to assist on the stratigraphic hierarchy interpretation of deep-water fan deposits, and to estimate the thicknesses of their packing structures . Our approach was first, to construct a stratigraphic architecture of a synthetic fan sedimentary deposit, made of three lobe complexes, which lateral and vertical facies change in the same way the sedimentological model documented by several authors does. Synthetic well-logs were constructed for three wells that cross the conceptual model, which also has a preconceived hierarchical structure, and a lateral distribution of the sub-environments; then the wavelet transform was applied to those synthetic records of each well, using the mother wavelet *coif3*, from which scalograms and coefficient lines were obtained, as a new way to examine the data structure. Using the intensity of the wavelet coefficients, and the inflection points in the coefficient lines, I calculated the thicknesses of the different hierarchical levels, recovering the stratigraphic hierarchy proposed at the beginning for the model, getting that the finest details of the signal are highlighted on the high frequencies, which corresponds to the lower order hierarchical components (lobe and lobe elements), while the lower frequencies resolve thick stratigraphic intervals, which corresponds to the hierarchical levels of superior order (complex lobes, and fan systems). The second part of our investigation consisted in applying the methodology used before, to eight gamma-ray well-logs of a sector in the Coyotes Field reservoir. When applying wavelet transform to the eight gamma-ray well-logs, and using scalograms and coefficient lines, the stratigraphic hierarchy structure of the siliciclastic deposit was revealed (from lobe element to lobe complex). We conclude that our approach unveils the hierarchical stratigraphic structure inherent in fan deposit, and that the coefficient lines approach, is methodologically more robust than a qualitative interpretation using scalograms. For the Coyotes stratigraphic portion analyzed, the thicknesses calculated by lines of coefficients, after the wavelet transform, fall within the reported ranges for deep-water fan environments documented by several authors in the literature.

Índice general

Créditos de la información petrolera proporcionada por el CNIH a la UNAM.	I
Agradecimientos	II
Dedicatoria	III
Resumen	IV
Abstract	V
Índice general	VIII
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XV
Lista de nomenclaturas	XVI
Introducción	1
Problema	1
Hipótesis	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Breve descripción del contenido de la tesis	3
1. Antecedentes	4
1.1. Antecedentes sobre la jerarquía estratigráfica de depósitos lobulares de aguas profundas	4
1.2. Antecedentes sobre la aplicación de la transformada de ondícula en las Ciencias de la Tierra.	7
2. Modelos jerárquicos en depósitos lobulares de aguas profundas	10
2.1. Modelo jerárquico de (Gervais, et al., 2006)	10
2.2. Modelo jerárquico de (Deptuck, et al., 2008)	12
2.3. Modelo jerárquico de (Prelat, et al., 2009)	14
2.3.1. Subambientes de depósito sedimentario en lóbulos de aguas profundas	14
2.3.2. Estructura de la jerarquía estratigráfica en abanicos de aguas profundas	16

3. Transformada de ondícula	21
3.1. Transformada de Fourier	21
3.2. Transformada de Fourier con ventana	22
3.3. Transformada de ondícula	23
3.4. Tipos de transformada de ondícula	26
3.4.1. Transformada de ondícula continua	26
3.4.2. Transformada de ondícula discreta	27
3.5. Análisis multiescala	27
4. Metodología general	30
4.1. Modelo geológico-conceptual	30
4.2. Estructura jerárquica del MGC	30
4.3. Electrofacies y registros sintéticos del MGC	31
4.4. Validación del MDS	31
4.5. Aplicación a un caso de estudio	31
5. Validación del modelo de datos sintéticos(MDS)	33
5.1. Modelo geológico conceptual para depósitos lobulares de aguas profundas . .	33
5.1.1. Descripción de la arquitectura y jerarquía de los complejos de lóbulos	34
5.2. Columnas estratigráfica - sintéticas	36
5.2.1. Complejo de lóbulos 1	38
5.2.2. Complejo de lóbulos 2	39
5.2.3. Complejo de lóbulo 3	40
5.3. Modelo de electrofacies	41
5.4. Aplicación de la transformada de ondícula a los registros de rayos gamma sintéticos	43
5.4.1. Escalogramas de modelo de los registros de rayos gamma sintéticos P1, P2 y P3	43
5.4.2. Determinación de espesores en el modelo de eF usando la línea de los coeficientes de la ondícula	46
6. Aplicación al caso de estudio: Pozos del Sector 3 del Campo Coyotes	53
6.1. Registros geofísicos de rayos gamma de los ocho pozos pertenecientes al Sector 3 del Campo Coyotes	54
6.2. Aplicación de la transformada de ondícula a los registros geofísicos de los pozos Coyotes usando escalogramas	56
6.3. Definiendo la jerarquía estratigráfica en términos de espesores y niveles jerárquicos con las líneas de los coeficientes	64
7. Discusión de los resultados	76
Conclusiones	80
Recomendaciones	81
Bibliografía	85
Anexos	85

- A. Jerarquía estratigráfica pozo Coyotes 311 determinada con el escalograma aplicando la coiflet 3. 87
- B. Jerarquía estratigráfica pozo Coyotes 311 determinada con las líneas de coeficientesa aplicando la coiflet 3. 89

Lista de figuras

2.1.	Esquema jerárquico propuesto por Gervais et al. (2006) donde se muestran tres niveles de jerarquía: 1) cuerpo elemental (<i>CE</i>), 2) unidad interna (<i>UI</i>) y 3) lóbulo o complejo de lóbulos (<i>L</i>) de menor a mayor respectivamente.	11
2.2.	Esquema jerárquico propuesto por Gervais et al. (2006) donde se muestran los tres niveles de jerarquía y la variabilidad interna del depósito debido a los procesos de erosión-acumulación durante la formación del lóbulo.	12
2.3.	Esquema que muestra los cuatro niveles de jerarquía: capas o conjuntos de capas, elemento de lóbulo, lóbulo compuesto y complejo de lóbulos con sus dimensiones de ancho, espesor y sucesión de apilamientos compensatorios. La línea de color rojo marca la superficie de apilamiento y formación del subsiguiente nivel jerárquico (Deptuck et al., 2008).	13
2.4.	Esquema que muestra de una vista en planta y sección transversal de dos lóbulos para indicar los componentes y subambiente en sistemas de lóbulos: eje del lóbulo, fuera del eje del lóbulo, orilla del lóbulo y orilla distal (Prélat et al., 2009).	15
2.5.	Esquema jerárquico propuesto por Prélat et al. (2009) donde se muestran los cuatro niveles de jerarquía: estrato, elemento de lóbulo, lóbulo y complejo de lóbulo. La línea de color negro que bordea el nivel jerárquico resalta el apilamiento y formación del subsiguiente nivel en la jerarquía.	16
2.6.	Esquema jerárquico propuesto por Prélat et al. (2009) donde se muestran los cuatro niveles de jerarquía: estrato, elemento de lóbulo, lóbulo y complejo de lóbulo con sus respectivas dimensiones (ancho y espesor), apilamiento vertical y las unidades de finos.	17
2.7.	A) Esquema de un lóbulo simple con los patrones estratigráficos: engrosamiento hacia arriba, adelgazamiento hacia arriba, engrosamiento a adelgazamiento hacia arriba, adelgazamiento a engrosamiento hacia arriba y espesores constantes hacia arriba. (B) Columna estratigráfica del registro sedimentario de la secuencia A5, de un núcleo de BAV donde se muestran tres ejemplos de lóbulo con sus patrones: fuera de eje con espesores constantes, orilla distal estratocreciente-estratodecreciente y fuera de eje estratodecreciente-estratocreciente (Prélat and Hodgson, 2013).	19
3.1.	Muestra el dominio tiempo-escala al aplicar una transformada de ondícula (análisis multiescala).	24
3.2.	Dos señales cosenos con diferentes frecuencias $f=1$ y $f=20$, donde se observar que para la frecuencia 20 la señal está comprimida, mientras que para la frecuencia 1 la señal está dilatada, tomado de Castro (2002)	25

3.3. Las ondículas madres más comunes que se utilizan en la práctica tomado de Castro (2002)	26
3.4. proceso de filtrado donde $g(n)$ corresponde al filtro pasa alta y $h(n)$ corresponde al filtro pasa baja., mostrando el filtrado y el submuestreo de la señal, tomado de Castro (2002)	29
4.1. Esquema metodológico para obtener la jerarquía estratigráfica de depósitos lobulares de aguas profundas.	32
5.1. Vista en planta del modelo de sistema de abanicos propuestos. Zona de los complejos de lóbulo donde se proyectaron los tres pozos. Muestra la superposición de un complejo sobre otro y la zona de los depósitos lobulares con los pozos propuestos encerrada en un rectángulo: $P1$, $P2$ y $P3$	34
5.2. El modelo geológico conceptual con los tres pozos proyectados en profundidad cortando los CLs y mostrando los diferentes subambientes de los lóbulos.	35
5.3. Jerarquía interna de los Ls . Los (ELs) con espesor constante dentro de un mismo lóbulo formado por estratos de espesor variables con diferentes tendencias estratigráficas.	37
5.4. Columnas estratigráficas sintéticas del modelo geológico conceptual obtenidas a partir de los tres pozos proyectados en el sistema de abanico. En cada columna se describen la cantidad de elementos que presentan los lóbulos y el tipo de subambiente del lóbulo.	38
5.5. Registros sintéticos correspondiente a los pozos $P1$, $P2$ y $P3$, en donde se representan tres complejos con datos sintéticos de RG de las facies conceptualizadas en las columnas estratigráficas.	41
5.6. Se muestran las columnas estratigráficas y el modelo de electrofacies presentes en los tres registros mostrando los diferentes rangos de valores RG para cada eF de acuerdo a la litología y el subambiente de lóbulo. Los valores de RG altos eF arcillosas y limosas, mientras que los valores de eF bajos representan depósitos arenosos de distintos subambientes.	42
5.7. RG de $P1$, $P2$ y $P3$ con los escalogramas obtenidos usando la $coif3$ considerando diferentes escalas a) 0 - 2.5 m b) 2.5 - 5 m c) 5 - 10 m d) 10 - 25 m d) 25 - 40 m d) 40 - 60 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interfaces estratigraficas.	44
5.8. Escalograma $P1$ donde se resalta el patrón encontrados en los tres CLs usando la $coif3$ considerando diferentes escalas a) 0 - 2.5 m b) 2.5 - 5 m c) 5 - 10 m d) 10 - 25 m d) 25 - 40 m d) 40 - 60 m.	46
5.9. El gráfico muestra el registro sintético correspondiente al $P1$ con las curvas de la función línea de coeficientes usando la ondícula $coif3$ considerando diferentes escalas 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 25 m, 25 - 40 m y 40 - 60 m.	47
5.10. El gráfico muestra el registro sintético correspondiente al $P1$ con las curvas de la función línea de coeficientes usando la ondícula $coif3$ considerando diferentes escalas 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 25 m, 25 - 40 m y 40 - 60 m.	48
5.11. Se muestra la línea de los coeficientes usando la ondícula $coif3$ y el registro sintético de RG correspondiente al $P1$. En las líneas de coeficientes se señalan los puntos de inflexión obtenidos en las diferentes escalas.	48

<p>5.12. Se muestran las escalas seleccionadas para mostrar los niveles jerárquicos calculados. Se señalan a diferentes escalas los componentes de la jerarquía <i>ELs</i>, <i>Ls</i> y <i>CLs</i>. Se refuerzan los detalles contenidos en el nivel de elemento de lóbulo (<i>EL1</i>, <i>EL2</i> y <i>EL3</i>) encontrados en el <i>L6</i> y a su vez los seis lóbulos (<i>L1</i>, <i>L2</i>, <i>L3</i>, <i>L4</i>, <i>L5</i> y <i>L6</i>) contenidos en el <i>CL3</i>. Se indican la cima y base de cada nivel jerárquico analizado.</p>	<p>49</p>
<p>6.1. Ubicación del área de estudio. Estos pozos se localizan entre la porción norte de la Cuenca Tampico-Misantla y el occidente de la Plataforma de Tuxpan. La distancia entre el pozo C-318 y el centro de la macropera (C-331) es de 1400 m mientras que la distancia entre los pozos pertenecientes a la macropera es de 400 m.</p>	<p>54</p>
<p>6.2. Registros geofísicos de pozos de rayos gamma correspondiente a los pozos Coyote 311, Coyote 312, Coyote 318, Coyotes 331, Coyotes 332, Coyotes 333, Coyotes 351 y Coyotes 353. Se resaltan los cuerpos ricos en arena color amarillo y la línea verde representa el valor límite como marcador de ambientes de lóbulos ¡55 API.</p>	<p>55</p>
<p>6.3. Registro de rayos gamma del C311 y su escalogramas usando la <i>coif3</i>, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los <i>ELs</i>.</p>	<p>57</p>
<p>6.4. Registro de rayos gamma del C312 y su escalogramas usando la <i>coif 3</i>, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los <i>ELs</i>.</p>	<p>58</p>
<p>6.5. Registro de rayos gamma del C318 y su escalogramas usando la <i>coif 3</i>, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los <i>ELs</i>.</p>	<p>59</p>
<p>6.6. Registro de rayos gamma del C331 y su escalogramas usando la <i>coif 3</i>, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los <i>ELs</i>.</p>	<p>60</p>

- 6.7. Registro de rayos gamma del C332 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*. 61
- 6.8. Registro de rayos gamma del C333 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*. 62
- 6.9. Registro de rayos gamma del C351 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*. 63
- 6.10. Registro de rayos gamma del C351 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*. 64
- 6.11. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-311 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 66

- 6.12. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-312 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jeráquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 67
- 6.13. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-318 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jeráquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 68
- 6.14. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-331 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jeráquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 69
- 6.15. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-332 con cuatro cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jeráquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 70

- 6.16. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-333 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jeráquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *CL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 71
- 6.17. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-351 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jeráquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 72
- 6.18. La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-353 con cuatro cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en pimer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jeráquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerarquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la cuva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia. 73

Lista de tablas

2.1. Espesores y jerarquía estratigráfica en seis sistemas de depósitos lobulares de aguas profundas (Prelat et al., 2010).	20
5.1. Arquitectura estratigráfica del modelo geológico conceptual	35
5.2. Muestra una comparación entre los valores de los espesores del modelo de datos sintéticos y los espesores estimados utilizando la distancia entre puntos de inflexión.	50
5.3. Puntos de inflexión similares que representan los límites de cuerpos y niveles jerárquicos del <i>CL3</i>	52
6.1. Jerarquía estratigráfica determinada en los depósitos a partir de los pozos coyotes de la Formación Chicontepec con la matriz de coeficientes de los escalogramas.	56
6.2. Valores de la cima y base de los complejos de lóbulos calculados a partir de los puntos de inflexión en la línea de coeficientes de los pozos y los escalogramas.	74
6.3. Jerarquía estratigráfica determinada en los depósitos a partir de los pozos coyotes de la Formación Chicontepec con las líneas de coeficientes y los puntos de inflexión.	75

Lista de nomenclaturas

<i>E</i>	...	...	...	...	...	...	...	Estrato
<i>EL</i>	...	...	...	...	...	...	...	Elemento de lóbulo
<i>L</i>	...	...	...	...	...	...	...	Lóbulo
<i>CL</i>	...	...	...	...	...	...	...	Complejo de lóbulo
<i>IEL</i>	...	...	...	...	...	...	...	Inter - elemento de lóbulo
<i>IL</i>	...	...	...	...	...	...	...	Inter - lóbulo
<i>ICL</i>	...	...	...	...	...	...	...	Inter - Complejo de lóbulo
<i>eL</i>	...	...	...	...	...	...	...	Eje de lóbulo
<i>FeL</i>	...	...	...	...	...	...	...	Fuera del eje del lóbulo
<i>O</i>	...	...	...	...	...	...	...	Orilla del lóbulo
<i>OD</i>	...	...	...	...	...	...	...	Orilla distal del lóbulo
<i>eF</i>	...	...	...	...	...	...	...	Electrofacies
<i>P</i>	...	...	...	...	...	...	...	Pozo
<i>RG</i>	...	...	...	...	...	...	...	Rayos gamma
<i>RGP</i>	...	...	...	...	...	...	...	Registro geofísico de pozo
<i>N</i>	...	...	...	...	...	...	...	Número de muestras
<i>f</i>	...	...	...	...	...	...	...	Frecuencia
<i>C</i>	...	...	...	...	...	...	...	Coefficientes de la ondícula

Introducción

Los abanicos submarinos de aguas profundas son cuerpos sedimentarios con formas y estructuras muy complejas. Estos depósitos se componen fundamentalmente de flujos de sedimentos gravitacionales (turbidíticos o laminares), los cuales pueden ser producidos por diversos eventos (pulsos orogénicos, sismos, tormentas, inestabilidad gravitacional, etc). Estos están formados principalmente por tres sistemas de depósito (canales, depósitos de desborde “levees”, y lóbulos), los cuales coexisten y se interestratifican con bloques deslizados, escombritas “debrites”, slumps, y sedimentación pelágica. Estos sistemas tienen una arquitectura y jerarquía estratigráfica propias definidas por varios autores como : [Gervais et al. \(2006\)](#); [Deptuck et al. \(2008\)](#); [Prélat et al. \(2009\)](#); [Prelat et al. \(2010\)](#); [Flint et al. \(2011\)](#); [Prélat and Hodgson \(2013\)](#), donde independientemente de la ubicación geográfica y el contexto geológico lograron encontrar fuertes semejanzas basadas en las dimensiones, geometría y arquitectura estratigráfica.

Las particularidades de las facies sedimentarias, los modelos geológicos que integran la información geológica (núcleos y afloramientos análogos), geofísica (registros geofísicos de pozo y datos sísmicos e ingeniería de yacimientos (históricos de pozo, pruebas de presión, y trazadores) son los aspectos más relevantes para la industria petrolera.

La caracterización de yacimiento es una disciplina muy exigente que requiere un análisis cualitativo y cuantitativo de diferentes propiedades geológicas y geofísicas dependientes de la profundidad. Estas propiedades las podemos obtener a partir de los registros geofísicos de pozos que proporcionan un registro continuo de la variación de diversas propiedades físicas de una sucesión de unidades litológicas.

Los registros geofísicos de pozos constituyen señales no estacionarias, lo cual por los métodos de análisis de señales tradicionales (análisis de Fourier) es bastante difícil obtener la información que se requiere como por ejemplo la jerarquía estratigráfica de un depósito areno-arcillo de aguas profundas.

Conocer la jerarquía estratigráfica de los depósitos sedimentarios permite comprender en muchos casos con cierto nivel de detalle, la geometría interna de estos. Es evidente que conociendo la jerarquía de los depósitos se obtiene una visión de la manera en que los paquetes rocosos están arreglados en el sustrato geológico o en afloramientos, y sus modos de apilamiento.

Problema

Todos los ambientes sedimentarios depositan sedimentos en el espacio a través del tiempo, estos están controlados por el tipo, y cantidad del aporte sedimentario, regulados por las características propias de la cuenca sedimentaria (dimensiones, posición geográfica, ambiente

tectónico), y por los procesos (físicos-químicos y biológicos) propios de cada ambiente (sistemas costeros, deltas, cañones, canales, abanicos, complejos de transporte de masas, etc). Los estudios sedimentológicos llevados a cabo en formaciones aflorantes, depositadas en ambientes de abanicos submarinos de aguas profundas en distintas partes del planeta, y de múltiples edades geológicas, revelan que sus depósitos poseen estructura interna organizada en una jerarquía estratigráfica establecida, cuyos distintos órdenes jerárquicos están delineados por intervalos de depósito limo-arcillosos de distintos espesores (Prélat et al., 2009) . La falta de una metodología que ayude en el análisis e interpretación de la jerarquía estratigráfica de estos depósitos de manera eficiente, con la información normalmente disponible en la exploración petrolera constituye el problema fundamental a resolver en esta investigación.

Hipótesis

La transformada de ondícula aplicada a series de tiempo o espaciales es útil para conocer el arreglo, o agrupamiento, de los datos en diferentes escalas de observación, por lo cual se puede plantear que si un registro de rayos gamma correspondiente a un paquete sedimentario areno-arcilloso, se analiza aplicando la transformada de ondícula, entonces esta revelará el arreglo o agrupamiento de las facies (areno-arcillosas), a distintas escalas de observación, lo cual permitirá visualizar la jerarquía estratigráfica propia del depósito sedimentario.

El deducir la jerarquía estratigráfica de estos tipos de depósitos sedimentarios en particular, se torna bastante complejo. Como alternativa de solución se puede utilizar la transformada de ondícula que es una herramienta matemática que analiza señales no estacionarias y por tanto se puede conocer en una serie espacial los cambios bruscos en intervalos muy pequeños, en el dominio espacio - escala simultáneamente. Esto ofrece una vista interna de estos tipos de depósitos y por tanto se pueden asociar los puntos de abruptos de la señal con el entorno geológico del sistema sedimentario logrando desentrañar la jerarquía estratigráfica del depósito y la forma en que estos se organizan.

Objetivo general

Aplicar la transformada de ondícula de manera sistemática, en registros de rayos gamma, para apoyar el análisis e interpretación de la jerarquía estratigráfica en depósitos areno-arcillosos de aguas profundas. En particular:

Objetivos específicos

- 1) Revisar los principales antecedentes teóricos y prácticos sobre el orden jerárquico en la estratigrafía de depósitos de abanicos de aguas profundas,
- 2) Revisar los principales conceptos teóricos y aplicaciones de la transformada de ondícula en ciencias de la tierra,
- 3) Construir, apegados a la literatura sobre abanicos submarinos de aguas profundas, registros sintéticos de rayos gamma que tengan la jerarquía estratigráfica característica de este tipo de depósitos sedimentarios,

- 4) Aplicar la transformada de ondícula a registros geofísicos de rayos gamma sintéticos y validar si el arreglo interno impuesto es resuelto por el análisis de transformada de ondícula,
- 5) Determinar la jerarquía estratigráfica de depósitos de aguas profundas a partir de registros de pozos reales usando la transformada de ondícula.

Breve descripción del contenido de la tesis

La tesis se encuentra estructurada de la siguientes manera: introducción, el desarrollo consta de siete capítulos y las conclusiones.

El Capítulo 1 “Antecedentes”, en este se resumen las principales investigaciones y puntos de vistas, usados por varios autores referidos a los temas de los sistemas de depósitos arenosos de aguas profundas, así como la aplicación de la transformada de ondícula en Ciencias de la Tierra.

En el Capítulo 2 “Modelos jerárquicos en depósitos lobulares de aguas profundas” se resumen los principales conceptos de los modelos considerados para la comprensión de los sistemas de depósitos lobulares de aguas profundas. Se resumen las características arquitecturales y jerárquicas de los sistemas de depósitos lobulares de aguas profundas utilizando como guía el modelo de jerarquía de [Prélat et al. \(2009\)](#).

En el Capítulo 3 “Transformada de ondícula” se resumen los principales conceptos para la comprensión de la transformada de ondícula. Se comienza estudiando la transformada de Fourier como una de las principales herramientas en el análisis espectral hasta llegar al estudio de la transformada de ondícula. Además se realiza una justificación de porque se utiliza en este estudio la transformada de ondícula como la herramienta más idónea.

El Capítulo 4 “Metodología” describe la metodología y las herramientas utilizadas en la investigación.

En el Capítulo 5 “Validación del modelo de datos sintéticos” se valida la metodología a partir de la construcción del modelo geológico conceptual (sistema de abanicos), en cada una de sus etapas. Se construye la arquitectura estratigráfica del sistema de abanicos y se traduce la arquitectura modelada a un contexto de datos. Los datos se expresan como registros de rayos gamma sintético, cuyos valores comprenden los rangos verificados en estudios de casos reales. Con estos datos se logra replicar la jerarquía estratigráfica propuesta inicialmente a partir de aplicar la transformada de ondícula usando como forma de presentación de los datos los escalogramas y la líneas de los coeficientes.

En el Capítulo 6 “Aplicación al caso de estudio: Pozos del Sector 3 del Campo Coyotes” se aplica la metodología validada a un caso de estudio para obtener la jerarquía estratigráfica de un caso real.

En el Capítulo 7 se discuten los principales resultados obtenidos al aplicar la transformada de ondícula a registros geofísicos de pozo para determinar la jerarquía estratigráfica de un sistema arenoso de aguas profundas.

Capítulo 1

Antecedentes

En este capítulo se describen los trabajos más destacados sobre los estudios de la jerarquía estratigráfica en depósitos de abanicos de aguas profundas como son: [Gervais et al. \(2006\)](#); [Deptuck et al. \(2008\)](#); [Prélat et al. \(2009\)](#); [Prelat et al. \(2010\)](#); [Flint et al. \(2011\)](#); [Prélat and Hodgson \(2013\)](#) entre otros, así como los principales trabajos enfocados en la aplicación de la transformada de ondícula en el análisis de los sistemas sedimentarios como herramienta de apoyo en la caracterización de yacimientos petroleros ([Alvarez et al., 2003](#); [Coconi-Morales et al., 2010](#); [Verma et al., 2012](#); [Perez-Muñoz et al., 2013](#); [Sánchez et al., 2017](#)).

1.1. Antecedentes sobre la jerarquía estratigráfica de depósitos lobulares de aguas profundas

En el campo de la sedimentología se han propuesto una amplia variedad de esquemas jerárquicos que han intentado caracterizar depósitos lobulares marinos de aguas profundas particularmente los relacionados con flujos de gravitacionales. Todos estos esquemas jerárquicos intentan clasificar la arquitectura de estos depósitos lobulares mediante su orden espacial, temporal y procesos genéticos que les dieron origen. Los enfoques han sido muy diversos, sin embargo han existido algunos puntos de coincidencia que ayudan a comprender la dinámica de estos depósitos.

[Gervais et al. \(2006\)](#) con la ayuda de datos sísmicos de alta resolución, proponen un esquema jerárquico con tres órdenes (cuerpo elemental, unidad interna y lóbulos o complejo de lóbulos). En este estudio elaboraron un pseudo-modelo 3D de los lóbulos del abanico de la península de Córcega que les permitió visualizar algunos detalles sobre la geometría, y formas de apilamiento, en los lóbulos.

[Deptuck et al. \(2008\)](#) realizaron un estudio sobre las dimensiones, y la arquitectura estratigráfica de los lóbulos submarinos del Pleistoceno Tardío del margen norte de Córcega Oriental, en el cual se centraron en las causas de la variabilidad geométrica, y la heterogeneidad interna, de los lóbulos, llegando a la conclusión de que estos fenómenos influyen directamente sobre la jerarquía estratigráfica del depósito.

[Prélat et al. \(2009\)](#) investigaron la evolución, arquitectura estratigráfica y jerarquía, de los depósitos de aguas profundas de los abanicos submarinos de la Cuenca Karoo en Sudáfrica. Definieron un sistema jerárquico para los depósitos de abanico organizado en cuatro jerarquías (estrato, elementos de los lóbulos, lóbulos y complejos de lóbulos).

[Prelat et al. \(2010\)](#) comparan diferentes depósitos lobulares (cuenca de Karoo en Sudáfrica, abanico del Amazonas en Brasil, lóbulos de la costa de Zaire, la cuenca Kutai en Indonesia, los depósitos de Golo en Francia y los depósitos de la cuenca del delta de Nigeria. En este estudio determinan patrones de apilamiento, y establecen niveles jerárquicos comunes para diferentes tipos de depósito (modernos y antiguos) aplicando el esquema jerárquico propuesto en [Prélat et al. \(2009\)](#) y estandarizando así esta nomenclatura y clasificación de depósitos lobulares marinos profundos.

[Fleming \(2010\)](#) tomando en cuenta los aspectos arquitectónicos y jerárquicos de depósitos lobulares en los estudios previos de [Deptuck et al. \(2008\)](#) y [Prélat et al. \(2009\)](#) estudió la arquitectura estratigráfica y la jerarquía de los complejos de lóbulos en la Formación Punta de Loma, en California. Propone una metodología para cuantificar las características internas y externas de los lóbulos y complejos de lóbulos, usando variables comunes desde el eje del lóbulo hasta la zona más distal del lóbulo, logrando el reconocimiento de tres elementos (MTDs, mudstone sheets, y lóbulos). Propone también criterios para reconocer el eje del lóbulo, así como las superficies delimitadoras entre elementos de lóbulo verticalmente adyacentes.

[Macdonald et al. \(2011\)](#) reportan los complejos de lóbulos que constituyen la Formación Carboniferous Ross, en Irlanda occidental, donde interpretan el patrón de engrosamiento ascendentes en estos depósitos, llegando a la conclusión de que el comportamiento en estos paquetes son el resultado de la progradación de cada elemento del lóbulo, por lo que cada paquete registra una tendencia vertical de depósitos distales a proximales acompañados de un aumento en la frecuencia de megaflojos. Este nuevo modelo proporciona un enfoque jerárquico basado en procesos sedimentológicos, acorde con el modelo jerárquico propuesto por [Deptuck et al. \(2008\)](#); sin embargo, no se reconocen todos los órdenes jerárquicos del autor antes mencionado.

[Flint et al. \(2011\)](#) llevaron a cabo una investigación sobre la arquitectura de los lóbulos del depocentro de la cuenca Karoo en Sudáfrica, en esta investigación el enfoque de la jerarquía estratigráfica se basa en el reconocimiento de grandes superficies de lutitas hemipelágicas que recubren cuerpos arenosos. Estas lutitas son interpretadas como períodos de descenso en el nivel del mar y aumento del espacio de acomodamiento en la cuenca, notándose diferentes espesores para estas capas de lutitas hemipelágicas.

[Straub and Pyles \(2012\)](#) realizaron trabajos sobre la arquitectura expuesta de los depósitos de la Formación Carboniferous Ross, en Irlanda occidental, donde lograron documentar cuantitativamente, mediante un análisis de regresión lineal, aumentos estadísticamente significativos en la fuerza de compensación en los niveles jerárquicos más grandes para apoyar el uso de interpretaciones jerárquicas de la estratigrafía actual.

[Prélat and Hodgson \(2013\)](#) aplican la metodología de [Prélat et al. \(2009\)](#) para estudiar los depósitos lobulares en el depocentro de Laingsburg, al suroeste de la cuenca Karoo, en Sudáfrica, donde lograron demostrar que estos depósitos exhiben diferentes patrones de engrosamiento, los cuales reflejan su organización interna (desde el elemento del lóbulo más pequeño hasta el nivel jerárquico más grande), lo que derivó en una hipótesis sobre los procesos que inducen las formas de apilamiento, la evolución de los depósitos sedimentarios a través del tiempo y del espacio registrados en el depocentro de la cuenca.

[Terlaky et al. \(2016\)](#) aplican también la metodología de [Prélat et al. \(2009\)](#) para caracterizar las sucesiones de piso de cuenca del Supergrupo Neoproterozoico Windermere, en el sur de la Cordillera Canadiense, donde proponen un nuevo enfoque jerárquico basado en la identificación de avulsiones de canales, así como en la ubicación de los nodos de avulsión, donde cada nivel jerárquico es establecido a partir del orden creciente del patrón del drenaje en la que

ocurrió la avulsión. Esto les permitió determinar siete órdenes jerárquicos y ligar los datos obtenidos a partir de afloramientos con las observaciones hechas a partir de datos sísmicos. [Zhang et al. \(2016\)](#) realizaron un estudio sobre los depósitos de la cuenca del Delta del Nígeria, en el África Occidental, donde utilizaron abundantes datos de registros de pozos y de sísmica para proponer modelos de arquitectura estratigráfica (semicuantitativa - cuantitativa) para lóbulos individuales y complejos de lóbulos. Los autores determinaron cuatro tipos de patrones de apilamiento compensatorio (ordenado, de migración lateral, retrógrado y progradacional) y concluyeron que se encuentran en estrecha relación con la paleotopografía de la cuenca, de manera que los lóbulos individuales del abanico del piso de la cuenca están influenciados por el grado de confinamiento lateral, debido a la paleotopografía, distribuyéndose en un área relativamente grande, con espesores delgados, mientras que los lóbulos individuales del abanico de pendiente, mostraron un área de distribución relativamente más pequeña pero con espesores más grandes.

[Zhang et al. \(2017\)](#) realizaron una revisión sobre los principales conceptos de jerarquía estratigráficas en depósitos lobulares con el propósito de aplicarlos en la prospección en la industria petrolera, en China. A partir de la compilación de datos en trabajos previos, lograron demostrar cuantitativamente que los componentes jerárquicos de los depósitos de lóbulos tienen similares relaciones de longitud/ancho, pero diferentes relaciones de ancho/espesor, en los diferentes sistemas de depósito sedimentario. En este estudio se constató que, en todas las escalas jerárquicas, las unidades de lóbulos son cuerpos ricos en arenas que siempre están separados por unidades delimitadoras de material fino, excepto cuando han sido erosionadas por las unidades superpuestas, dando lugar al proceso de amalgamación vertical y conectividad entre cuerpos. Se explica que las amalgamaciones a menudo ocurren en regiones más proximales, sugiriendo una energía alta de flujo y un comportamiento de flujo mixto, el cual puede ocurrir hacia regiones más distales, depositando “capas de eventos híbridos”.

Otro trabajo importante en la jerarquía en depósitos de lóbulos fue el realizado por [Starek and Fuksi \(2017\)](#) quienes discriminando tres asociaciones de facies, realizaron un estudio estadístico de los espesores de estratos y de la organización vertical de las asociaciones de facies, lo que les permitió identificar la arquitectura estratigráfica en los depósitos de abanico.

[Dennielou et al. \(2017\)](#) llevaron a cabo un estudio sobre la morfología, estructura, composición y procesos constructivos del complejo de lóbulo en la desembocadura del canal activo del Abanico del Congo. En esta investigación se explica que el complejo de lóbulos es de tipo limo-arcilloso con poca arena y está compuesto por cinco lóbulos progradante. Los autores proponen un modelo litoestratigráfico conceptual para cinco entornos morfosedimentarios: bordes del lóbulo, cuerpo del lóbulo, distribuidores, levee y canal de alimentación.

[Lapcik \(2017\)](#) realizó el primer estudio detallado sobre la Formación Skole Nappe's Ropianka en la sección de afloramientos de Słonne a lo largo del río San en Polonia, revelando que se trata de un complejo marino profundo de lóbulos con depósitos turbidíticos. En dicho estudio se reconocen seis facies en depósitos de flujo gravitacionales y su agrupación estratigráfica en cuatro subambientes reconocidos a partir de un modelo conceptual para los depósitos lobulares. Existen cierta similitud entre el modelo conceptual de [Lapcik \(2017\)](#) y los subambientes de lóbulos propuestos por [Prélat et al. \(2009\)](#). El modelo conceptual permitió relacionar las cuatro asociaciones de facies con los subambientes propuestos por [Prélat et al. \(2009\)](#) resultando los subambientes: depósitos de zona axial del lóbulo, depósitos de zona de flanco lateral, depósitos de zona de orilla y depósitos de franja distal/interlóbulo.

[Deptuck and Sylvester \(2018\)](#) realizaron una investigación minuciosa sobre los diferentes elementos en depósitos de abanicos, los autores hacen una revisión sobre las técnicas de ad-

quisición de datos para desarrollar estos tipos de investigaciones, utilizando la terminología de componentes jerárquicos propuestos por [Deptuck et al. \(2008\)](#).

[Fryer \(2018\)](#) analizaron con datos de trabajos previos el grosor de capa, tazas de adelgazamiento, distancia de correlación lateral y proporción neto-bruto en depósitos de aguas profundas y los compararon con los depósitos lobulares submarinos de La Formación Punta de Loma cerca de San Diego, California, así reconocieron similitudes y diferencias arquitectónicas entre ambientes y sub-ambientes dentro de los depósitos de lobulares (por ejemplo, medio vs distal, confinado vs no confinado). Este análisis proporcionó datos estadísticos sobre la variabilidad lateral de facies en los ambientes lobulares submarinos para eliminar la subjetividad de las interpretaciones cualitativas en estos.

[Cullis et al. \(2018\)](#) realizaron una revisión extensa de los principales trabajos sobre las clasificaciones jerárquicas de la arquitectura estratigráfica en los depósitos de aguas profundas, concluyendo que en cierta medida existe una organización jerárquica en estos depósitos, pero en las condiciones actuales del conocimiento no es posible hablar de una jerarquía universal aplicable a todos los tipos de datos y sistemas clásticos marinos de aguas profundas.

A pesar de los variados enfoques en el estudio de la jerarquía y arquitectura estratigráfica de los depósitos lobulares marinos de aguas profundas, el principal logro de todas estas investigaciones ha sido la reafirmación de que estos sí se organizan según una estructura jerárquica.

1.2. Antecedentes sobre la aplicación de la transformada de ondícula en las Ciencias de la Tierra.

[Sahimi and Hashemi \(2001\)](#) propusieron un método novedoso y eficiente para identificar la distribución espacial de fracturas y fallas de los medios porosos en reservorios de petróleo y acuíferos subterráneos a escala de campo utilizando datos sintéticos y datos reales de registros de porosidad y permeabilidad provenientes de yacimientos de Irán. En este estudio mostraron que la geoestadística combinada con la transformada de ondícula complementan el mapa espacial confiable de fracturas y fallas obtenido al calibrar los datos sísmicos con la distribución de fracturas a partir de los coeficientes de la ondícula obtenido de los datos directos.

[Alvarez et al. \(2003\)](#) desarrollaron una metodología para caracterizar la litología alrededor de un pozo a través de la aplicación de la transformada de ondícula con registros de rayos gamma y trazas sísmicas en un yacimiento perteneciente a la cuenca Barinas-Apure en el occidente de Venezuela, en el cual calcularon la transformada de ondícula y concluyeron que los pozos predominantemente arenosos son significativamente diferentes a los gravillentos, en términos de sus distribuciones estadísticas.

[Pan et al. \(2008\)](#) realizaron una investigación donde proponen una metodología de combinación de la transformada de ondícula y los métodos de Fourier para el reconocimiento de interfaces en una formación con cuatro unidades arenosas. Compararon los resultados obtenidos de la transformada de ondícula, el análisis de pozo convencional y una combinación de la transformada de ondícula-métodos de Fourier. Concluyeron que la metodología propuesta es una vía para el reconocimiento de interfaces litológicas, siendo este último el que mejores resultados mostró.

[Yu et al. \(2008\)](#) aplicaron la transformada de ondícula y la transformada de Fourier rápida a datos de rayos gamma de registros de pozo que fueron recolectados en la depresión de Jiyang,

donde se ubica Shengli, el segundo yacimiento de petróleo más grande de China donde lograron identificar los ciclos de Milankovitch en los registros estratigráfico y estimaron parámetros geológicos como el porcentaje preservado del depósito original y la tasa de acumulación en el registro geológico.

[Tokhmechi et al. \(2009\)](#) propusieron un método para la identificación de fracturas a partir de registros de pozo en uno de los campos petroleros iraníes ubicados en la región suroeste del país. En esta metodología utilizan la transformada de ondícula para detectar cambios y características locales de los datos, lo que permitió visualizar las zonas de fracturas y las zonas arcillosas.

[Liu and Jiang \(2010\)](#) aplicaron la transformada de ondícula a registros geofísicos de pozo de rayos gamma para determinar subdivisiones estratigráficas de manera cuantitativa. En este estudio usan el escalograma y la línea de los coeficientes de la ondícula, para identificar dos secuencias de tercer orden y cinco secuencias de 4to orden en la Formación Shahejie en el campo petrolero de la Provincia Shengli.

[Coconi-Morales et al. \(2010\)](#) realizaron un análisis de registros geofísicos de pozo (rayos gama, resistividad y potencial espontáneo) mediante la transformada de ondícula, con el objetivo de determinar la posible influencia de ciclos de Milankovitch en un área productora de petróleo en el Golfo de México. A través de un análisis mediante escalogramas y descomposición multiresolución de registro de rayos gamma detectaron ciclos los cuales interpretaron que corresponden a precesión, oblicuidad y excentricidad (20, 41 y 100 Ka, respectivamente) de la órbita terrestre.

[Javid and Tokhmechi \(2012\)](#) proponen una metodología basada en la aplicación de la transformada de ondícula y la transformada de Fourier rápida, partiendo de datos sintéticos y datos reales de registros de rayos gamma para detectar las interfaces de la formación. En esta investigación realizaron una comparación de los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta con análisis de núcleos de pozo mostrando buena correspondencia.

[Perez-Muñoz et al. \(2013\)](#) proponen el uso de transformada de ondícula en registros de pozo (rayos gamma, señales sísmicas y resistividad) para identificar electrofacies. La transformada fue aplicada a un conjunto de datos de registro de pozos para identificar correlaciones entre los coeficientes de la ondícula y las secuencias de electrofacies.

[Srivardhan \(2016\)](#) propone una metodología para hacer correlaciones estratigráficas a partir de registros geofísicos de pozo usando la transformada de ondícula y la transformada de Fourier para identificar interfaces estratigráficas potenciales. Al considerar también el análisis multiescala observaron que litologías y espesores similares tienen dimensiones fractales similares susceptibles de ser correlacionados.

[Singh et al. \(2016\)](#) aplican la transformada de ondícula para detectar cambios abruptos en los datos de registros geofísicos de pozo, cuidando sus características de señal no estacionaria donde su objetivo principal fue identificar límites litológicos a través del análisis de la transformada de ondícula tomando como caso de estudio el pozo KTB en Alemania. Los resultados obtenidos permitieron obtener imágenes basadas en la transformada de ondícula discreta y continua de las discontinuidades de la corteza terrestre no homogénea en KTB.

[Kadkhodaie and Rezaee \(2017\)](#) aplicaron la transformada de ondícula a registros de rayos gamma y de porosidad para detectar límites de secuencias de las formaciones Ilam y Sarvak, al suroeste de Irán, los cuales constituyen los principales reservorios de petróleo.

[Sánchez et al. \(2017\)](#) realizaron un trabajo donde aplican la transformada de ondícula a cuatro registros de pozos pertenecientes al Campo Lama, en Venezuela, con el objetivo de determinar la presencia de ciclicidades en el registro estratigráfico. En este estudio analiza-

ron los escalogramas asociados a los perfiles de pozo, para evaluar la posible relación entre éstos con unidades litoestratigráficas o aloestratigráficas y el análisis de periodicidades de Milankovitch a través de escalogramas y análisis multiresolución llegando a la conclusión de que la transformada de ondícula es capaz de revelar información estratigráfica así como de ciclos de sedimentación .

Singh et al. (2018) tomaron los datos de registros en dos pozos pertenecientes a la margen convergente de Costa Rica, con el objetivo de conocer con mayor grado de detalle la estratigrafía y la distribución espacial de las microfracturas, para lo cual realizaron un estudio donde aplicaron la transformada ondícula y el análisis fractal basado en ondículas. La identificación de litofacies fue deducida a partir de la transformada de ondícula continua aplicada a registros de rayos gamma, para la distribución espacial de fracturas utilizaron la transformada de ondícula discreta en registros de densidad y para estimar la densidad de fractura calcularon la dimensión fractal; posteriormente los resultados fueron correlacionados con muestras de núcleo disponibles.

La transformada de ondícula se ha convertido en una herramienta para la interpretación interpretación estratigráfica con fines de apoyo a la exploración petrolera y los estudios revisados han obtenido resultados que en muchas ocasiones son consistentes con los contextos geológicos, sin embargo, la literatura no reporta que esta se haya utilizado con el propósito de estudiar la jerarquía estratigráfica en depósitos marinos de aguas profundas, como son los sistemas de abanicos submarinos.

Capítulo 2

Modelos jerárquicos en depósitos lobulares de aguas profundas

Los modelos de jerarquía estratigráfica son útiles para entender la arquitectura estratigráfica depósitos marinos de aguas profundas. Parte de esta arquitectura estratigráfica la componen los lóbulos que teniendo en cuenta su dinámica de formación, pues su estudio es complejo.

Los lóbulos que componen los sistemas de abanicos submarinos son unos de los sistemas más importantes de acumulación de material terrígeno en las cuencas marinas profundas.

La jerarquía de estos cuerpos sedimentarios puede estudiarse a través de afloramientos, registros geofísicos de pozos, núcleos, datos sísmicos. Los afloramientos brindan un poder de alta resolución de los niveles jerárquicos de estos depósitos que no pueden ser revelados por otros métodos, como por ejemplo los registros sísmicos; dada su baja resolución para definir capas centimétricas y que además constituyen elementos jerárquicos dentro del depósito. Sin embargo, los afloramientos tienen la disyuntiva de que, a la hora de establecer el patrón de distribución de apilamiento de litofacies y elementos deposicionales son en 2D y además en la mayoría de los casos son menores que las dimensiones en 3D reales de los lóbulos.

A continuación, se describen tres modelos jerárquicos de depósitos lobulares: el modelo de [Gervais et al. \(2006\)](#), el modelo de [Deptuck et al. \(2008\)](#) y el modelo de [Prélat et al. \(2009\)](#) donde reconocen niveles de jerarquía que facilitan la comprensión de la arquitectura estratigráfica en depósitos arenosos - arcillosos de aguas profundas.

2.1. Modelo jerárquico de (Gervais, et al., 2006)

En este modelo los depósitos de lóbulos son significativamente arenosos, separados por espesores considerables de lutitas hemipelágicas. Los depósitos se forman a partir del apilamiento compensatorio de sus sucesivos cuerpos, que no es más que la tendencia de los sistemas de transporte de sedimentos a llenar de manera preferencial los bajos topográficos a través de la deposición. Es un concepto ampliamente utilizado en la interpretación del registro estratigráfico. Tomando como caso de estudio el sistema de turbidita de Golo observaron varias escalas del depósito lobular, las cuales constituyen su jerarquía triple, identificadas con datos sísmicos de alta resolución ([Gervais et al., 2006](#)) (Figura 2.1).

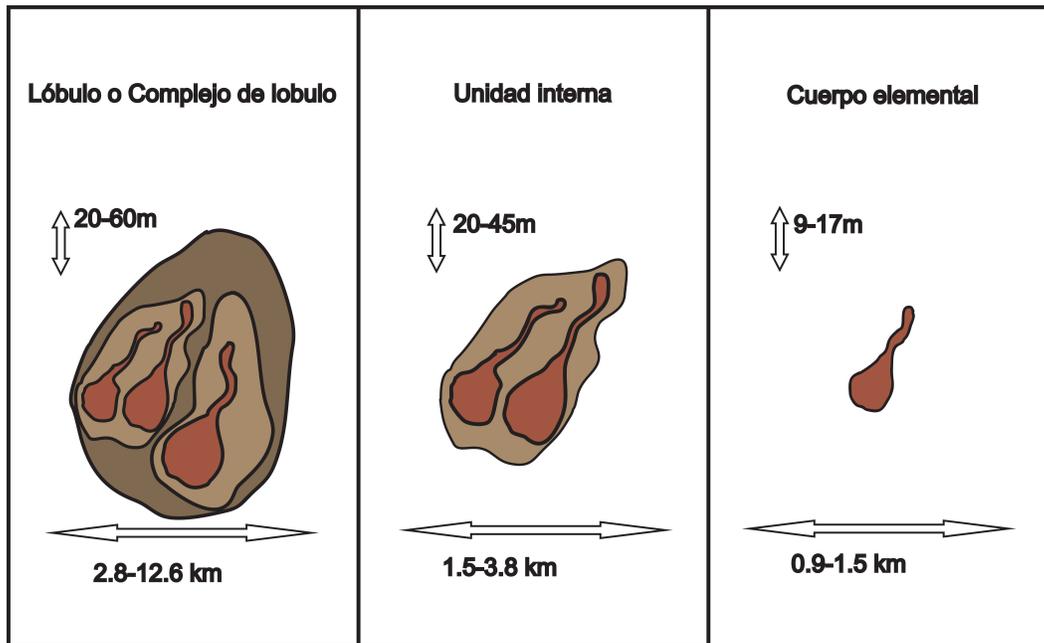


Figura 2.1: Esquema jerárquico propuesto por [Gervais et al. \(2006\)](#) donde se muestran tres niveles de jerarquía: 1) cuerpo elemental (*CE*), 2) unidad interna (*UI*) y 3) lóbulo o complejo de lóbulos (*L*) de menor a mayor respectivamente.

[Gervais et al. \(2006\)](#) consideran que los lóbulos dentro de su modelo también pueden ser denominados complejo de lóbulos, los cuales presentan facies de arenas gruesas masivas. Estos lóbulos o complejo de lóbulos, son fácilmente distinguibles a partir del reconocimiento de grandes intervalos estratigráficos de lutitas hemipelágicas que cubren completamente el depósito arenoso.

Las estructuras de los lóbulos están compuestas por numerosas unidades que conforman pequeños canales erosivos, canales con levees asociados y depósitos laminares. Los pequeños canales se forman cuando la erosión es mayor a la acumulación. Los pequeños canales con levees se forman donde el proceso de erosión ha disminuido, lo cual da la posibilidad de la acumulación (construcción de depósito) y el desborde (levees). Los depósitos laminares evidencian la predominancia de la acumulación sobre la erosión. Estos tres tipos de unidades atestiguan los cambios del flujo en el tiempo y el espacio durante la formación de los depósitos lobulares (Figura 2.2).

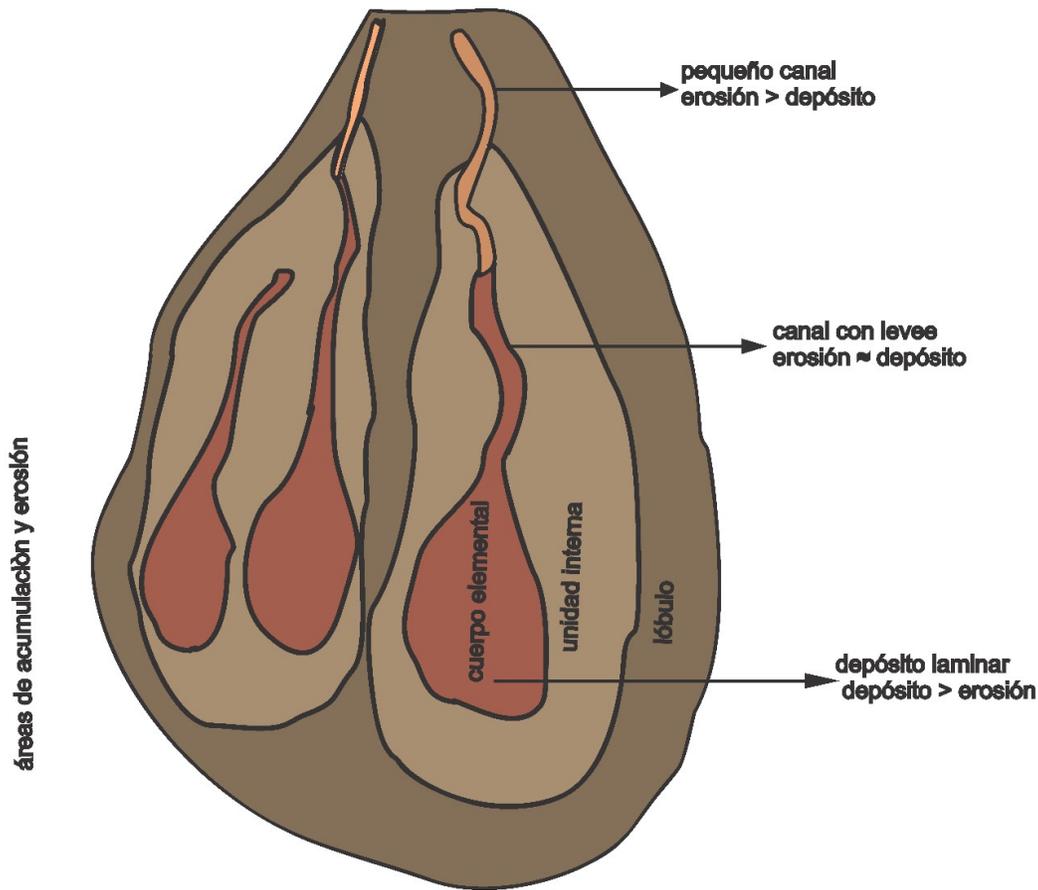


Figura 2.2: Esquema jerárquico propuesto por [Gervais et al. \(2006\)](#) donde se muestran los tres niveles de jerarquía y la variabilidad interna del depósito debido a los procesos de erosión-acumulación durante la formación del lóbulo.

Para los fines de esta investigación, este modelo no aporta las bases necesarias para generar un modelo conceptual que revise la jerarquía a lo interno del depósito. Esto se debe a la propia naturaleza de las características en las que se basan para identificar los niveles jerárquicos, cuyos límites no son reconocidos a partir de superficies críticas claramente distinguibles.

Las unidades que componen los lóbulos están constituidas de cuerpos elementales, las superficies de reconocimiento son extremadamente variables y en el mejor de los casos se distinguen bien a través de núcleos para corroborar su real existencia.

Las superficies son difíciles de mapear debido a su gran tamaño y además a la variabilidad interna de los cuerpos elementales que muestran tres relaciones arquitecturales complejas como son los canales erosivos, los canales con sus levees y los depósitos laminares que constituyen el cuerpo elemental, por lo cual en los lóbulos los procesos de erosión y acumulación están presentes. Esto conlleva a una gran variabilidad de una unidad a otra que pudiera pasar de características erosivas (canales) a características concordantes (depósitos laminares).

2.2. Modelo jerárquico de (Deptuck, et al., 2008)

Lo más significativo de este modelo es que introduce nuevos conceptos a partir del estudio realizados en [Gervais et al. \(2006\)](#). Estos autores se centraron particularmente en describir

el apilamiento compensatorio para cada componente de la jerarquía.

El modelo trata de buscar la causa de la variabilidad geométrica y la naturaleza internamente heterogénea dentro de los lóbulos. Reconocen cuatro niveles jerárquicos, donde el apilamiento compensatorio ocurre en tres de ellos. La jerarquía propuesta por [Deptuck et al. \(2008\)](#) consta de cuatro componente principales: capas o conjuntos de capas, elemento de lóbulo, lóbulo compuesto y complejo de lóbulos, los cuales definen la arquitectura del depósito arenoso (Figura 2.3).

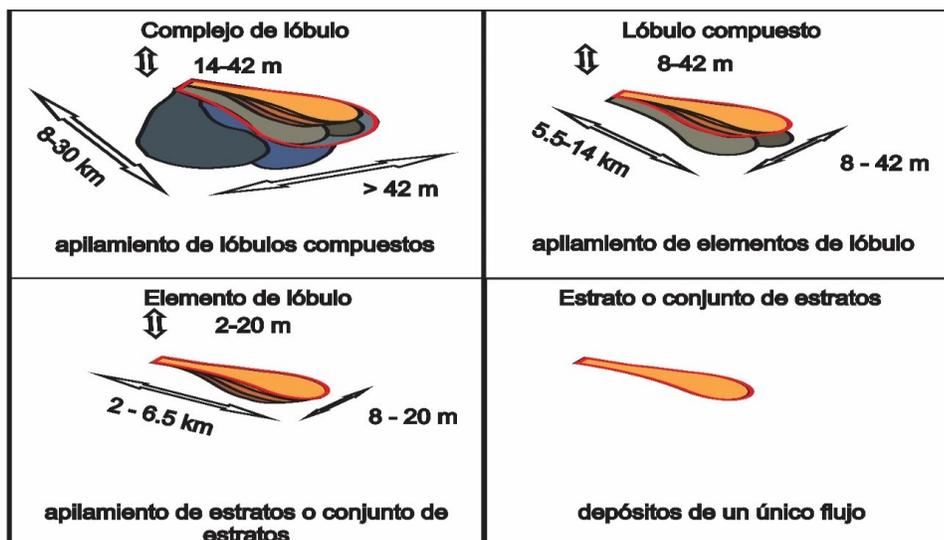


Figura 2.3: Esquema que muestra los cuatro niveles de jerarquía: capas o conjuntos de capas, elemento de lóbulo, lóbulo compuesto y complejo de lóbulos con sus dimensiones de ancho, espesor y sucesión de apilamientos compensatorios. La línea de color rojo marca la superficie de apilamiento y formación del subsiguiente nivel jerárquico ([Deptuck et al., 2008](#)).

Los niveles jerárquicos son definidos a partir de la identificación del desplazamiento lateral entre las partes más gruesas de cuerpos arenosos sucesivos. Se resalta la importancia de los límites de discontinuidades definidas por la erosión, terminación basal o cambios verticales abruptos en las facies, además de la cantidad de coberturas hemipelágicas que separan los cuerpos ricos en arena ([Deptuck et al., 2008](#)).

El nivel jerárquico más pequeño lo constituye la capa o conjuntos de capas que categorizan los depósitos de un único flujo, las cuales se apilan de manera tal que sus partes más gruesas muestran un desplazamiento lateral notable para formar cuerpos anidados aislados que se conocen como elemento de lóbulo ([Deptuck et al., 2008](#)).

Estos elementos de lóbulos constituyen el siguiente nivel jerárquico, que representan los depósitos de un número de flujos sucesivos con propiedades relativamente similares. Estos elementos de lóbulos son reconocidos por su alta capacidad de transposición al alterarse las propiedades del flujo que pueden causar avances, retiros y migración lateral en la posición de la desembocadura del canal al valle del abanico, con posibles apilamientos compensatorio hasta de 500 m ([Deptuck et al., 2008](#)).

Los elementos de lóbulos se apilan en dos o más cuerpos para formar el subsiguiente nivel jerárquico definido como lóbulo compuesto. Estos están separados por superficies discordantes, coberturas delgadas de material fino o cambios verticales bruscos de facies, formando

patrones arbitrarios a causa de cambios de posición en la desembocadura del canal por las avulsiones a pequeña escala. Y pueden mostrar un apilamiento compensatorio hasta de 500 m a 2000 m (Deptuck et al., 2008).

El nivel jerárquico más grande lo constituye el complejo de lóbulos que se forman a partir del apilamiento de lóbulos compuestos alimentados por un canal primario. En este caso el apilamiento ocurre a partir de avulsiones a gran escala en la desembocadura del canal que redirigen bruscamente el suministro de sedimentos y por lo tanto, cambian significativamente las regiones de acumulación de sedimentos más gruesos y estos depósitos usualmente suelen estar cubiertos por depósitos hemipelágicos de varios metros de espesor con apilamientos compensatorios de 3 a 5 km (Deptuck et al., 2008).

El reconocimiento de estas formas de apilamiento constituye el pilar fundamental para el establecimiento de la jerarquía propuesta. Estas formas de apilamiento han sido reconocidas mayoritariamente a partir de reflexiones sísmicas.

2.3. Modelo jerárquico de (Prelat, et al., 2009)

En los trabajos realizados por Prélat et al. (2009); Prelat et al. (2010); Prélat and Hodgson (2013) estos investigadores utilizan como criterio principal los patrones en espesores de estratos para definir los lóbulos, además proponen una jerarquía en sistemas de abanicos de aguas profundas: abanico del Amazonas, en Brasil; el abanico en Zaire, Angola-Congo; el sistema Golo en la Península C orsica, Francia; la cuenca de Kutai, en Borneo, Indonesia; y un complejo de lóbulos en la costa de Nigeria.

2.3.1. Subambientes de depósito sedimentario en lóbulos de aguas profundas

En Prélat et al. (2009) los lóbulos se consideran como cuerpos sedimentarios formados pendiente abajo de un ápice o punto de transición lóbulo-canal. En los lóbulos es posible identificar ciertos elementos que resultan de vital importancia para comprender su estructura interna: el centro volumétrico del lóbulo conocido como centro del lóbulo y las zonas de adelgazamiento o acua amiento lateral y frontal. La longitud del lóbulo es la distancia más larga medida paralelamente al paleoflujo desde el ápice hasta el acua amiento frontal, a lo largo del eje del lóbulo. El ancho del lóbulo es la distancia más larga medida perpendicular a la dirección de paleoflujo y pasa desde el acua amiento lateral hasta el otro acua amiento lateral a través de cuatro ambientes transitorios denominados: orilla distal del lóbulo, orilla del lóbulo, fuera del eje del lóbulo y eje del lóbulo (Figura 2.4).

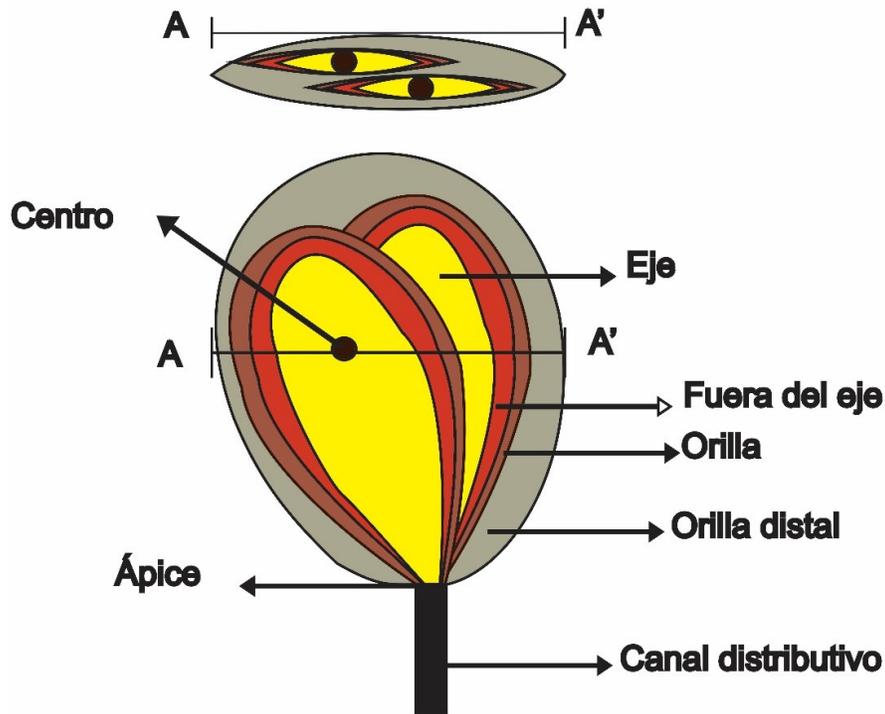


Figura 2.4: Esquema que muestra de una vista en planta y sección transversal de dos lóbulos para indicar los componentes y subambiente en sistemas de lóbulos: eje del lóbulo, fuera del eje del lóbulo, orilla del lóbulo y orilla distal (Prélat et al., 2009).

Estos cuatro ambientes son usados para caracterizar la distribución de facies interna del depósito lobular:

El eje del lóbulo (*eL*) se caracteriza por presentar potentes estratos de arenisca de grano fino > 0.6 m, dada la dinámica intensa del flujo en la parte central del lóbulo, la mayor parte del material fino es removido y los estratos tienden a ser gruesos representando depósitos donde las corrientes de turbidez son localmente erosivas, comúnmente encontrado en posiciones axiales. El eje del lóbulo está representado fundamentalmente por unidades de areniscas amalgamadas > 80 % de arenisca, que son interpretados como depósitos de alta concentración (Prélat et al., 2009; Prelat et al., 2010).

El fuera de eje del lóbulo (*FeL*) se caracteriza por presentar areniscas estratificadas de grano fino con espesores que van desde 0.03 – 0.6 m. Las condiciones hidrodinámicas de flujo son de menor energía que en el eje del lóbulo por lo que se propicia la acumulación de material limoso en una mayor proporción y en las areniscas se presentan estructuras con estratificación planar a ondulada. Aquí suele suceder una intercalación de areniscas con finas coberturas de limolitas. Este ambiente comprende litofacies estratificadas de capas finas a medias y esporádicas amalgamaciones de areniscas en proporciones de 60 % al 80 % (Prélat et al., 2009; Prelat et al., 2010).

La orilla del lóbulo (*O*) se caracteriza por estratos medios delgados de areniscas intercalado con lodolitas. En este ambiente las areniscas están en una proporción del 40 % al 60 % (Prélat et al., 2009; Prelat et al., 2010).

La orilla distal (*OD*) se caracteriza por presentar una estratificación fina, mayoritariamente de limo y arcillas, consistente de alternancias de capas delgadas (0.02 a 0.05 m de espesor)

de lodolitas y areniscas de grano muy fino. En este ambiente las areniscas contenidas son $< 40\%$. Estos paquetes varían entre 0.2 y 2 m en espesor y mantienen un grosor bastante constante, excepto en caso de que depósitos más jóvenes los erosionen (Prélat et al., 2009; Prélat et al., 2010).

El alto porcentaje de arenisca se mantiene desde el eje del lóbulo a la orilla y luego cae bruscamente hacia la orilla distal. Los ambientes del lóbulo pasan transicionalmente de un entorno a otro en decenas de metros y no existe un esquema rígido para este modelo (Prélat et al., 2009; Prélat et al., 2010).

2.3.2. Estructura de la jerarquía estratigráfica en abanicos de aguas profundas

En estos depósitos se identificaron cuatro niveles principales que forman la jerarquía estratigráfica: estrato (E), elemento del lóbulo (EL), lóbulo (L) y complejo de lóbulo (CL), con el principio básico de que cada nivel se apila para formar el siguiente nivel de la jerarquía, es decir; los estratos individuales se apilan para formar elementos de lóbulo; los elementos de lóbulo se apilan para formar lóbulos y los lóbulos se apilan para formar complejos de lóbulos, que conforman los abanicos submarinos (Prélat et al., 2009; Prélat et al., 2010; Prélat and Hodgson, 2013) (Figura 2.5).

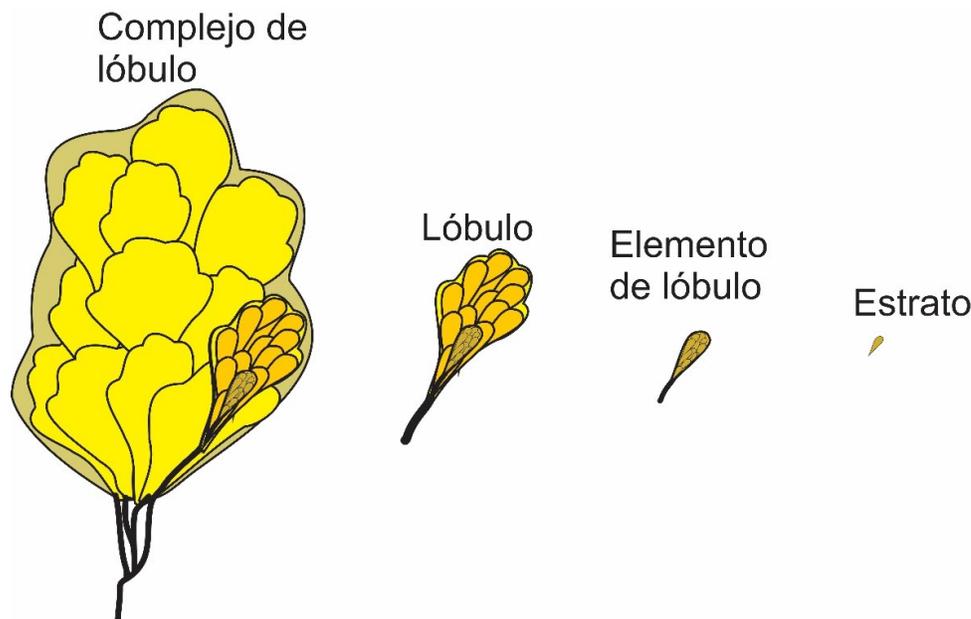


Figura 2.5: Esquema jerárquico propuesto por Prélat et al. (2009) donde se muestran los cuatro niveles de jerarquía: estrato, elemento de lóbulo, lóbulo y complejo de lóbulo. La línea de color negro que bordea el nivel jerárquico resalta el apilamiento y formación del subsiguiente nivel en la jerarquía.

Prélat et al. (2009) reconocen tres unidades de grano fino que separan niveles jerárquicos a diferentes escalas: inter-complejo de lóbulo (ICL), inter-lóbulo (IL) e inter-elemento de lóbulo (IEL). A partir del reconocimiento de estas unidades de granos fino, determinó espesores de

areniscas con rangos de escala para cada nivel jerárquico desde el más pequeño a lo interno del depósito hasta el más grande que integran la configuración de los abanicos submarinos (Figura 2.6).

Las unidades inter-elementos de lóbulo son limolita que delimitan un elemento de lóbulo de otro, es lateralmente continuo y no suele exceder los 0.02 m de espesor, en ocasiones puede aparecer erosionado, dado lugar a la amalgamación de arenas.

Las unidades inter-lóbulo son limolitas y turbiditas de arenisca de grano muy fino que delimitan a un lóbulo de otro, manteniendo una continuidad lateral de aproximadamente > 8 km y su grosor oscila entre 0.2 y 2 m en promedio.

Las unidades inter-complejo de lóbulo son lutitas hemipelágicas que delimitan un complejo de otro. Estas unidades de grano fino pueden alcanzar espesores entre los 2 y 20 m. Estas unidades de grano fino representan una disminución o cese local del aporte sedimentario relacionado al abanico y son sobreyacidas por arenas (Prelat et al., 2010).

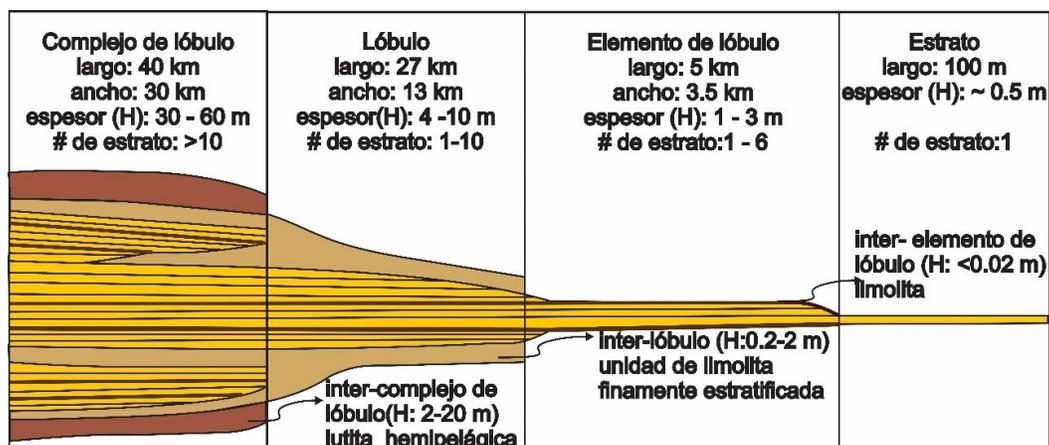


Figura 2.6: Esquema jerárquico propuesto por Prélát et al. (2009) donde se muestran los cuatro niveles de jerarquía: estrato, elemento de lóbulo, lóbulo y complejo de lóbulo con sus respectivas dimensiones (ancho y espesor), apilamiento vertical y las unidades de finos.

El nivel jerárquico más pequeño recocado lo constituye el estrato que representa un único evento de deposición, pero estos no están a escala de resolución sísmica (Gervais et al., 2006; Deptuck et al., 2008; Prélát et al., 2009). En promedio los estratos tienen espesores de 0.5 m y se apilan para conformar elementos de lóbulo.

Los elementos de lóbulo son cuerpos de arena alargados y radiales de hasta 5 km de diámetro y unos pocos metros de espesor. El tamaño y la forma de estos cuerpos es muy variable atendiendo a las características del tipo de cuenca sedimentaria que por sus dimensiones resultan a veces difíciles de ver en registros sísmicos. Estos representan el nivel jerárquico más importante dentro del esquema propuesto por Prélát et al. (2009), porque constituye la unidad arenosa más pequeña en la cual se identifica el material de grano fino (< 0.02 m) de espesor, pues representa un conjunto de únicos eventos sedimentarios genéticamente relacionados. Estos depósitos pueden llegar a alcanzar hasta los 5 m de espesor, dependiendo de las condiciones de formación, que para cada caso tiene características muy peculiares.

Comúnmente suelen aparecer amalgamados, sobre todo cuando se forman en el eje del lóbulo (Prélat et al., 2009; Prelat et al., 2010).

Prélat and Hodgson (2013) propusieron que los lóbulos presentan patrones estratigráficos de engrosamiento y adelgazamientos muy típicos que se pueden relacionar con la posición dentro del lóbulo en el cual se formaron. Se reconocen 5 patrones en la estratificación de los lóbulos: estratocreciente, estratodecreciente, estratocreciente-estratodecreciente, estratodecreciente-estratocreciente y espesores constantes. Estos tienen gran importancia pues constituyen los principales patrones que se pueden observar de manera general en la estructura interna de los lóbulos (Figura 2.7).

El nivel jerárquico conocido como lóbulo se forma a partir del apilamiento de sucesivos elementos de lóbulos. Los lóbulos son cuerpos predominantemente arenosos que se alimentan por canales. Los lóbulos individuales son alimentados por un único canal y la avulsión o migración de este propicia el depósito del siguiente lóbulo (Prélat et al., 2009). Cuando varios lóbulos se apilan dan lugar a la formación del nivel jerárquico complejo de lóbulo el cual constituye el nivel jerárquico más grande reconocido dentro de los abanicos y conforman los sistemas más importantes de acumulación de material terrígeno a las cuencas marinas profundas (Prélat et al., 2009; Prélat et al., 2010; Prélat and Hodgson, 2013).

Lo más significativo de la propuesta jerárquica de Prélat et al. (2009), es que independientemente del área de estudio, los datos pueden ser analizados bajo este modelo jerárquico, que como base principal utiliza los espesores, reconocimiento crítico de depósitos de grano fino y los patrones deposicionales que se presentan en cada depósito lobular a diferentes rangos de espesores, sin ser esquemáticos. Los estudio realizados en Prélat et al. (2010) reportan espesores de mayor rango que los reportados en Prélat et al. (2009), debido a que influyen las condiciones de formación y espacio de acomodamiento en la cuenca así como la cantidad de material terrígeno que arriba a esta. El componente que más se repite en todas la jerarquía es el lóbulo por lo cual se considera el componente más estudiado (Tabla 2.1).

Sistemas de depósito	Jerarquía encontrada	Número de lóbulos	Espesor de lóbulo (m)
Abanico 3 (depo-centro de la Cuenca Tanqua Karoo, Sudáfrica)	Estrato - Elemento de lóbulo - Lóbulo - Complejo de lóbulo	5	3 - 14
Complejo de lóbulos (Abanico del Amazonas, Brasil)	Sub-unidad - Lóbulo - Complejo de lóbulo	15	10 - 25
Abanico de Zaire (costa afuera Angola-Congo)	Lóbulo - Complejo de lóbulo	4	hasta 10
Sistema de abanicos (Península Córstica, Francia)	Estrato - Elemento de lóbulo - Compósito de lóbulo - Complejo de lóbulo	11	14 - 38
Cuenca Kutai (Indonesia)	Elemento de lóbulo - Lóbulo - Abanico	17	22 - 47
Complejo de lóbulos (Costa de Nigeria)	Lóbulo - Complejo de lóbulo	8	26 - 42

Cuadro 2.1: Espesores y jerarquía estratigráfica en seis sistemas de depósitos lobulares de aguas profundas (Prélat et al., 2010).

Capítulo 3

Transformada de ondícula

En los últimos años, varios investigadores en el campo de las ciencias de la tierra han documentado diferentes aplicaciones de métodos de análisis espectral en la interpretación de datos geológicos y geofísicos por ejemplo: [Alvarez et al. \(2003\)](#); [Yu et al. \(2008\)](#); [Coconi-Morales et al. \(2010\)](#); [Verma et al. \(2012\)](#); [Perez-Muñoz et al. \(2013\)](#) entre otros; para el reconocimiento de asociaciones de facies y electrofacies, que refuerzan la caracterización de yacimientos de hidrocarburos.

La transformada de ondícula ofrece la ventaja de realizar un análisis de multiresolución o multiescala, que permite descomponer una señal en varias escalas, que nos pueden ayudar a comprender perturbaciones, discontinuidades, así como detalles en las señales.

La transformada ondícula a diferencia de la transformada de Fourier, es más adecuada para realizar un análisis de multiresolución en señales no estacionarias. Sin embargo, para comprender la transformada de ondícula es necesario comenzar por la transformada de Fourier y así resaltar la fortaleza de la transformada ondícula sobre la transformada de Fourier para este caso en específico donde se trabaja con señales no estacionarias como los registros geofísicos de pozo.

La transformada de ondícula se ha convertido en una herramienta de apoyo en interpretación estratigráfica con fines de apoyo a la exploración petrolera, y los estudios revisados han obtenido resultados que en muchas ocasiones son consistentes con los contextos geológicos, sin embargo, la literatura no reporta que esta se haya utilizado con el propósito de estudiar la jerarquía estratigráfica en depósitos marinos de aguas profundas, como son los sistemas de abanicos submarinos.

3.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier, es una transformación en la cual se descompone una señal, que constituye básicamente el espectro de frecuencias de la señal, es decir nos permite llevar los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, que en ocasiones resulta más cómodo para analizar la señal, ya que este espectro de frecuencia refleja las pulsaciones de la señal.

La transformada de Fourier expresa una función periódica como una suma de exponenciales complejas periódicas [Castro \(2002\)](#); tal como se muestra en las ecuaciones (Ec 3.1) y Ec 3.2).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{-2\pi ft} df \quad (3.2)$$

Donde $X(f)$: Transformada de Fourier de la señal en el dominio del tiempo $x(t)$

$x(t)$: es la señal o función dependiente del tiempo

f : frecuencia

Muchos aspectos temporales de la señal, tales como el comienzo y el fin de una señal finita y el instante de aparición de una singularidad en una señal transitoria, no pueden ser analizados adecuadamente por el análisis de Fourier. Para los casos de señales no estacionarias y transitorias surgió otra alternativa: la Transformada de Fourier con Ventana que se expondrá a continuación.

3.2. Transformada de Fourier con ventana

La transformada de Fourier con ventana surge como una alternativa, a aquellas señales cuyo espectro de frecuencia es variable en el tiempo o el espacio (señales no estacionarias). La variación de la señal en el espacio o en el tiempo, es algo muy común en los RGP, ya que estos registran una señal de una determinada propiedad litológica (radioactividad, densidad, resistividad) que depende del tipo de roca, pero además varían con los cambios litológicos y con la profundidad.

Gabor (1946) encontró una solución para encontrar la transformada de aquellas señales variables en el tiempo, creando una función ventana deslizante que calcula las transformadas de Fourier por tramos en los que considera la señal como estacionaria, hasta que barre la señal completamente. Una ventaja que ofreció este método es que logró determinar el espectro de frecuencia para cada tramo de la señal, dependiendo del tamaño de la ventana. Lo cual puede resumirse en las ecuaciones (Ec 3.3) y Ec 3.4).

$$w(t) = e^{-\frac{at^2}{2}} \quad (3.3)$$

$$TFV(t', f) = \int_t [x(t)w^*(t - t')]e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.4)$$

Donde $w(t)$ es la función ventana y $TFV(t', f)$ es la transformada de Fourier con ventana.

Si tenemos el control del ancho de la ventana, y solapamos la función ventana con la señal, podemos multiplicar esta función ventana por la señal original a la cual se le aplicará la transformada de Fourier mediante una convolución. Entonces se obtiene como resultado una transformada de Fourier para el tramo de la señal analizada que se corresponde con el ancho

de la ventana seleccionada. Si en ese tramo la señal es estacionaria pues entonces se conocerá su espectro de frecuencia exacto para el ancho de la ventana. Lo siguiente sería deslizar toda la ventana hasta conocer su espectro de frecuencia para cada intervalo de tiempo correspondiéndose con el ancho de la ventana. Sin embargo lo anteriormente explicado presenta un pequeño problema, siguiendo el principio de incertidumbre de [Heisenberg \(1925\)](#); en el cual se establece “la imposibilidad de que determinados pares de magnitudes físicas observables y complementarias sean conocidas con precisión arbitraria”. En nuestro caso de estudio se traduce en que es imposible conocer la representación exacta tiempo-frecuencia de una señal, porque se sólo se puede conocer los intervalos de tiempo en los cuales existen determinadas bandas de frecuencia, por lo tanto, aparece un problema de resolución ([Castro, 2002](#)).

El contenido de frecuencia aplicando la transformada de Fourier con ventana va a depender en gran medida del ancho de la ventana, sin embargo esta ventana es de longitud finita, ya que su tamaño es asignado, pero solo se aplica a pequeños tramos de la señal consecutivamente hasta barrerla completa, al realizar esta operación se introduce un error que conlleva a una disminución en la resolución en el contenido de frecuencia de la señal original. Por tanto sólo es posible conocer una banda de frecuencias y no un valor exacto de frecuencias ([Castro, 2002](#)).

En principio la solución al problema sería seleccionar una ventana lo suficientemente pequeña donde la señal se considere estacionaria, pero la señal sería segmentada en un mayor número de ventanas de tamaño finito, por lo cual disminuiría la resolución en términos de los contenidos de frecuencia en la señal original. Entonces existe una desventaja en este sentido, que se resolvería en cierta medida, dependiendo de las características propias de la señal: si la señal presenta contenidos de frecuencia bien definidos y espaciado en la señal, pues será más fácil aplicar este procedimiento escogiendo una ventana adecuada, lo cual no es una tarea muy fácil. Pero qué sucederá en el caso de una señal cuyos contenidos de frecuencia no se encuentren bien definidos y espaciados. Pues entonces surgió la necesidad de encontrar una transformada que solucionara, el problema de la resolución implícito en la transformada de Fourier con ventana, lo cual dio lugar a la teoría de las transformadas ondícula que resuelven en gran medida este pequeño detalle.

3.3. Transformada de ondícula

La transformada de ondícula es una herramienta matemática que permite detectar en una señal no estacionaria (en nuestro caso “registros geofísicos de pozo”) puntos de ruptura, discontinuidades y la localización de eventos más puntuales, como interfaces litológicas o estratigráficas.

Esta tiene como ventaja que la señal es escalada de una ondícula madre y durante su procesamiento se puede localizar un evento simultáneamente en el dominio del tiempo o el espacio y la frecuencia ([Misiti et al., 2007](#)) (Figura 3.1).

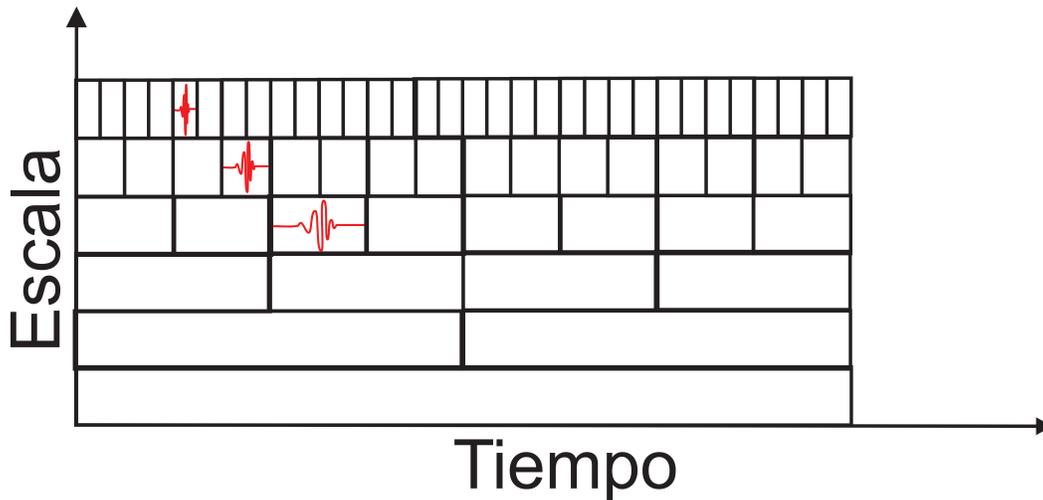


Figura 3.1: Muestra el dominio tiempo-escala al aplicar una transformada de ondícula (análisis multiescala).

La detección de interfaces estratigráficas puede ser visualizada con la respuesta de los registros geofísicos de pozo causada por la variación repentina en la señal. Estos cambios abruptos en la señal indican cambios repentinos en los parámetros medidos por cada herramienta en las capas de los depósitos (Verma et al., 2012).

A diferencia de la transformada de Fourier y la transformada de Fourier con ventana, la transformada de ondícula utiliza una ventana modulada que resuelve el problema de segmentar la señal, la ventana es desplazada por toda la señal y se calcula el espectro de frecuencia. Este proceso es repetido varias veces con una ventana más pequeña para cada nuevo ciclo. Al final esto da como resultado una representación de la señal en el dominio tiempo-frecuencia a diferentes escalas, por lo que se puede considerar como un análisis multiresolución de la señal García López et al. (2005); donde tener una buena resolución temporal trae consigo una pérdida de resolución en la frecuencia y viceversa.

El análisis de la transformada de ondícula de un RGP usando una ondícula madre adecuada se obtiene a través de la variación del factor de escala s y traslación τ definidos por la ecuación (Ec 3.5).

El principal logro de la transformada ondícula sobre los otros métodos para el análisis de señales, radica en que permite el análisis de la señal en el dominio de la frecuencia y el dominio tiempo simultáneamente. Esto se logra mediante una función denominada “ondícula madre”.

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{|\sqrt{s}|} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (3.5)$$

Donde ψ es una función del espacio de Hilbert con la condición de que es:

- Una base ortonormal del espacio de Hilbert que se genera a partir de que la señal se traslada una distancia τ y cambia de escala en un factor s .
- Son oscilatorias y están centradas en el origen y decrecen rápidamente a cero cuando el módulo de x tiende a infinito.
- Son cuadrado integrables, para señales de energía finita del espacio de Hilbert tal que se cumpla la condición de amplitud (Ec 3.6) :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |u(x)|^2 dx < \infty \quad (3.6)$$

Donde τ y s son los parámetros de traslación y escala respectivamente. Los parámetros de la función madre son muy importantes para el cálculo de la misma. El término traslación tiene el mismo sentido que en la transformada de Fourier con ventana, que se relaciona con la localización de la ventana a medida que ésta se desplaza a través de la señal. El término de traslación se considera como el tiempo en el dominio transformado, sin embargo, no se tiene un parámetro que sea la frecuencia como si se tenía antes en el caso de la transformada de Fourier con ventana [Castro \(2002\)](#). En el caso de la transformada ondícula se tiene un parámetro de “escala” (Ec 3.7).

$$escala = \frac{1}{frecuencia} \quad (3.7)$$

El término “*escala*” se considera como análogo al parámetro de escala presentado en los mapas. Si aplicamos este concepto a nuestro espectro de frecuencias, podríamos inferir que las altas frecuencias (pequeña escala y señales comprimidas) nos darán información detallada de la señal, mientras que las bajas frecuencias (grandes escalas y señales dilatadas) nos dan una información más global de la señal en el tiempo o el espacio (Figura 3.2).

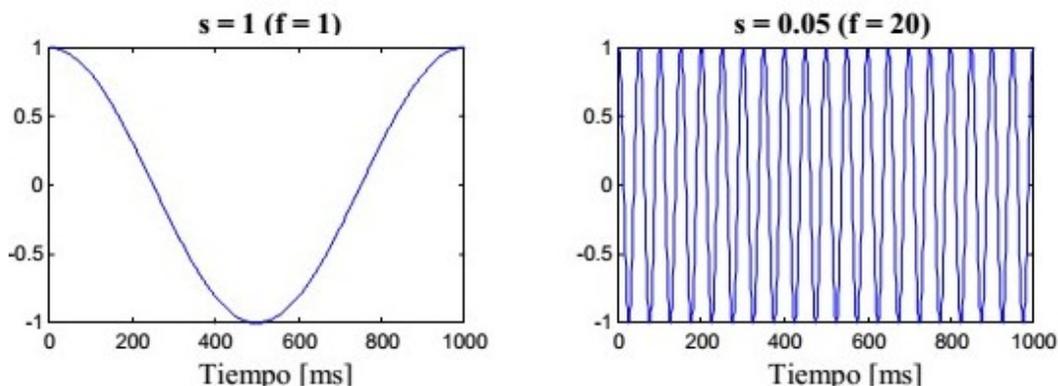


Figura 3.2: Dos señales cosenos con diferentes frecuencias $f=1$ y $f=20$, donde se observar que para la frecuencia 20 la señal está comprimida, mientras que para la frecuencia 1 la señal está dilatada, tomado de [Castro \(2002\)](#)

En la transformada ondícula se realiza una convolución de la señal con la ondícula madre. La transformada ondícula es calculada para diferentes segmentos de la señal desplazando la función madre por un factor τ con una escala de resolución s . En la práctica se utilizan varias familias de “ondícula madres” que se obtienen mediante el escalamiento y desplazamiento de la función madre (Figura 3.3).

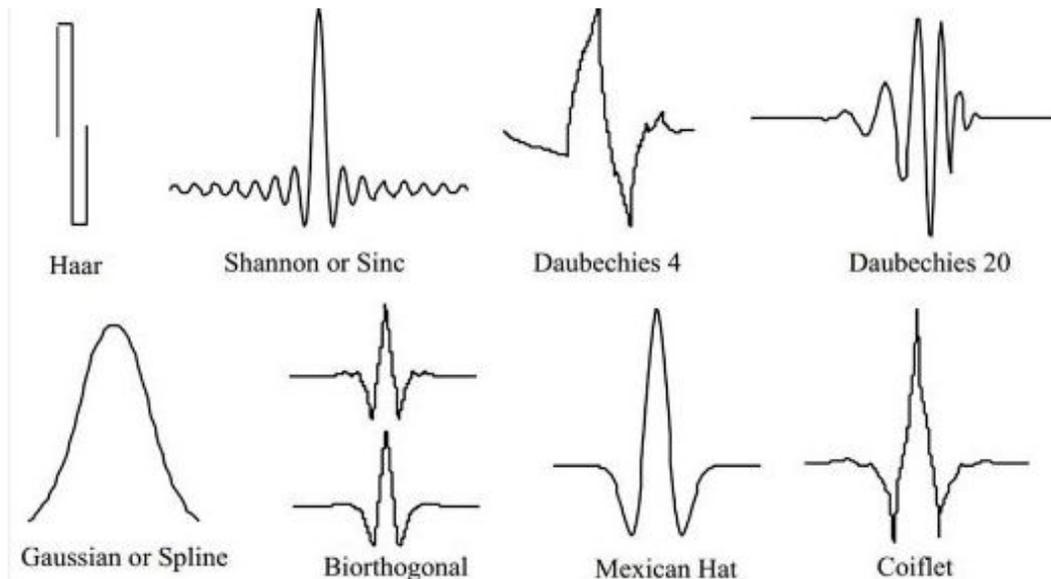


Figura 3.3: Las ondículas madres más comunes que se utilizan en la práctica tomado de [Castro \(2002\)](#)

3.4. Tipos de transformada de ondícula

Las transformadas de ondícula según la manera en que son analizadas y según el tipo de información que se quiere mostrar, se pueden subdividir en dos grupos fundamentales: transformada de ondícula continua y transformada ondícula discreta. La diferencia entre ellas radica principalmente en la forma en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados para determinarlas. La transformada ondícula es capaz de revelar información de interés a través de escalogramas (gráficos profundidad-escala) producto de la transformada ondícula continua y análisis multiresolución a partir de la transformada ondícula discreta. Con este proceso se obtienen los coeficientes de la ondícula que registran la variación en la respuesta de los *RGP* y se presume que ocurren debido a los cambios litológicos en el subsuelo ([Verma et al., 2012](#)).

3.4.1. Transformada de ondícula continua

La transformada ondícula continua es aquella en la cual la señal es contraída y dilatada de manera continua en el tiempo [Goupillaud et al. \(1984\)](#); es decir los parámetros cambian de forma continua. La transformada de ondícula continua es una convolución entre la señal $x(t)$ y un conjunto de funciones generadas por la ondícula madre (Ec 3.8).

$$C(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{\tau,s}^*(t)dt \quad (3.8)$$

La matriz de los coeficientes de la ondícula $C(\tau, s)$ se llama escalograma e indica la localización de frecuencia a diferentes escalas y espacio. Para su interpretación, el escalograma se representa en una escala de colores que representa la magnitud de los $C(\tau, s)$ de la ondícula. Esta

representación ofrece la máxima libertad en la elección de la ondícula, con la única restricción que satisfaga la condición de media nula. Esta condición permite que la transformada ondícula continua sea invertible en rango (Castro, 2002). La señal puede ser reconstruida utilizando la transformada inversa (Ec 3.9).

$$x(t) = \frac{1}{K_\psi} \iint C(\tau, s) \frac{\psi_{\tau, s}}{\tau^2} d\tau ds \quad (3.9)$$

Donde ψ satisface la condición de media nula comentada anteriormente con K_ψ dada en la ecuación (Ec 3.10).

$$K_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{w} dw \quad (3.10)$$

3.4.2. Transformada de ondícula discreta

En los casos en que la señal a analizar sea una función discreta $f(n)$ con N muestras, la transformada viene dada por la ecuación (Ec 3.11):

$$C[j, k] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f(n) \psi_{j, k}[n] \quad (3.11)$$

Donde ψ representa la función ondícula, la cual es dilatada o contraída por el factor de escala entero j , y trasladada en tiempo por el factor τ . Al discretizar la función madre, esta se va a mostrar en intervalos discretos, donde los parámetros τ y s están definidos según la escala diádica, de manera que:

$$\tau = 2^j \quad y \quad s = 2^j k$$

La expresión anteriormente definida nos arroja un conjunto de N coeficientes que representan los datos en el dominio ondícula. Los coeficientes representan una correspondencia entre la señal de entrada y la función ondícula de descomposición para cada valor particular de traslado τ y escala j ; siendo $\psi_{j, k}$ una ondícula discreta dada por la ecuación (Ec 3.12).

$$\psi_{j, k}[n] = 2^j \psi[2^j n - k] \quad (3.12)$$

Para la transformada ondícula discreta la señal puede ser reconstruida utilizando la transformada inversa (Ec 3.13).

$$f[n] = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C[j, k] \psi_{j, k}[n] \quad (3.13)$$

3.5. Análisis multiescala

El análisis multiescala brinda la posibilidad de un acercamiento a los diferentes niveles de detalle a partir de la descomposición de una señal discreta. Su principal objetivo es encontrar los coeficientes ondícula $C[j, k]$ y reconstruir la función que estos representan para lograr la representación tiempo-escala de una señal (Castro, 2002). Para realizar esta operación

se utilizan filtros con distintas frecuencias de corte que son usados para analizar la señal en diferentes escalas, el cual descompone la señal en diferentes niveles de resolución. En el análisis multiescala la transformada ondícula discreta analiza la señal descomponiéndola en una aproximación y en un detalle (nivel), considerando diferentes bandas de frecuencias con distintas resoluciones para cada nivel (González, 2014). A la señal se le aplican dos filtros: un filtro pasa baja $\phi_{j,k}$ y un filtro pasa alta $\psi_{j,k}$, los cuales están asociados a funciones de escalamiento y funciones ondícula respectivamente. Estas funciones según Mallat (1989), están dadas por las ecuaciones (Ec 3.14) y (Ec 3.15):

$$\phi_{j,k}(n) = 2^{\frac{j}{2}}\phi(2^j n - k) \quad (3.14)$$

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j n - k) \quad (3.15)$$

Donde j denota el nivel de escala y k la traslación en el nivel de escala. Después de aplicar el proceso de filtrado, según la regla de Nyquist, puede utilizarse la mitad de las muestras, ya que tendrían una frecuencia mayor, y sería algo redundante trabajar con todas las muestras otras veces. El procedimiento anterior puede ser aplicado y puede repetirse para conseguir una mayor descomposición, en este caso en cada etapa, el filtrado y el submuestreo darán como resultado una disminución a la mitad del número de muestras (resolución en el tiempo dividida) y de la banda de frecuencias abarcada (resolución en frecuencia duplicada) (González, 2014)(Figura 3.4).

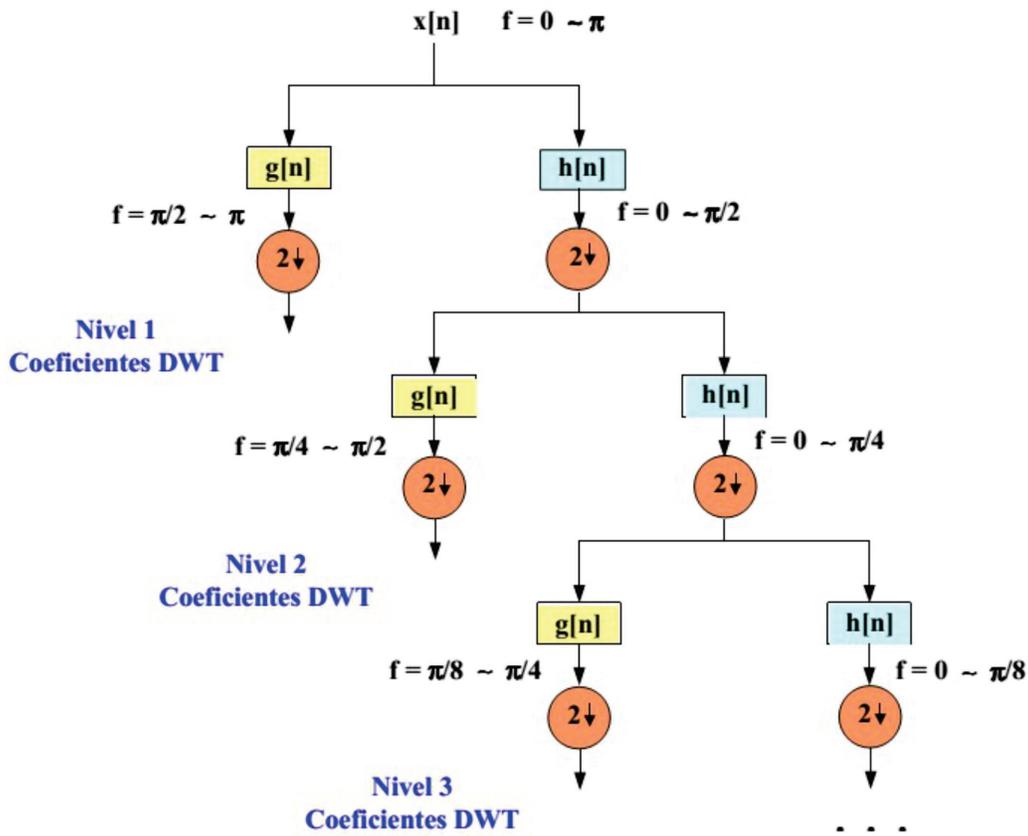


Figura 3.4: proceso de filtrado donde $g(n)$ corresponde al filtro pasa alta y $h(n)$ corresponde al filtro pasa baja., mostrando el filtrado y el submuestreo de la señal, tomado de [Castro \(2002\)](#)

Al realizar cada filtrado o a la salida de aplicar cada filtro se obtiene un nivel de detalle y por consiguiente un coeficiente de la transformada ondícula discreta. Los cuales están dados por las ecuaciones (Ec 3.16) y (Ec 3.17):

$$W_{\phi}(j, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n f[n] \phi_{j,k}[n] \quad (3.16)$$

$$W_{\psi}(j, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n f[n] \psi_{j,k}[n] \quad (3.17)$$

Donde $W_{\phi}[j, k]$ es el coeficiente de escala (aproximación) y $W_{\psi}[j, k]$ es el coeficiente de la ondícula (detalle).

Por lo que la transformada ondícula de la señal se podría obtener concatenando todos los coeficientes calculados, comenzando desde el último nivel de descomposición. Teniendo en cuenta que los filtros utilizados forman una base ortonormal, entonces se puede llevar a cabo la reconstrucción de la señal mediante un proceso inverso, en este caso aplicando la transformada ondícula inversa.

Capítulo 4

Metodología general

En este capítulo se explican los materiales y métodos utilizados para el desarrollo de la investigación para la aplicación de la transformada de ondícula a registros geofísicos de pozo para apoyar el estudio de la jerarquía estratigráfica de depósitos areno-arcillosos de aguas profundas o abanicos submarinos.

4.1. Modelo geológico-conceptual

Se construyó un modelo geológico conceptual basado en los estudios de [Prélat et al. \(2009\)](#); [Prelat et al. \(2010\)](#); [Prélat and Hodgson \(2013\)](#) basado en los principios de su arquitectura y jerarquía estratigráficas, cambio lateral en las tendencias de espesor, geometrías y volúmenes deposicionales, distribución de litofacies, y patrones de apilamiento. Se modeló la geología de un sistema de abanicos compuesto por tres complejos de lóbulos superpuestos uno sobre el otro, desde el más antiguo hasta el más joven simulando las dimensiones de largo, ancho y espesor basado en datos reales. Se realizó el modelo geológico con una vista en planta y en profundidad mostrando tres grandes cuerpos areno-arcillosos. Partiendo de las características del tipo de ambiente sedimentario se simuló la propuesta de proyección de tres pozos que intersectan estratégicamente los tres cuerpos. Con los tres pozos proyectados en base a la zona de corte del cuerpo se definieron tres columnas estratigráficas consistentes en el ambiente sedimentario y la estratigrafía del depósito. Para las columnas sedimentarias se propuso las características litológicas y patrón estratigráfico de este tipo de ambiente con intercalaciones de arenisca, arenisca arcillosa, lutita arenosa y lutita, intercalas entre sí según la zona y condiciones de ambiente depósito.

4.2. Estructura jerárquica del MGC

Se construyó un modelo de jerarquía consistente en un sistema de abanico compuesto por tres cuerpos areno-arcilloso, separados por cuerpos de lutitas de gran espesor. Este modelo sirvió de apoyo para la comprensión de lo que se quiere estudiar, que es la jerarquía estratigráfica en el depósito. La jerarquía se definió en función de las características y la geometría de las unidades de grano fino que limitan los cuerpos de arenisca siguiendo el principio básico de que uno o más componentes ricos en arena son separado por espesores de grano fino los cuales se apilan para formar el siguiente componente más grande en la jerarquía. El modelo de jerarquía fue realizado siguiendo los patrones descritos en el Capítulo 2, basándonos en el

principio de que el concepto de jerarquía está relacionado con la forma, espesor y ambiente geológico en la cual se disponen los cuerpos sedimentarios. Los patrones de espesores fueron realizados teniendo en cuenta los modelos analizados en el Capítulo 2 donde se contemplan tres niveles jerárquicos : complejo de lóbulo, lóbulos, elementos de lóbulos. Se omitió el nivel jerárquico “estrato” por cuestiones de resolución.

4.3. Electrofacies y registros sintéticos del MGC

El modelo de electrofacies consistió en la elaboración de tres registros geofísicos sintéticos disponibles en formato de .xls y txt, donde se asignaron valores de rayos gamma en correspondencia con la propuesta MGC y del modelo de jerarquía estratigráfica con las características litológicas, estratigráficas, ambiente de depósito y la proporción areno-arcillosa que guían los rangos de valores de rayos gamma propuesto en el trabajo de [Guzmán-Hidalgo \(2012\)](#).

4.4. Validación del MDS

Con el apoyo del software Matlab 2019a se utilizó la caja de herramientas wavelets y se crearon scripts para mejorar la velocidad de procesamiento y obtención de los datos. Se aplicó la transformada de ondícula usando la ondícula Coiflet 3 a los registros sintéticos con la cual se calculó los coeficientes de la ondícula. A partir del cálculo de los coeficientes de la ondícula se obtuvieron los escalogramas con los cuales se visualizó la estructura interna del modelo geológico, organizado en paquetes estratigráficos definidos a distintas escalas. Otra forma de visualizar la información fue a partir del cálculo de las líneas de coeficientes que consistió en promediar las n filas que constituyen la matriz de coeficientes, obteniéndose un valor promedio de los coeficientes de la ondícula a diferentes escalas en coincidencia con los valores asignados en el modelo geológico y el de electrofacies.

Se calcularon los puntos de inflexión en las líneas de coeficientes. Este cálculo se obtuvo ajustando un modelo lineal de mínimos cuadrados a la línea de coeficientes, eligiendo la cantidad de puntos a ajustar hasta suavizar la curva y eliminar la dispersión de los datos. Luego se aplicó la condición de cálculo del punto de inflexión (segunda derivada igual cero y encontrar los cortes en cero). Los puntos de inflexión determinados al coincidir con los puntos de interface litológico permiten obtener la coordenada (intensidad del coeficiente vs profundidad) a la cual ocurre el cambio en la señal. La diferencia entre los valores de la profundidad en cada punto de inflexión arroja los intervalos estratigráficos con intensidad de coeficientes que se corresponden con material rico en arena o rico en arcilla. Lo que se pretende averiguar es la jerarquía estratigráfica por tanto el valor tomado en cuenta fue el de la profundidad a la cual ocurrió la interface litológica para verificar la forma en que se agrupan los conjuntos de espesores.

4.5. Aplicación a un caso de estudio

El procedimiento validado con datos sintéticos se aplicó al caso de estudio de los pozos coyotes obteniéndose una propuesta de la jerarquía estratigráfica del mismo. El cual es consistente con los modelos geológicos descritos en el Capítulo 2. El esquema metodológico se resume en la Figura 4.1:

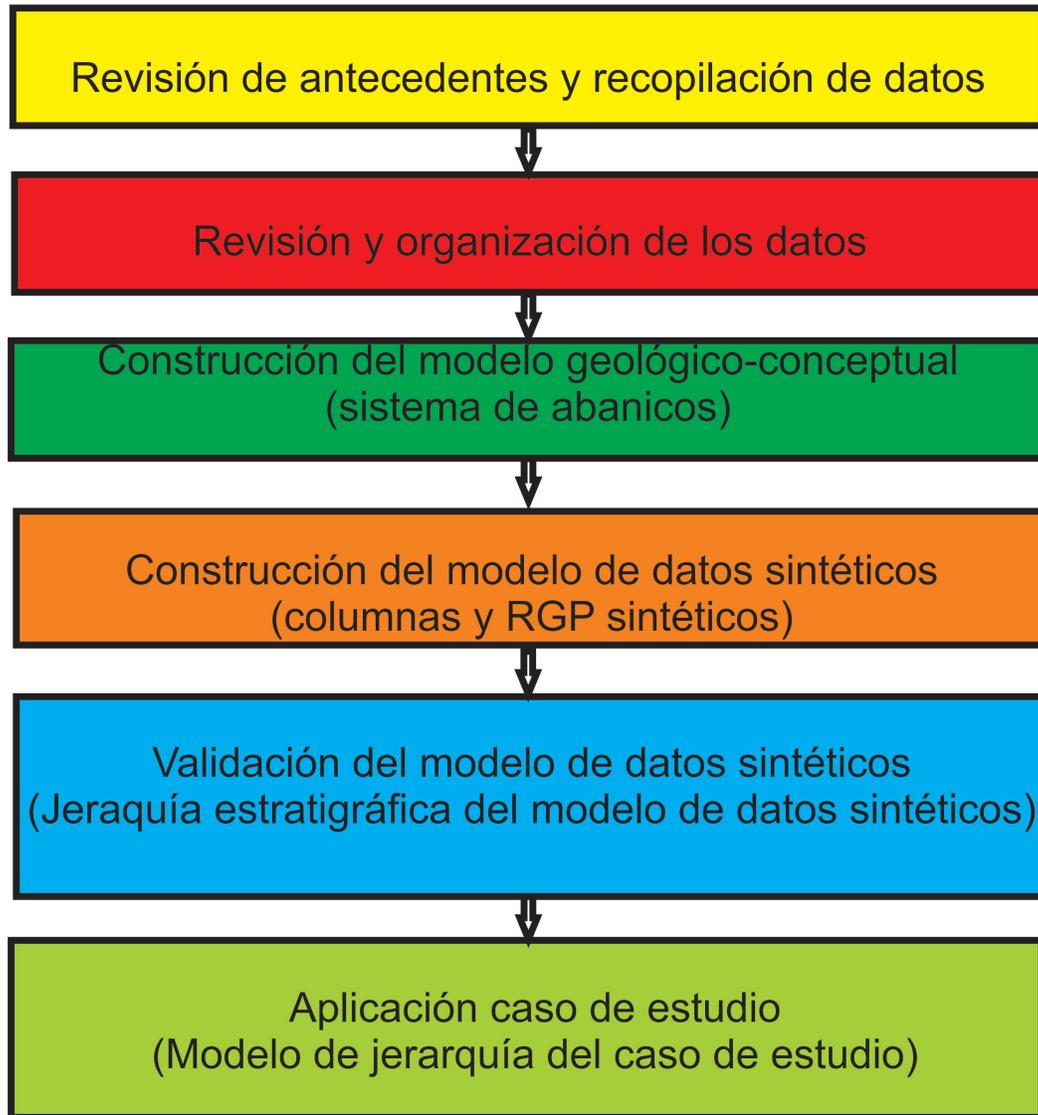


Figura 4.1: Esquema metodológico para obtener la jerarquía estratigráfica de depósitos lobulares de aguas profundas.

Capítulo 5

Validación del modelo de datos sintéticos(MDS)

En este capítulo se describe la construcción del modelo geológico conceptual (sistema de abanicos), en cada una de sus etapas. Se construye la arquitectura estratigráfica del sistema de abanicos y se traduce la arquitectura modelada a un contexto de datos. Los datos se expresan como registros de rayos gamma sintético, cuyos valores comprenden los rangos verificados en estudios de casos reales. Con estos datos se logra replicar la jerarquía estratigráfica propuesta inicialmente.

5.1. Modelo geológico conceptual para depósitos lobulares de aguas profundas

Se realizó la construcción de un modelo geológico conceptual (sección 2.3) para depósitos lobulares a partir de los referentes teóricos de la literatura, con la cual se modelaron los registros de rayos gamma con la arquitectura estratigráfica de un depósito sedimentario consistente de tres complejos de lóbulos, donde se consideran los cambios de facies (laterales y verticales) que estos presentan.

En este modelo sedimentológico sintético se parte de que los depósitos lo constituyen un cuerpo predominantemente arenoso perforado, con un espesor aproximado de 160 m que va desde 540 m hasta los 700 m de profundidad, de modo que simulan depósitos pertenecientes a abanicos submarinos.

Los depósitos contienen estructura jerárquica basada en las características de los modelos conceptuales definidos por [Prélat et al. \(2009\)](#), sobre la base de las descripciones teóricas y prácticas explicadas en el Capítulo 1.

Los horizontes de arcilla son los elementos fundamentales para marcar los límites entre depósitos arenosos. Estos depósitos finos se denominan horizontes guías y también marcan límites estratigráficos jerárquicos en función de los espesores y las facies que los conforman.

La estructura sintética es un abanico mayoritariamente arenoso compuesto por tres complejos de lóbulos. De los sistemas de abanicos solo se toma como zona de estudio una parte de los elementos de acumulación como lóbulos submarinos [Deptuck et al. \(2008\)](#), cuyos elemento jerárquico más grande es el complejo de lóbulo (*CL*).

El modelo muestra tres (*CLs*), siendo el (*CL1*) el más antiguo y el (*CL3*) el más joven. Cada (*CL*) está limitado por un espesor de lutitas superior a los cinco metros. Cada uno de estos

(*CLs*) es perforado por tres pozos ubicados de manera que reflejan los diferentes cambios de facies (laterales y verticales) entre pozos (Figura 5.1).

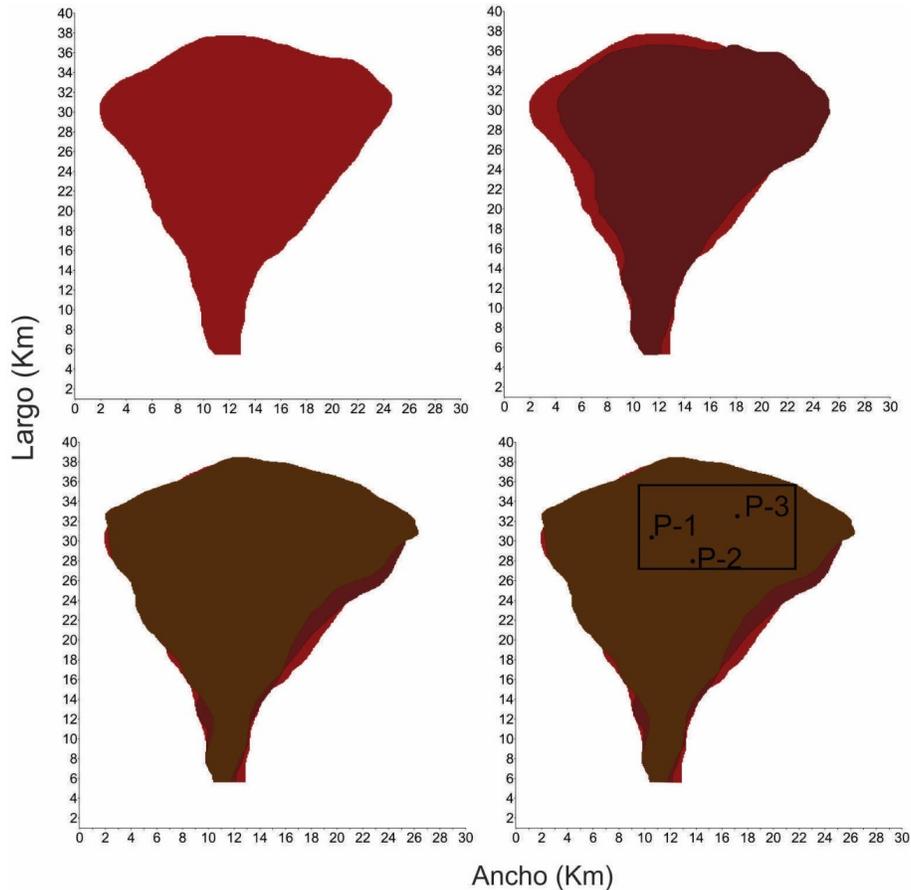


Figura 5.1: Vista en planta del modelo de sistema de abanicos propuestos. Zona de los complejos de lóbulo donde se proyectaron los tres pozos. Muestra la superposición de un complejo sobre otro y la zona de los depósitos lobulares con los pozos propuestos encerrada en un rectángulo: *P1*, *P2* y *P3*.

Los depósitos de lutitas hemipelágicas son conocidos como inter – complejos de lóbulos que separan unidades de complejos lobulares. En el modelo propuesto la cantidad de horizontes finos es igual a $n - 1$ cantidad de depósitos arenosos que separa, según el nivel jerárquico (Tabla 5.1).

5.1.1. Descripción de la arquitectura y jerarquía de los complejos de lóbulos

Los depósitos lobulares tienen variaciones en el contenido de arena y limo según el ambiente del lóbulo, que va desde un ambiente rico en arena (eje del lóbulo) hasta un ambiente rico en finos (orilla del lóbulo). Esto lo denotaremos como: eje (mayoritariamente arenoso), fuera de eje arenisca limosa (arena > limo), orilla (limo > arena) lutita arenosa y orilla distal

Complejo de lóbulos	Número de lóbulo	Largo (N-S) (Km)	Ancho (E-W) (Km)	Espesor (m)		
				<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>
<i>CL3</i>	6	34.4	24.2	35	34	33.2
<i>ICL2-3</i>				10	8.5	9.3
<i>CL2</i>	4	32.5	21.3	42	43.4	41.6
<i>ICL1-2</i>				9.3	8.1	9.6
<i>CL1</i>	5	32.8	23	44	44.8	44.8

Cuadro 5.1: Arquitectura estratigráfica del modelo geológico conceptual

(mayoritariamente limoso) (Figura 5.2).

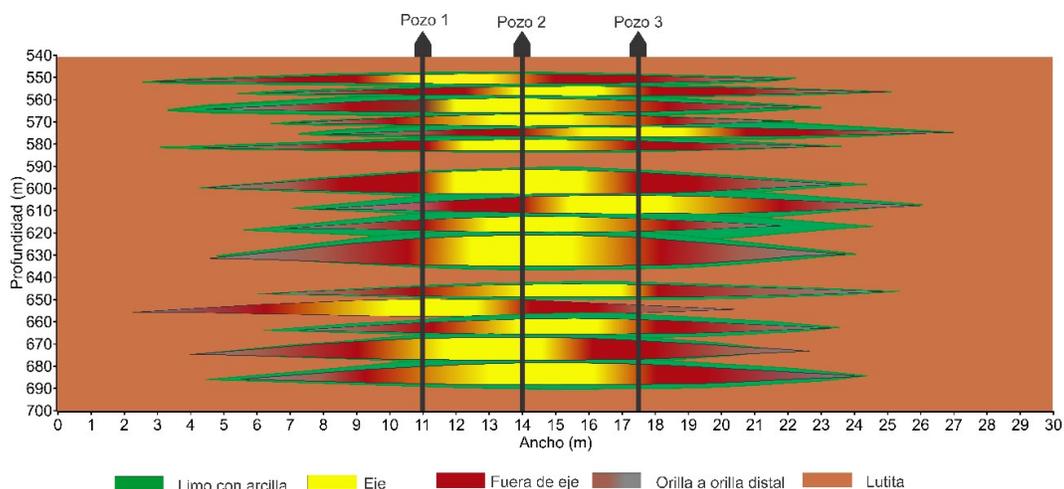


Figura 5.2: El modelo geológico conceptual con los tres pozos proyectados en profundidad cortando los *CLs* y mostrando los diferentes subambientes de los lóbulos.

En el ejemplo propuesto el *CL1* representa el primer depósito arenoso y está conformado por cinco lóbulos (*L1*, *L2*, *L3*, *L4* y *L5*) con espesores variables. Separados por unidades interlobuladas compuesta por depósitos de grano fino (*IL1*, *IL2*, *IL3* y *IL4*). Cada lóbulo contiene en promedio de dos a cuatro elementos de lóbulos, los cuales a su vez están separados entre sí por depósitos finos de 0,02 m de material fino conocidos como inter-elementos de lóbulo (Figura 5.2).

El *CL2* está conformado por cuatro lóbulos (*L1*, *L2*, *L3* y *L4*) con espesores variables. Separados por unidades interlobuladas de grano fino (*IL1*, *IL2* y *IL3*). Cada lóbulo contiene en promedio de tres a cinco elementos de lóbulo separados por depósitos finos de 0,02 m de espesor (Figura 5.2).

El *CL3* está conformado por seis lóbulos (*L1*, *L2*, *L3*, *L4*, *L5* y *L6*) con espesores variables. Separados por unidades interlobuladas de grano fino (*IL1*, *IL2*, *IL3*, *IL4* y *IL5*). Cada lóbulo contiene en promedio de dos a cuatro elementos de lóbulo separados por depósitos finos de 0,02 m de espesor inter-elementos de lóbulo (Figura 5.2).

Los rangos usados para los espesores propuestos se documentaron en los trabajos citados en el Capítulo 2. El ejercicio sintético fue diseñado tratando de emular la migración de los ejes de lóbulos de un lóbulo a otro describiendo el comportamiento de lóbulos reales, lo cual evidencia la dinámica particular del patrón en el sistema sedimentario, pudiéndose encontrar espesores masivos de arena con pocos estratos o frecuentemente amalgamados hasta espesores más finos con mayor cantidad de estratos, según el tipo de ambiente del lóbulo (Figura 5.2).

5.2. Columnas estratigráfica - sintéticas

A las columnas estratigráficas sintéticas propuestas, se les fabricó una estructura interna en la sección vertical y una arquitectura estratigráfica y temporal en la distribución lateral. Las columnas estratigráficas muestran la zonación de las facies sedimentarias en el modelo geológico conceptual y revelan la composición jerárquica interna de los complejos de lóbulos. Para la construcción de las columnas sintéticas, se consideró la zonación vertical y lateral de facies sedimentarias dentro de un modelo geológico conceptual, representadas por tres pozos que revelan la composición interna del cuerpo estratigráfico modelado. Los tres pozos pasan por diferentes facies en los elementos de los lóbulos en el modelo (Figura 5.2).

Los tres pozos cortan los tres *CLs* en diferentes zonas de facies de cada lóbulo mostrando la jerarquía estratigráfica completa desde el nivel más pequeño hasta el más grande. Las columnas fueron elaboradas de tal forma que replican las facies de los elementos de lóbulos y las dimensiones de cada depósito perteneciente a los distintos niveles jerárquicos siguiendo la ley de Walter. Para comodidad en la construcción del modelo se asume que los elementos de lóbulos (*ELs*) tienen espesores constantes dentro de un mismo lóbulo y variables de un lóbulo a otro, con patrones estratigráficos y espesores de estratos variables dentro de los *ELs* (Figura 5.3).

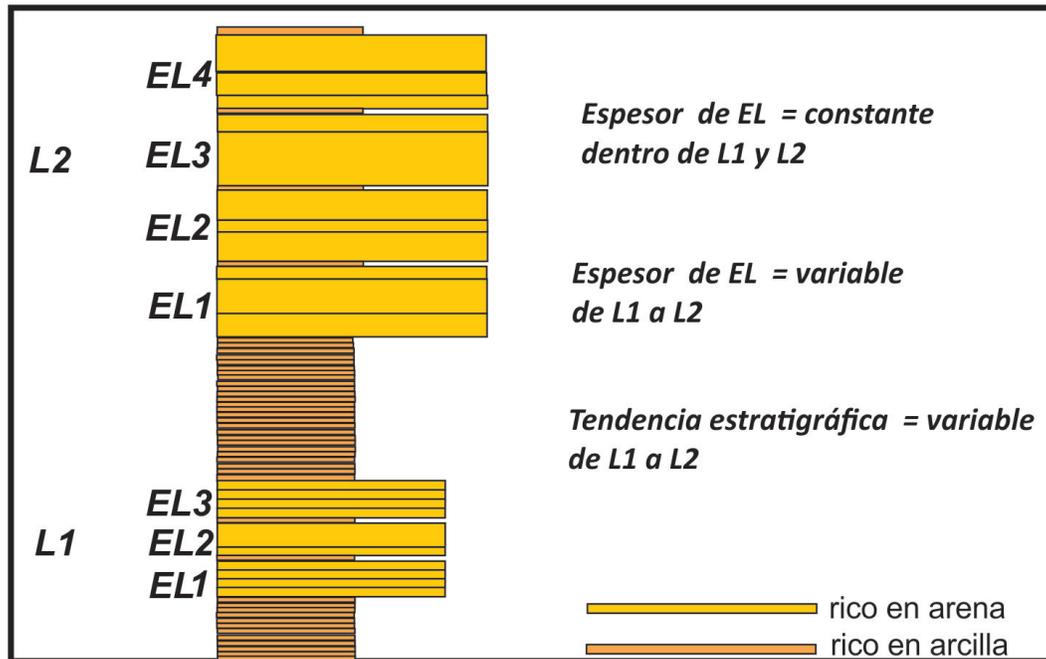


Figura 5.3: Jerarquía interna de los *Ls*. Los (*ELs*) con espesor constante dentro de un mismo lóbulo formado por estratos de espesor variables con diferentes tendencias estratigráficas.

Las columnas muestran como las variaciones de facies y sus dimensiones jerárquicas se ven reflejadas para cada pozo. Las columnas 1, 2 y 3 comienzan y terminan, la cima con varios metros de espesor de lutitas hemipelágicas. Estas lutitas representan depósitos de material fino depositados en condiciones de piso de cuenca luego de un largo receso en el aporte terrígeno por medio del sistema de abanico. Estas lutitas van aumentando su tamaño de grano a limo siempre hacia el contacto con los cuerpos arenosos. En las tres columnas, estos limos y arcillas están en contacto directo hacia la base con el *CL1* constituido por cinco lóbulos y hacia el tope con el *CL3* constituido por seis lóbulos, por lo cual pudieran considerarse como horizontes guías, pero sin embargo el análisis del modelos se restringe solamente a los paquetes arenosos que encierra estos límites de lutitas hemipelágicas, representando una estructura regional cuyo modelado se interpreta como un sistema de abanico con tres complejos, por lo tanto, estos depósitos solo serán tenidos en cuenta como límites de material fino para facilitar la comprensión del modelo (Figura 5.4).

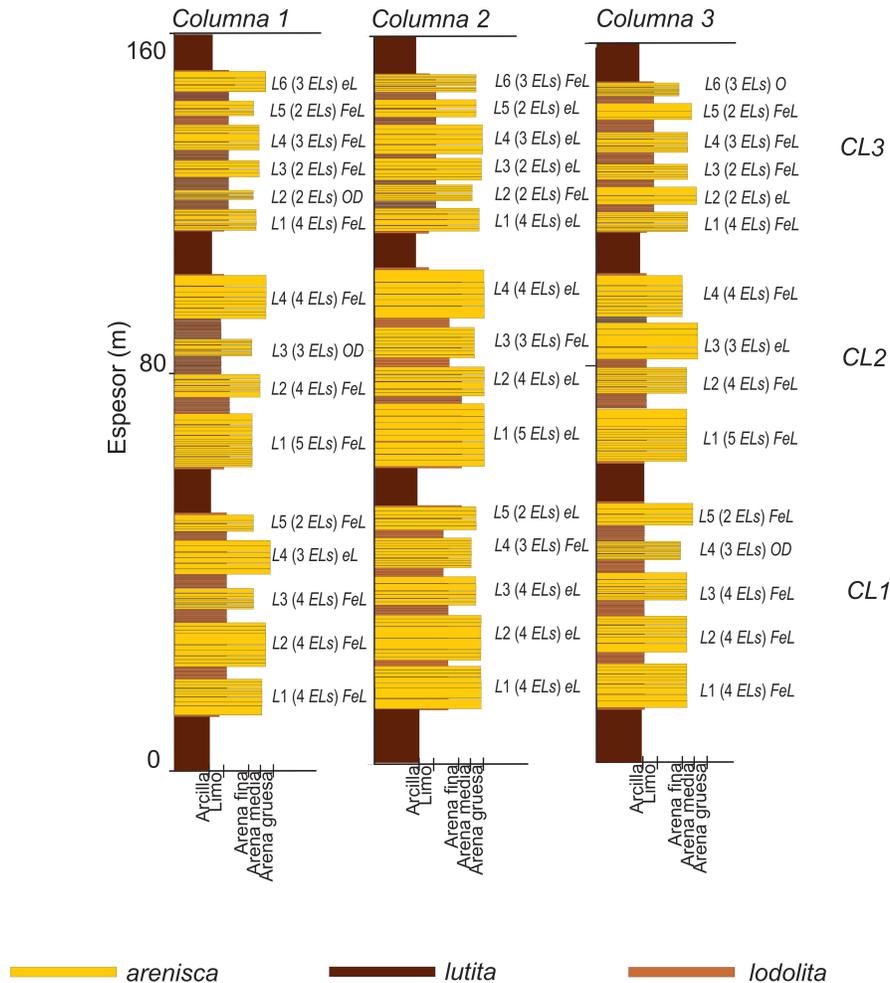


Figura 5.4: Columnas estratigráficas sintéticas del modelo geológico conceptual obtenidas a partir de los tres pozos proyectados en el sistema de abanico. En cada columna se describen la cantidad de elementos que presentan los lóbulos y el tipo de subambiente del lóbulo.

5.2.1. Complejo de lóbulos 1

El *CL1* constituye el primer depósito arenoso de gran potencia en la cuenca hipotética, con un total de cinco lóbulos con variaciones significativas en cuanto a granulometría, contenidos de finos y subambientes de depósitos para las tres columnas (Figura 5.4).

Los *L1*, *L2* y *L3* en los casos de la columna 1 y 2 representan un ambiente de depósito formado fuera de la zona del eje principal del lóbulo, con ligeras diferencias en el tamaño del grano, según su nivel de proximidad al eje principal del lóbulo. Están constituido por un total de doce *ELs* cuyos patrones de engrosamiento son constante, estrato-creciente y estrato-decrecientes (Figura 5.4).

Los tres lóbulos presentes en las columnas 1 y 3 se formaron en un ambiente de tipo *FeL* donde el nivel de energía del flujo es medio, de manera tal que los estratos presentan espeso-

res medios, la proporción de finos es intermedia, la estratificación es notable y el tamaño del grano medio es variable con ligeras diferencias según su proximidad al eje principal del lóbulo. Por otro lado, en la columna 2 se observa el mayor centro volumétrico de material arenoso, representado por un ambiente de tipo eL donde la cantidad de los estratos disminuyó, pero sin embargo los grosores de estos aumentaron (Figura 5.4).

La proporción de finos para estos tres lóbulos en las columnas 1 y 3 es significativamente mayor que en la columna 2, donde predominan las capas de areniscas de mayor potencia que las capas de limolitas (Figura 5.4).

Gervais et al. (2006) mencionan que los depósitos de arena están controlados por cambios en la posición de los sistemas de transporte sedimentario a múltiples escalas, y que la presencia de lutitas se relaciona con la disminución de energía en cada subambiente. Cada vez que el canal migra, hay variaciones en las condiciones de flujo que transportan el material y consecuentemente en el tipo de grano que se deposita en todo el sistema lobular. Este comportamiento se evidencia en los tres lóbulos inferiores, donde vemos que en las columnas 1 y 3 el ambiente es de menor energía mientras que para la columna 2 la energía fue mayor (Figura 5.4).

En cuanto al tamaño del grano, la fracción arenosa de las columnas 1 y 3 va de media a fina, por tratarse de un depósito más alejados del eje del lóbulo, mientras que en la columna 2 la fracción arenosa va de media a gruesa.

Ya en el $L4$ de la columna 1 se puede observar que el centro volumétrico cambió considerablemente, por lo cual ejemplifica la migración del eje principal a raíz de algún proceso de avulsión drástico en el canal a escala del complejo, pues se pasa de un ambiente donde el eje principal del $L3$ que se observó en la columna 2, ha migrado a la columna 1 en el lóbulo sobreyacente $L4$, mostrando que hacia la columna 2 y 3 el ambiente del $L4$ se hace de tipo FeL a OD respectivamente, teniendo hacia la columna 3 un aumento significativo de la cantidad de estratos de espesores menores con granulometría media- fina. EL $L5$ muestra su eje principal en la columna 2, evidenciando una nueva migración del canal con un ambiente de tipo eL , y en las columnas 1 y 3 se presentan ambientes de tipo FeL (Figura 5.4).

5.2.2. Complejo de lóbulos 2

El $CL2$ constituye el segundo depósito arenoso con un total de cuatro lóbulos, teniendo el lóbulo de mayor espesor de todo el sistema ($CL2- L1$). En este complejo los $L1$ y $2L$ en las columnas se presentan con los mismos subambientes, pero sin embargo hay una diferencia muy significativa con respecto a sus espesores, el $L1$ es el doble de potente que el $L2$ en las tres columnas. En las columnas 1 y 3 existe un predominio del ambiente de tipo FeL , con ligeras diferencias que marcan o denotan el hecho de que ocurrió una migración lateral de un eje de lóbulo con respecto a otro, mientras que en la columna 2 el ambiente que predomina es eL (Figura 5.4).

En la columna 1 el $L1$ presenta una granulometría mucho más fina que la del $L2$, evidenciado que en $L1$ el ambiente FeL está más lejano al eje principal del lóbulo con una granulometría tipo arenas finas, mientras que el $L2$ presentan una granulometría de tipo media a gruesa con mayor proximidad al eje principal del lóbulo, este comportamiento es diferente en la columna 3 donde la granulometría en ambos lóbulos es constante. En la columna 2 tenemos un ambiente de tipo eL con granulometría que va de arena media a gruesa y el espesor de los estratos y del lóbulo es más grueso. (Figura 5.4).

El $L3$ marca un cambio de desplazamiento del eje principal del lóbulo. Se muestra un am-

biente de tipo eL en la columna 3 caracterizado por la presencia de estratos más gruesos y con granulometría media a gruesa. La columna 2 presenta el ambiente de FeL con una estratificación resaltada por un mayor número de capas delgadas, el espesor de los estratos y la granulometría disminuye con respecto a la columna 3, evidenciando un paso transicional intermedio en las condiciones de energía del flujo que transportó el material, dada su mayor proximidad al eje principal del lóbulo. En la columna 1 se observa un ambiente de tipo OD , constituido por una estratificación muy fina, con granulometría fina, mostrando que es un depósito formado en condiciones de baja energía en el flujo, donde predomina la fracción fina y la cantidad de material arenoso disminuye significativamente con respecto a las columnas 2 y 3. Para la formación del $L4$ el eje principal del lóbulo se desplaza nuevamente a la columna 2 con un ambiente de tipo eL donde los estratos son más gruesos y domina la fracción arenosa de granulometría media a gruesa, mientras que en las columnas 1 y 3 el ambiente es de tipo FeL (Figura 5.4).

En los patrones estratigráficos de la columna 1 se observa el comportamiento estratocreciente en $L4$, estratocreciente-estratodecreciente en $L3$, estratodecreciente-estratocreciente en $L2$ y estratocreciente en $L1$. En la columna 2 se observa el comportamiento estratocreciente-estratocreciente en $L4$, constante en $L3$, estratocreciente-estratodecreciente en $L2$ y constante en $L1$. En la columna 3 se observa el comportamiento estratocreciente en $L4$, estratocreciente-estratodecreciente en $L3$, constante en $L2$ y estratocreciente en $L1$ (Figura 5.4).

5.2.3. Complejo de lóbulo 3

El $CL3$ constituye el último depósito arenoso del sistema con la mayor cantidad de lóbulos (seis) siendo los de menores espesor de todo el sistema de abanico (Figura 5.4).

El pozo 2 corta al $L1$ en el centro de simetría y centro volumétrico con un ambiente eL , mientras que en las columnas 1 y 3 muestra un ambiente de tipo FeL . En el $L2$ se ve un cambio del eje principal del lóbulo hacia la columna 3 mostrando la dinámica del depósito, donde el centro volumétrico migró provocando que la energía del flujo aumentase de la columna 1 a la columna 3 (Figura 5.4).

Los lóbulos $L3$, $L4$ y $L5$ presentan los mismos subambientes lobulares para las tres columnas, pero con ligeras diferencias según su proximidad al eje principal de los lóbulos, los cuales se muestran en la columna 2 donde se encuentran los eL . Sin embargo, a pesar de que tienen los mismos ambientes, existen algunas diferencias como, por ejemplo: el $L4$ dobla en espesor a los $L3$ y $L5$, con una granulometría de tipo media, mientras que los $L3$ y $L5$ presentan granulometría fina, evidenciando que en el $L4$ el material arenoso se formó más próximo al eje principal del lóbulo, a diferencia del $L3$ y el $L5$ que se formaron más alejados de los ejes principales de sus lóbulos depositando una granulometría más fina. Hacia la columna 2 en estos tres lóbulos disminuye notablemente el espesor de finos de los elementos interlóbulos. La energía del flujo que formó estos tres lóbulos, en la columna 2 es mayor que en los depósitos de las columnas 1 y 3, representada en el tamaño de las fracciones arenosas que se proponen (Figura 5.4).

El $L6$ representa una nueva migración del centro volumétrico hacia la columna 1, donde se muestra un ambiente de eL , mostrando la migración del canal donde las condiciones de mayor energía del flujo se muestran en la columna 1 y disminuye hacia las columnas 2 y 3 pasando desde un ambiente FeL a O . Este lóbulo, representa en el modelo el último depósito arenoso del sistema completo y está sellado por depósitos fino de transición de limolitas - lutitas hemipelágicas, lo cual representa un evento de avulsión a escala de la cuenca (Figura

5.4).

En los patrones estratigráficos de la columna 1 se observa el comportamiento estratocreciente en $L6$, estratocreciente $L5$, estratocreciente-estratodecreciente en $L4$, estratodecreciente en $L3$, estratocreciente en $L2$ y estratocreciente-estratodecreciente en $L1$. En la columna 2 se observa el comportamiento constante en $L6$, estratodecreciente-estratocreciente en $L5$, constante en $L4$, constante en $L3$, constante en $L2$ y estratocreciente-estratodecreciente en $L1$. En la columna 3 se observa el comportamiento estratocreciente en $L6$, estratocreciente $L5$, estratocreciente-estratodecreciente en $L4$, constante en $L3$, estratocreciente en $L2$ y estratocreciente-estratodecreciente en $L1$ (Figura 5.4).

5.3. Modelo de electrofacies

En el modelo geológico conceptual propuesto se usó como referencia el análisis de Prélat et al. (2009). Se elaboraron los datos sintéticos con los valores RG reportados en Guzmán-Hidalgo (2012), que reflejan los tipos litológicos presentes en los depósitos y las transiciones entre estos, teniendo en cuenta que este tipo de registro revela la presencia de radioactividad asociada con el contenido de minerales radioactivos en la roca.

Teniendo como base las columnas estratigráficas sintéticas y los ambientes lobulares descritos en la sección 5.2 se construyeron los registros sintéticos verticales que describen la estructura del depósito, sus zonas facies y el modelo geológico conceptual. Los registros sintéticos se construyeron con el propósito de representar la composición interna de los cuerpos sedimentarios en los niveles EL , L y CL , los cuales constituyen la gama de la jerarquía estratigráfica en los abanicos de aguas profundas. Los registros sintéticos no muestran el nivel jerárquico "estrato", puesto que en los registros de pozo reales la precisión no llega a esos niveles (Figura 5.5). Sin embargo, se asume que los ELs tienen su estructura jerárquica interna.

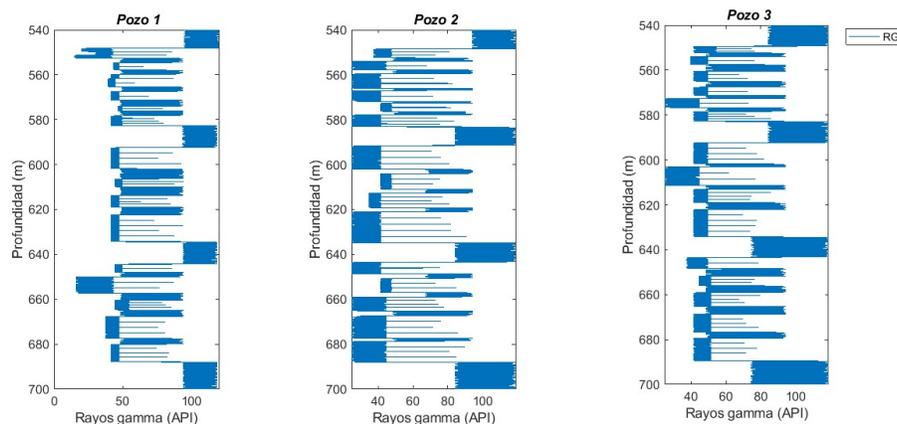


Figura 5.5: Registros sintéticos correspondiente a los pozos $P1$, $P2$ y $P3$, en donde se representan tres complejos con datos sintéticos de RG de las facies conceptualizadas en las columnas estratigráficas.

Los registros sintéticos representan la estructura jerárquica del modelo conceptual, utilizando los intervalos de valores asignados para cada facies y cada sub-ambiente, donde las facies fueron convertidas en electrofacies (eF), para manejar numéricamente el modelo geológico

conceptual.

El registro sintético consta de dos variables (la profundidad y RG), cuyos valores están en función del porcentaje de arcilla. Este tipo de registro suele constreñir muy bien las facies que predominan en estos depósitos de sistemas de abanicos de aguas profundas.

Los valores de los RG fueron asignados por [Guzmán-Hidalgo \(2012\)](#) teniendo en cuenta: el tipo litológico y el subambiente predominante. Los valores para (API) para estas $eF1$, están contenidos en los siguientes intervalos: $eF1$ (arenisca) menor a 42 típico para eL , $eF2$ (arenisca arcillosa) mayor a 42 y menor a 48 típico para el FeL , $eF3$ (lutita arenosa) mayor a 48 y menor que 55 valores típicos para arenas finas a muy finas que pueden ser de tipo O u OD y $eF4$ (lutitas o lodolitas) mayor que 55 llegando a tomar valor donde las lutitas hemipelágicas pueden toman valores hasta 120 como horizontes guías. Dentro del modelo se consideran a las lodolitas como zonas interelementos e interlóbulos con menor contenido de arcilla, mientras que las lutitas solo se verifican en los horizontes que separan los complejos de lóbulos. Los registros muestran los rangos de valores para las eF (Figura 5.6).

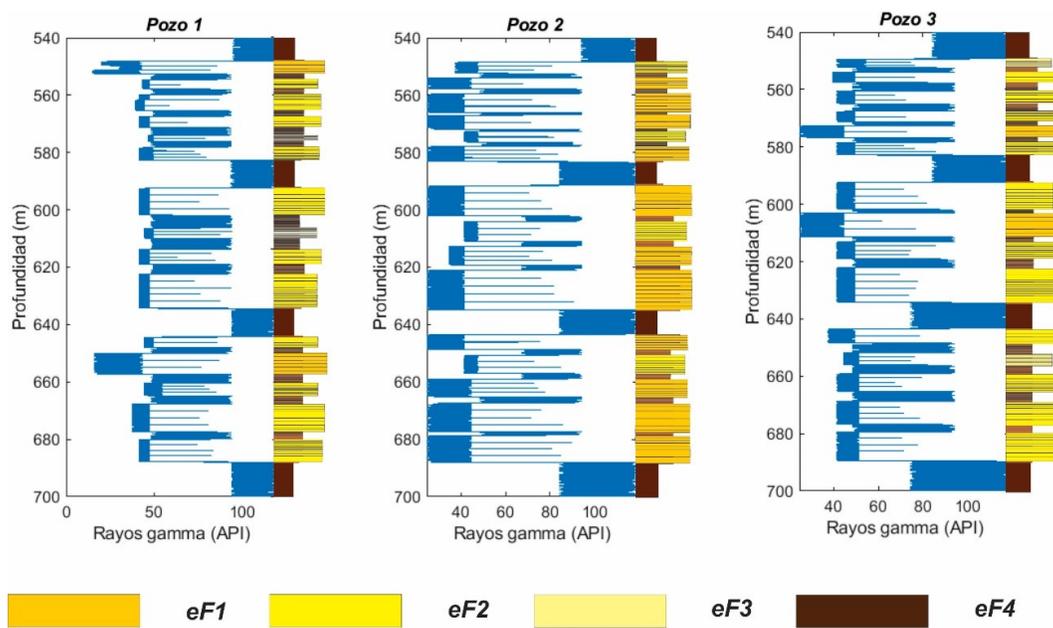


Figura 5.6: Se muestran las columnas estratigráficas y el modelo de electrofacies presentes en los tres registros mostrando los diferentes rangos de valores RG para cada eF de acuerdo a la litología y el subambiente de lóbulo. Los valores de RG altos eF arcillosas y limosas, mientras que los valores de eF bajos representan depósitos arenosos de distintos subambientes.

En los registros sintético las $eF1$, $eF2$ y $eF3$ se corresponden con los depósitos arenosos que conforman los ELs y L , mientras que la $eF4$ se corresponde con intervalos de grano fino (IEL, IL e ICL) que los separan, según sea el nivel jerárquico.

En términos de espesores de los cuerpos lobulares, las columnas 1 y 3 de la Figura 5.6 presentan mayor cantidad de cuerpos pertenecientes a la $eF2$ mientras que la columna 2 presenta cuerpos arenosos de las $eF1$ y la $eF3$ se presenta en menor medida en estas dos columnas, debido a que los pozos no cortaron zonas muy alejadas de los centros de lóbulos. Esto representa los pozos que cortaron en diferentes zonas del sistema, siendo la columna

2 la que muestra la mayor cantidad de cuerpos pertenecientes al eL , mientras que hacia las columnas 1 y 3 se nota un aumento del contenido de la fracción limosa. La granulometría y los espesores se reducen a medida que nos alejamos de la columna 2. En cuanto a la $eF4$ funciona como horizonte guía, la cual alcanza mayor potencia en las columnas 1 y 3 y menor en la columna 2, lo cual aparece descrito en la sección 5.2 donde se define que la columna 2 representa el mayor centro volumétrico con mayores espesores de arena que en las columnas 1 y 3.

5.4. Aplicación de la transformada de ondícula a los registros de rayos gamma sintéticos

Los registros RG sintéticos de cada pozo fueron sometidos a un análisis de la transformada de ondícula para averiguar la jerarquía estratigráfica de los depósitos areno-arcillosos hipotéticos del modelo geológico conceptual.

5.4.1. Escalogramas de modelo de los registros de rayos gamma sintéticos P1, P2 y P3

Con los registros de RG los cuales simulan las eF teóricas se obtuvieron los escalogramas, resultado del cálculo de los coeficientes de la ondícula Coiflets 3 ($coif3$), la cual en la práctica ha mostrado muy buenos resultados en otras investigaciones donde ha sido aplicada (Tokhmechi et al., 2009; Coconi-Morales et al., 2010; Javid and Tokhmechi, 2012; Verma et al., 2012; Srivardhan, 2016; Sánchez et al., 2017; Kadkhodaie and Rezaee, 2017; Singh et al., 2018). Los rangos de escalas usados en el análisis van 0 – 2.5 m, 2.5 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 25 m, 25 - 40 m y 40 – 60 m, lo cual permitió observar escalogramas a diferentes escalas para ir esbozando los detalles y generalidades del sistema de abanico. Las escalas fueron tomadas en cuenta según los datos reportados en (Prélat et al., 2009; Prelat et al., 2010). Esta forma de representación permitió ver la estructura interna del depósito bajo el cual se generaron los datos sintéticos (Figura 5.7).

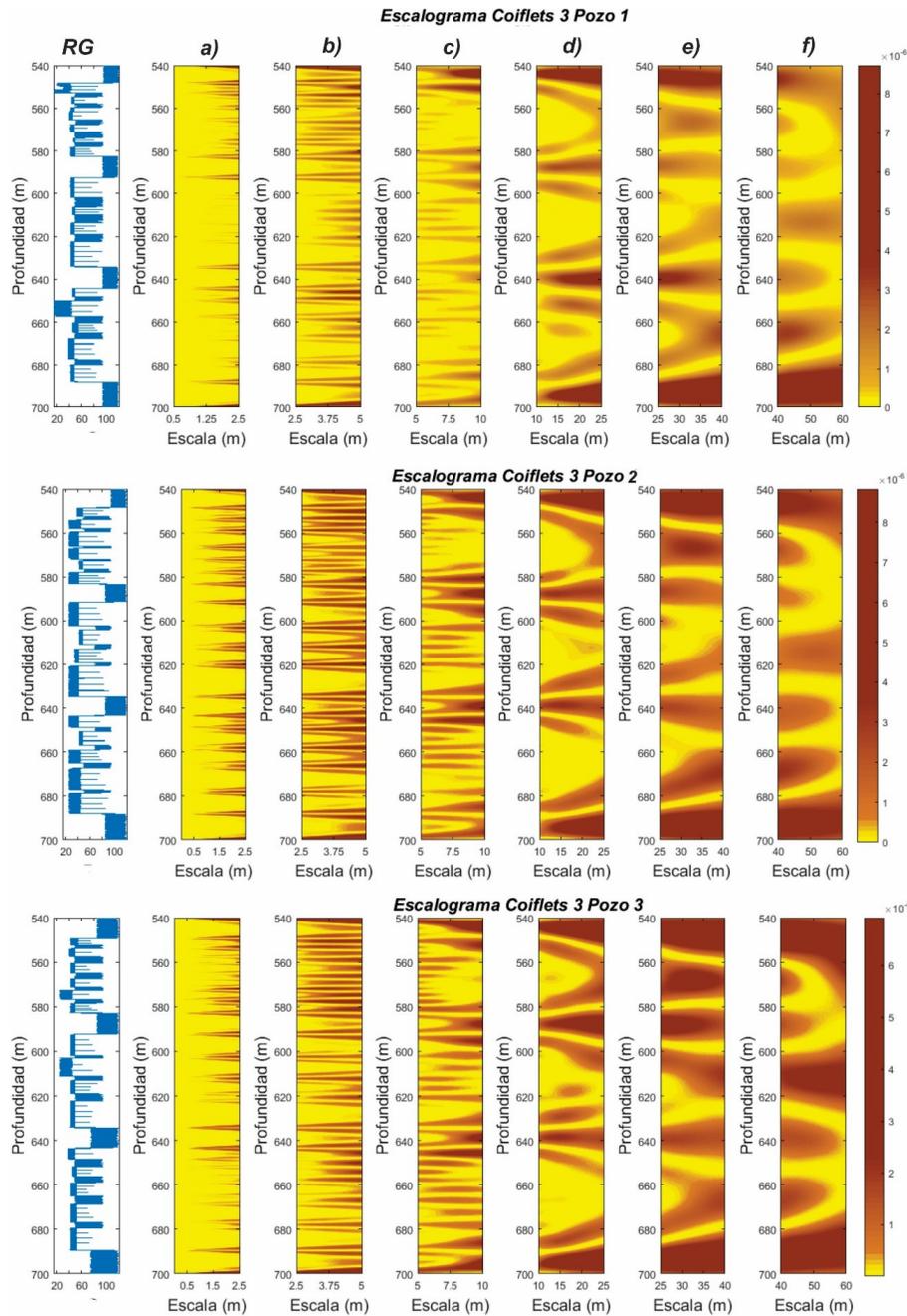


Figura 5.7: RG de $P1$, $P2$ y $P3$ con los escalogramas obtenidos usando la $coif3$ considerando diferentes escalas a) 0 - 2.5 m b) 2.5 - 5 m c) 5 - 10 m d) 10 - 25 m e) 25 - 40 m f) 40 - 60 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interfaces estratigráficas.

Los colores de los escalogramas reflejan la intensidad de los coeficientes de la ondícula, los cuales están en función del valor de rayos gamma y la escala de observación. Los colores son el reflejo de intervalos estratigráficos con rangos de valores RG similares y por consiguiente la misma electrofacies siempre y cuando estén a una escala de trabajo adecuada.

El escalograma se ocupa para distinguir visualmente las agrupaciones estratigráficas a distintas escalas de observación (decenas o centenas de metros) donde los coeficientes de la ondícula

resaltarán la eF , solo si el espesor de la eF está al mismo nivel de escala de la observación, es decir, si hay un intervalo arcilloso de decenas de metros no se apreciará en una escala de observación centimétrica. Este fenómeno se da muy seguido en el modelo propuesto, teniendo en cuenta que el material arcilloso (inter-complejo de lóbulo) a escalas menores que el tamaño de su espesor real no suelen marcarse claramente, sino hasta que se analizan escalas similares a la de su espesor.

De acuerdo a los rangos de RG asignados a cada una de las cuatro eF propuestas, hemos de esperar que las arenas presenten coeficientes de baja intensidad, representados por el color amarillo en el escalograma, mientras que los materiales con mayor contenido de arcilla tendrán valores de intensidad alta en sus coeficientes, representados por colores más contrastantes que van desde naranja a marrón. Los intervalos estratigráficos de menor y mayor jerarquía se marcarán en escalas pequeñas y grandes respectivamente de manera tal que los coeficientes de baja intensidad se diferencian de los de alta intensidad.

Al ser los escalogramas función de los datos de la señal se logran resolver los empaquetamientos estratigráficos a diferentes escalas de forma tal que se ponen en evidencia los cambios abruptos en la señal distinguiéndose la jerarquía estratigráfica propuesta en el modelo.

En el ejercicio propuesto los escalogramas de la Figura 5.7 logran replicar los intervalos estratigráficos que representan niveles en la jerarquía estratigráfica. Los espesores de los depósitos en la señal se verifican, de igual forma en los tres cuerpos areno-arcillosos de color amarillo (complejos de lóbulos) separados por cuellos de lutita de color marrón.

En los escalogramas de la Figura 5.8 “d – f” se logra distinguir tres intervalos estratigráficos predominantes de baja frecuencia que dan un visión global del registro correspondiente a escalas de observación mayores a 10 m, cuyos intervalos coinciden con los tres complejos de lóbulos del modelo geológico-conceptual. En la Figura 5.8 “a – c” se logra distinguir los intervalos estratigráficos predominantes de alta frecuencia que dan un visión detalla del registro correspondiente a escalas de observación menores a 10 m, lo cual se corresponden con los elementos de lóbulos y lóbulos.

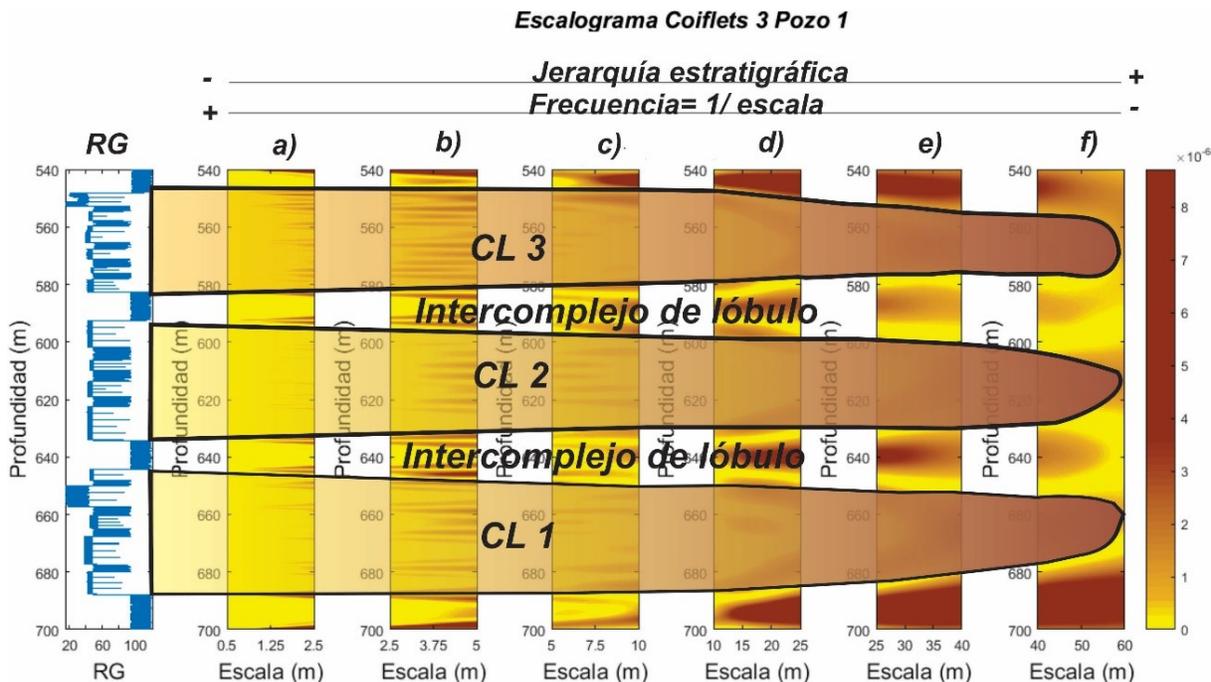


Figura 5.8: Escalograma *P1* donde se resalta el patrón encontrados en los tres *CLs* usando la *coif3* considerando diferentes escalas a) 0 - 2.5 m b) 2.5 - 5 m c) 5 - 10 m d) 10 - 25 m d) 25 - 40 m d) 40 - 60 m.

En el análisis de los escalogramas, conforme se aumenta la escala de observación, se pierden los detalles internos de la estratigrafía (*ELs* y *LS*) y se resaltan las jerarquías estratigráficas de orden superior (*CLs* y el sistema de abanico), ofreciendo una vista más general de los grandes paquetes sedimentarios.

Si consideramos las escalas pequeñas en los escalogramas, entonces, la transformada de ondícula identifica las altas frecuencias en la señal de *RG*, que a partir de los datos controlados se corresponde con lo que físicamente en el modelo son unidades litológicas de poco espesor como *ELs*, *LS* y sus respectivos horizontes guías que los separan en este caso los *IELs* e *ILs*. Con el aumento de las escalas, la transformada de ondícula identifica las bajas frecuencias que en el modelo se relacionan físicamente con unidades litológicas de mayor espesor como los *CLs* y el sistema de abanico, así como sus respectivos horizontes guías a ese nivel representados por los cuellos de lutitas hemipelágicas.

5.4.2. Determinación de espesores en el modelo de eF usando la línea de los coeficientes de la ondícula

Las curvas de color rojo en la Figura 5.9 muestran la función línea de coeficientes a distintas escalas para la ondícula *coif3* con la cual se realizó un filtrado de la señal *RG*. El filtrado se obtuvo a partir de calcular el promedio de las *n* filas de la matriz de coeficientes, resultando una nueva matriz con los valores de profundidad y de los coeficientes promediados, correspondiendo a cada dato de profundidad un valor de coeficiente promedio.

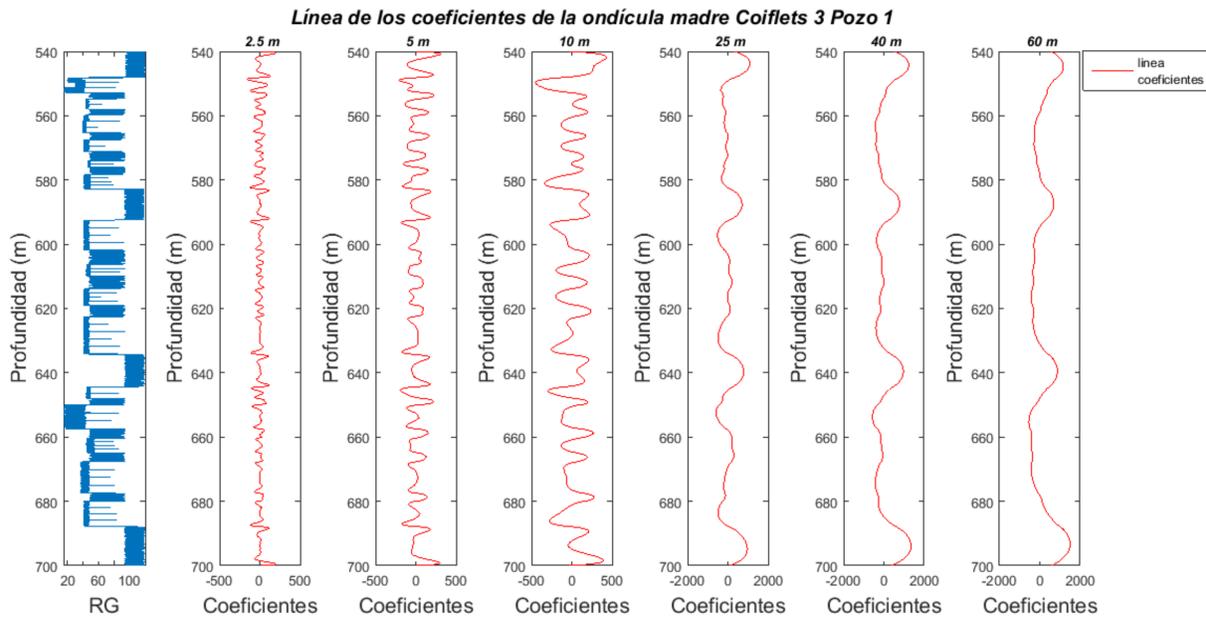


Figura 5.9: El gráfico muestra el registro sintético correspondiente al $P1$ con las curvas de la función línea de coeficientes usando la ondícula $coif3$ considerando diferentes escalas 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 25 m, 25 - 40 m y 40 - 60 m.

Los registros de RG de cada pozo se muestran con la línea de los coeficientes de la ondícula usando la $coif3$, donde se observan correspondencias entre los cambios bruscos que se producen en la señal con las interfaces litológicas como lo reportan (Verma et al., 2012; Chandrasekhar and Rao, 2012).

Muy parecido como en los escalogramas, las pequeñas escalas que se corresponde físicamente con elementos finos presentan mayor frecuencia, mientras que las escalas grandes se asocian con una visión global del registro presentando frecuencias bajas.

Se nota que en la línea de coeficientes para las escalas 0 - 2.5 m, 2.5 - 5 m y 5 - 10 m resaltan detalles de la jerarquía estratigráfica como ELs y Ls , mientras que para escalas mayor a 10 m se pierden los detalles interno de los depósitos y resaltan los rasgos globales en la señal de los tres CLs , los cuales se definen claramente a medida que aumenta la escala.

Las líneas de coeficientes calculadas para diferentes niveles de observación, al igual que los escalogramas, ofrecen información del depósito y se pueden identificar los puntos de interfaces litológicas. Otra característica importante obtenida a partir de las curvas de las líneas de coeficientes es la existencia de puntos de inflexión en la función según el nivel de escala utilizado, los cuales coinciden con las interfaces litológicas en la señal y en los escalogramas.

En la Figura 5.10 se aprecia, que en las pequeñas escalas los puntos de inflexión coincide con las interfaces entre ELs e $IELs$, Ls e ILs además de las interfaces CLs e $ICLs$ que se van reforzando con el aumento de los niveles de escala. Al igual que con los escalogramas los niveles jerárquicos de interés, en el dominio de la ondícula deberán obtenerse usando los rangos de escala adecuados. Los rangos de escalas más adecuados resultaron de 0 - 5 m (elementos de lóbulos), 5 - 10 m (lóbulos) y de 25 - 60 m (complejos de lóbulo).

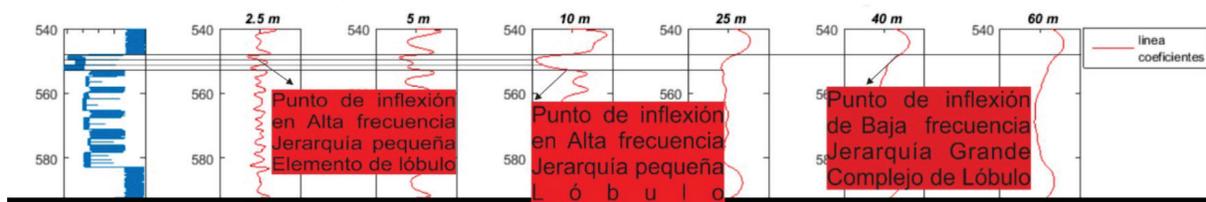


Figura 5.10: El gráfico muestra el registro sintético correspondiente al $P1$ con las curvas de la función línea de coeficientes usando la ondícula $coif3$ considerando diferentes escalas 0 - 5 m, 5 - 10 m, 10 - 25 m, 25 - 40 m y 40 - 60 m.

En el análisis de la jerarquía estratigráfica usando las líneas de los coeficientes de las ondícula se calcularon los puntos de inflexión en las diferentes escalas, en la Figura 5.11 se muestran los puntos de inflexión obtenidos, nótese que estos puntos de inflexión disminuyen en frecuencia a medida que aumenta la escala, lo cual reafirma la presencia de la cantidad de cambios litológico que se detectan a diferentes escalas. La correspondencia entre puntos de inflexión y puntos de interface litológico es de utilidad, ya que relacionan los espesores de los depósitos para ir esbozando niveles jerárquicos propios del sistema.

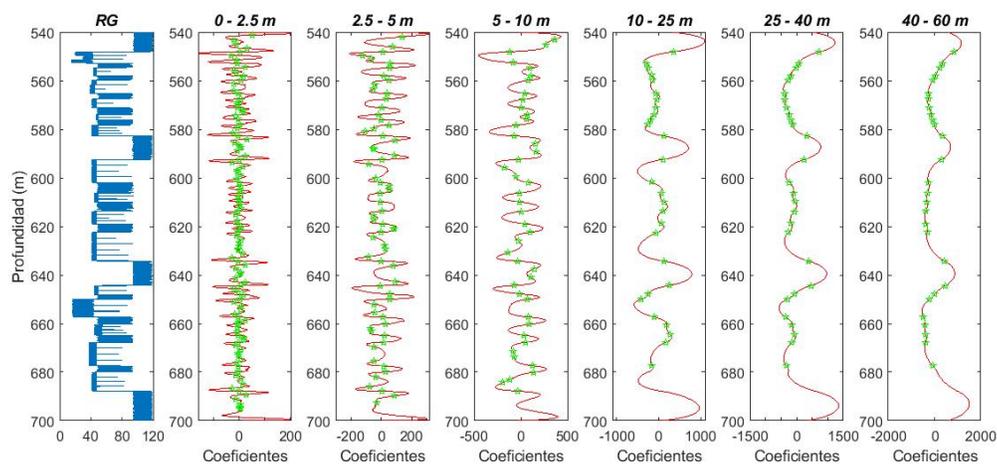


Figura 5.11: Se muestra la línea de los coeficientes usando la ondícula $coif3$ y el registro sintético de RG correspondiente al $P1$. En las líneas de coeficientes se señalan los puntos de inflexión obtenidos en las diferentes escalas.

En esta sección se expuso anteriormente que existen escalas claves que visualizan los niveles jerárquicos que se corresponden con ELs , Ls y CLs . Con los puntos de inflexión se determinó la distancia existente entre un punto y otro para los niveles de escala señalados. En un análisis de detalle en la Figura 5.12 se muestran los puntos de inflexión y se señalan algunos valores específicos para límites jerárquicos, donde a medida que aumentamos la escala existe un mejor ajuste de los datos y los puntos de inflexión se aproximan más al valor de profundidad real del modelo.

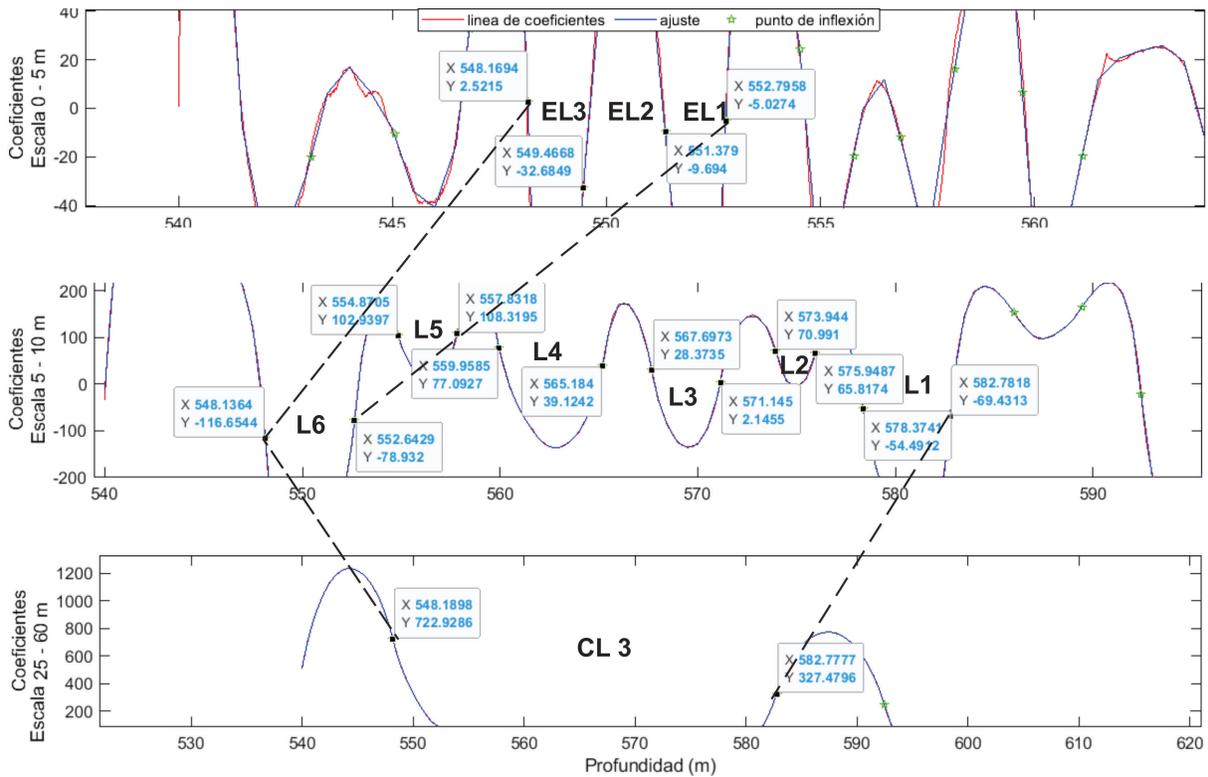


Figura 5.12: Se muestran las escalas seleccionadas para mostrar los niveles jerárquicos calculados. Se señalan a diferentes escalas los componentes de la jerarquía *ELs*, *Ls* y *CLs*. Se refuerzan los detalles contenidos en el nivel de elemento de lóbulo (*EL1*, *EL2* y *EL3*) encontrados en el *L6* y a su vez los seis lóbulos (*L1*, *L2*, *L3*, *L4*, *L5* y *L6*) contenidos en el *CL3*. Se indican la cima y base de cada nivel jerárquico analizado.

En las líneas de coeficientes la diferencia en profundidad entre puntos de inflexión corresponde con valores de cima y base de los cuerpos areno-arcilloso, y arroja como resultado el espesor referido al nivel en escala de observación, que a su vez corresponde con un nivel en la jerarquía estratigráfica. En la Tabla 5.2 se muestran los datos jerárquicos usado en el *CL3* y los datos obtenidos a partir de los puntos de inflexión en la línea de coeficientes. Se observa que los espesores calculados en los elementos de lóbulos se alejan del valor de espesor usado en los datos sintéticos del modelo geológico, donde los errores son mayores en el valor del punto de inflexión sobre la curva de la línea de coeficientes debido a un menor ajuste de los datos causado por la alta frecuencia, mientras que para escalas más grandes los espesores calculados se ajustan mejor en lóbulos y complejos de lóbulos debido a que en estos niveles jerárquicos aumenta la escala y se disminuye la frecuencia. Como tendencia se puede notar que a medida que disminuye el espesor del nivel jerárquico aumenta el error relativo, mientras que el error absoluto va a estar influenciado por el error numérico que comete la misma herramienta de software que en las cifras significativas al calcular los puntos de inflexión. El método permite incluso dejar al interprete encontrar los puntos de inflexión de manera manual, siendo esta la vía menos práctica.

Nivel jerárquico	Espesor estimado (m)				Espesor promedio (m)	Espesor real	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
<i>CL3</i>	34.62	34.62	34.61	34.60	34.61	35	0.38	1.11
<i>EL3</i>	1.29	1.58	1.44		1.44	1.49	0.05	3.69
<i>EL2</i>	1.91	1.50	1.70		1.70	1.49	0.21	14.43
<i>EL1</i>	1.42	1.49	1.45		1.45	1.49	0.04	2.35
<i>L6</i>	4.62	4.57	4.60	4.51	4.57	4.52	0.05	1.19
<i>EL2</i>	1.26	1.22	1.24		1.24	1.71	0.47	27.49
<i>EL1</i>	2.08	2.16	2.12		2.12	1.71	0.41	23.98
<i>L5</i>	3.34	3.38	3.36	3.26	3.34	3.24	0.10	2.93
<i>EL4</i>	1.59	1.89	1.74		1.74	1.82	0.08	4.40
<i>EL3</i>	1.39	1.65	1.52		1.52	1.82	0.30	16.48
<i>EL2</i>	2.95	2.07	2.51		2.51	1.82	0.69	37.91
<i>EL1</i>	1.28	1.76	1.52		1.52	1.82	0.30	16.48
<i>L4</i>	6.21	6.37	6.29	5.23	6.02	5.49	0.53	9.74
<i>EL3</i>	1.28	1.28	1.28		1.28	1.77	0.49	27.68
<i>EL2</i>	1.32	1.60	1.62		1.51	1.77	0.26	25.42
<i>EL1</i>	1.15	1.04	1.10		1.10	1.77	0.67	38.14
<i>L3</i>	3.75	3.53	3.64	3.45	3.59	3.56	0.03	0.91
<i>EL2</i>	1.30	0.27	0.79		0.79	0.97	0.18	19.07
<i>EL1</i>	0.78	0.84	0.81		0.81	0.97	0.16	16.49
<i>L2</i>	2.08	2.11	2.60	2.09	2.30	1.94	0.36	15.65
<i>EL3</i>	1.39	1.42	1.40		1.40	1.24	0.16	13.31
<i>EL2</i>	2.04	1.42	1.73		1.73	1.24	0.49	39.52
<i>EL1</i>	1.25	1.70	1.47		1.47	1.24	0.23	18.95
<i>L1</i>	4.68	4.54	4.61	4.41	4.56	4.52	0.04	0.88

Cuadro 5.2: Muestra una comparación entre los valores de los espesores del modelo de datos sintéticos y los espesores estimados utilizando la distancia entre puntos de inflexión.

El punto de inflexión, que es la cima del *EL* más joven, coincide con la cima del siguiente nivel jerárquico (*L*) y este a su vez con la cima del subsiguiente nivel jerárquico (*CL*), lo mismo sucede con la base, donde el punto de inflexión que limita la base del *EL* más antiguo coincide con la base del subsiguiente nivel jerárquico (*L*) y a su vez con la base del subsiguiente nivel jerárquico (*CL*); al usar las distintas escalas de la transformada de ondícula se pone de manifiesto la jerarquía estratigráfica asignada a los datos sintéticos.

La Tabla 5.3 muestra que los puntos de inflexión que reaparecen a diferentes escalas, separan niveles jerárquicos, o puntos de interfase litológica. Al calcular el error absoluto de los espesores esperados a partir del modelo de ajuste se observa que los niveles jerárquicos de orden inferior (*EL*) son menos exactos que los de orden mayor (*L* y *CL*), por lo que se sugiere que con los registros de pozos reales, cuya jerarquía estratigráfica es desconocida, se inicie la búsqueda de la jerarquía estratigráfica, comenzado por el agrupamiento estratigráfico de mayor orden jerárquico (*CL*). La determinación de los puntos de inflexión, usando las líneas de los coeficientes de la ondícula, arroja valores, en comparación con los escalogramas que muestran zonas a distintas escalas en la señal, pero de manera puramente visual, que aunque se aproximan bastante al intervalo real, se presta a múltiples estimaciones, de acuerdo a la

diferencia de criterios de varios intérpretes; por lo que en esta propuesta utilizamos los valores de los puntos de inflexión, guiados por la apreciación visual de los escalogramas. Los puntos de inflexión, al coincidir con los cambios de interface, permite la identificación de límites jerárquicos en los registros de pozo, lo cual permite estimar espesores entre un punto y otro. Los depósitos areno-arcillosos nos brindan la posibilidad de distinguir los dos tipos litológicos con la transformada de ondícula, y consecuentemente de la estructura estratigráfica interna que tienen los depósitos de ambientes lobulares en abanicos submarinos de aguas profundas.

Jerarquía			Escala (m)						
<i>CL</i>	<i>L</i>	<i>EL</i>	0 -2.5	2.5 -5	5 -10	10 -25	25 -40	40 -60	Prom
<i>CL3</i>	<i>L6</i>		548.17	548.16	548.13	548.13	548.19	548.22	548.17
		<i>EL3</i>	1.29	1.58					1.44
			549.46	549.74					549.60
		<i>EL2</i>	1.91	1.50					1.70
			551.37	551.24					551.31
		<i>EL1</i>	1.42	1.49					1.45
			552.79	552.73	552.64				552.72
	<i>IL5-6</i>		1.73	1.78	1.93				1.81
	<i>L5</i>		554.52	554.51	554.57				554.53
		<i>EL2</i>	1.26	1.22					1.24
			555.78	555.73					555.76
		<i>EL1</i>	2.08	2.16					2.12
			557.86	557.89	557.83				557.86
	<i>IL4-5</i>		1.27	1.04	2.12				1.48
	<i>L4</i>		559.13	558.93	559.95				559.34
		<i>EL4</i>	1.59	1.89					1.74
			559.72	559.82					559.77
		<i>EL3</i>	1.39	1.65					1.52
			561.11	561.47					561.29
		<i>EL2</i>	2.95	2.07					2.51
			564.06	563.54					563.80
		<i>EL1</i>	1.28	1.76					51.52
		565.34	565.30	565.18				565.27	
	<i>IL3-4</i>		2.11	2.31	2.51				2.31
	<i>L3</i>		567.45	567.61	567.69				567.58
		<i>EL3</i>	1.28	1.09					1.19
			568.73	568.70					568.72
		<i>EL2</i>	1.32	1.40					1.36
			570.05	570.10					570,08
		<i>EL1</i>	1.15	1.04					1.10
			571.20	571.14	571.14				552.16
	<i>IL2-3</i>		1.71	2.77	2.77				2.41
<i>L2</i>		572.91	573.91	573.91				573.41	
	<i>EL2</i>	1.30	0.27					0.79	
		574.21	574.18					574.20	

<i>CL3</i>	<i>L2</i>	<i>EL1</i>	1.78	1.84				1.81
			575.99	576.02	575.94			575.98
	<i>IL1-2</i>		2.12	2.22	2.43			2.26
	<i>L1</i>		578.11	578.24	578.37			578.24
		<i>EL3</i>	1.39	1.42				1.40
			579.50	579.66				579.58
		<i>EL2</i>	2.04	1.42				1.73
			581.54	581.08				581.31
		<i>EL1</i>	1.25	1.70				1.47
			582.79	582.78	582.78	582.81	582.77	582.76	582.78

Cuadro 5.3: Puntos de inflexión similares que representan los límites de cuerpos y niveles jerárquicos del *CL3*.

Capítulo 6

Aplicación al caso de estudio: Pozos del Sector 3 del Campo Coyotes

El caso de estudio consta de ocho pozos pertenecientes al sector 3 del Campo Coyotes. Pozos: coyotes 311, coyotes 312, coyotes 318, coyotes 331, coyotes 332, coyotes 333, coyotes 351 y coyotes 353. Estos pozos se perforaron con objetivos de exploración de hidrocarburos en la formación Chicontepec, en sus niveles Medio y Superior (de edad Paleoceno Superior y Eoceno inferior, respectivamente), con el propósito de identificar los paquetes arenosos. La sedimentación de estos paquetes se compone de turbiditas de ambiente nerítico externo a batial, formando complejos de abanicos y canales, constituidos por arenas lenticulares con intercalaciones de lutitas. El modelo geológico está definido como una serie de eventos con múltiples episodios de deposición de abanicos submarinos, erosión, y relleno, en el cual se destacan elementos de sistemas de depósitos de abanico muy fundamentales como son los canales y lóbulos ([González, 2009](#)) (Figura 6.1).



Figura 6.1: Ubicación del área de estudio. Estos pozos se localizan entre la porción norte de la Cuenca Tampico-Misantla y el occidente de la Plataforma de Tuxpan. La distancia entre el pozo C-318 y el centro de la macropera (C-331) es de 1400 m mientras que la distancia entre los pozos pertenecientes a la macropera es de 400 m.

6.1. Registros geofísicos de rayos gamma de los ocho pozos pertenecientes al Sector 3 del Campo Coyotes

Los registros de rayos gamma miden la radioactividad natural de las rocas, lo cual permite distinguir entre tipos litológicos como son las arcillas, que normalmente son más radioactivas que las arenas. Por lo tanto, fueron estos registros los seleccionados para el caso de estudio. En la Figura 6.2 se muestran los registros de rayos gamma correspondientes a ocho pozos del Campo Coyotes. En el análisis inicial de los registros, para cada pozo, se distinguieron dos patrones sedimentarios bien marcados, cuyo límite entre ellos, en los pozos de las macroperas, se da a una profundidad cercana a los 1000 metros, y en el C-318 a los 800 m. El patrón del paquete superior trata de un depósito de aspecto masivo compuesto por lutitas, y el patrón del paquete inferior se trata de un depósito con cuerpos ricos en arena separados por varios cuellos de lutita. El patrón inferior mostrado en los registros, por las dimensiones y características estratigráficas, son similares a las esperadas en los depósitos de sistemas de abanicos de aguas profundas reportados en (Prélat et al., 2009; Prélat et al., 2010).

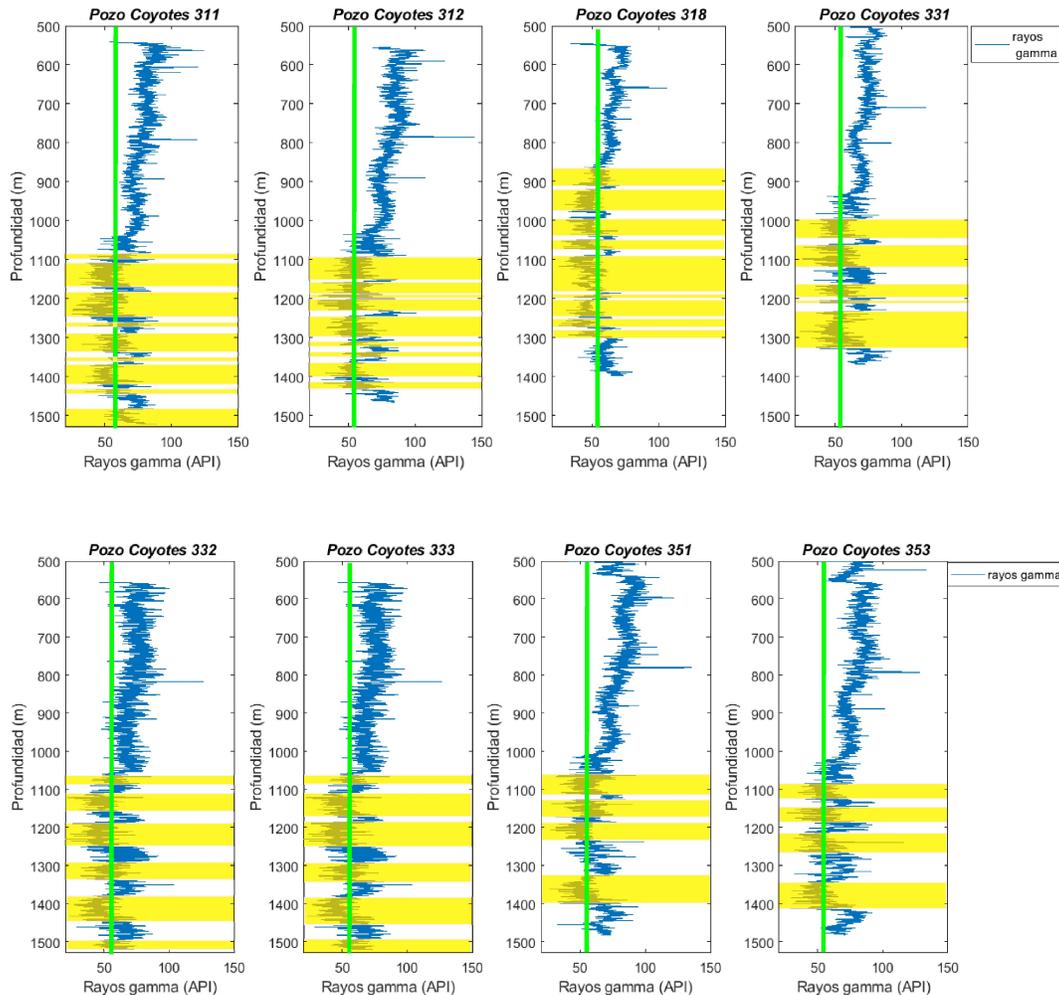


Figura 6.2: Registros geofísicos de pozos de rayos gamma correspondiente a los pozos Coyote 311, Coyote 312, Coyote 318, Coyotes 331, Coyotes 332, Coyotes 333, Coyotes 351 y Coyotes 353. Se resaltan los cuerpos ricos en arena color amarillo y la línea verde representa el valor límite como marcador de ambientes de lóbulos ≥ 55 API.

En los pozos Coyotes 311 y 312 se muestran los dos patrones sedimentarios. El depósito superior es un espesor considerable de lutitas. A partir de los 1050 m de profundidad, el patrón estratigráfico del depósito inferior consiste de varios cuerpos de areniscas, arenisca arcillosa y lutita arenosa, que se asemejan a la estructura de los depósitos de abanicos de aguas profundas (Figura 6.2).

De manera similar el pozo Coyotes 318 muestra también dos patrones sedimentarios. El primero es un espesor considerable de lutitas que alcanza hasta los 865 m. A partir de los 865m de profundidad se inicia el patrón estratigráfico del depósito inferior representado por la presencia de varios cuerpos ricos en arena similares a los observados en los pozos Coyotes 311 y 312 (Figura 6.2).

El pozo Coyotes 331 muestra también los dos paquetes sedimentarios como en los casos anteriores, pero con una menor cantidad de cuerpos ricos en arena en el paquete inferior.

Los pozos Coyotes 332 y Coyotes 333 muestran los dos patrones sedimentarios antes observados tanto en el número de cuerpos como en la profundidad a la que se encuentran, con la

particularidad que en el paquete inferior en estos pozos los cuerpos ricos en arena están más separados entre sí que en los pozos Coyotes 311 y 312 ((Figura 26). En los pozos Coyotes 351 y Coyotes 353 el depósito inferior se presenta con menor números de cuerpos ricos en arena (cuatro) (Figura 6.2).

Los resultados anteriormente observados son una primera aproximación del arreglo estratigráfico de los depósitos sedimentarios, partiendo solamente de los registros de rayos gamma, sin embargo, la estructura interna de estos depósitos o sus agrupaciones a escala de complejos de lóbulo no son evidentes y las interpretaciones dependen del criterio del especialista.

6.2. Aplicación de la transformada de ondícula a los registros geofísicos de los pozos Coyotes usando escalogramas

Anteriormente se analizó cada uno de los registros geofísicos definiendo según estos datos la existencia de cuerpos ricos en arena a diferentes profundidades. Esto permitió identificar las zonas de interés (sistema de abanicos) que se encuentra en el paquete inferior.

A los registros geofísicos de rayos gamma se les aplicó la transformada de ondícula como herramienta para la construcción de escalogramas, con el propósito de explorar la estructura interna de los cuerpos arenosos contenidos en el depósito inferior para todos los pozos. Se inició con rango de observación de 0 - 4 m como escala de reconocimiento estratigráficos con el propósito de identificar espesores de característicos de los elementos de lóbulo, de 4 - 12 m para los lóbulos y de 15 - 60 m (lóbulos). Los escalogramas muestran zonas de coincidencia con los registros de rayos gamma en cuanto a los puntos de interface litológico entre *CLs* y *ICLs*. A lo interno de los paquetes considerados como *CLs* se utilizaron los intervalos con coeficientes de alta intensidad para determinar cada nivel jerárquico de menor escala (*Ls* y *ELs*). La Tabla 6.1 muestra la jerarquía estratigráfica interpretada a partir de los escalogramas (Anexo A).

Jerarquía estratigráfica	Elemento de lóbulo (<i>EL</i>)	Lóbulo (<i>L</i>)	Complejo de lóbulo (<i>CL</i>)
Coyote 311	26	12	5
Coyote 312	32	15	5
Coyote 318	46	20	5
Coyote 331	33	19	5
Coyote 332	24	13	4
Coyote 333	33	15	4
Coyote 351	31	13	3
Coyote 353	21	13	4

Cuadro 6.1: Jerarquía estratigráfica determinada en los depósitos a partir de los pozos coyotes de la Formación Chicontepec con la matriz de coeficientes de los escalogramas.

La estructura jerárquica definida para el pozo Coyotes 311 consiste en cinco *CLs* (Anexo A). En el *CL1* se observa un patrón estratigráfico de creciente-decreciente en la base a constante en la cima, cuyos elementos de lóbulo son propios de *OD* a *FeL*. En el *CL2* se observa un patrón estratigráfico de constante en la base a decreciente en la cima, cuyos elementos

de lóbulos son tipo *FeL*. El *CL3* se observa un patrón estratigráfico creciente en su base a constante en la cima con elementos de lóbulos de tipo *O*. En el *CL4* se observa un patrón estratigráfico creciente en la base a constante a decreciente en la cima con elementos de lóbulo de tipo *eL*. El *CL5* se observa un patrón estratigráfico creciente en la base a decreciente a creciente en la cima, con elementos de lóbulo tipo *FeL* (Figura 6.3).

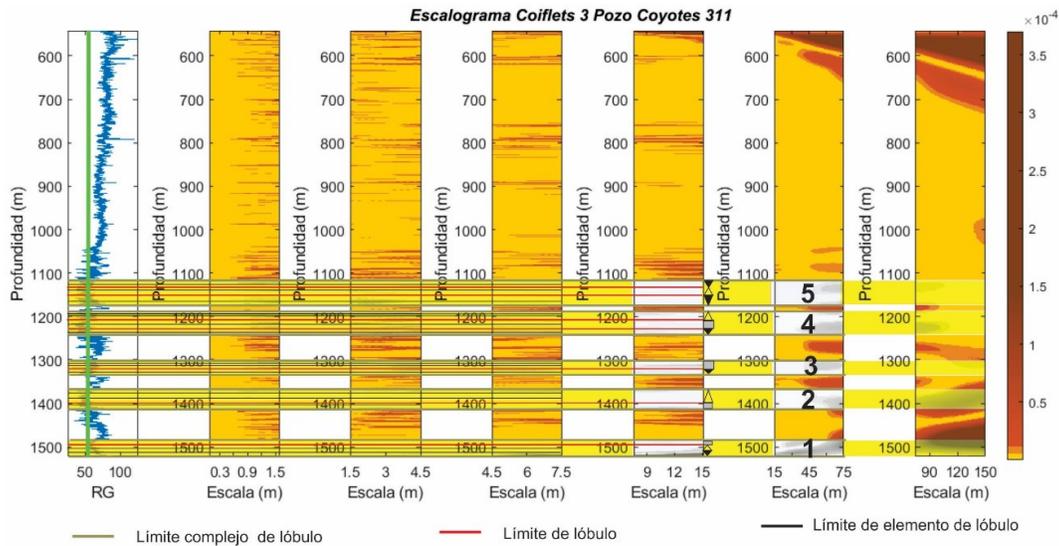


Figura 6.3: Registro de rayos gamma del C311 y su escalogramas usando la *coif3*, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m d) 15 - 70 m d) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*.

La estructura jerárquica en el pozo Coyotes 312 también consiste en cinco *CLs*. En el *CL1* se observa un patrón estratigráfico que va de constante a creciente-decreciente en su base a constante a decreciente en la cima, con elementos de lóbulo tipo *FeL* a *O*. En el *CL2* se observa un patrón estratigráfico que va de constante a creciente en su la base a constante en la cima, cuyos elementos son tipo *FeL*. El *CL3* presenta un patrón estratigráfico constante de base a cima, cuyos elementos son de tipo *eL*. El *CL4* se observa un patrón estratigráfico que va desde creciente en su base a decreciente en la cima, cuyos elementos de lóbulo son de tipo *FeL*. El *CL5* presenta un patrón que va de constante a decreciente en su base a constante en la cima, cuyos elementos de lóbulo son de tipo *FeL* (Figura 6.4).

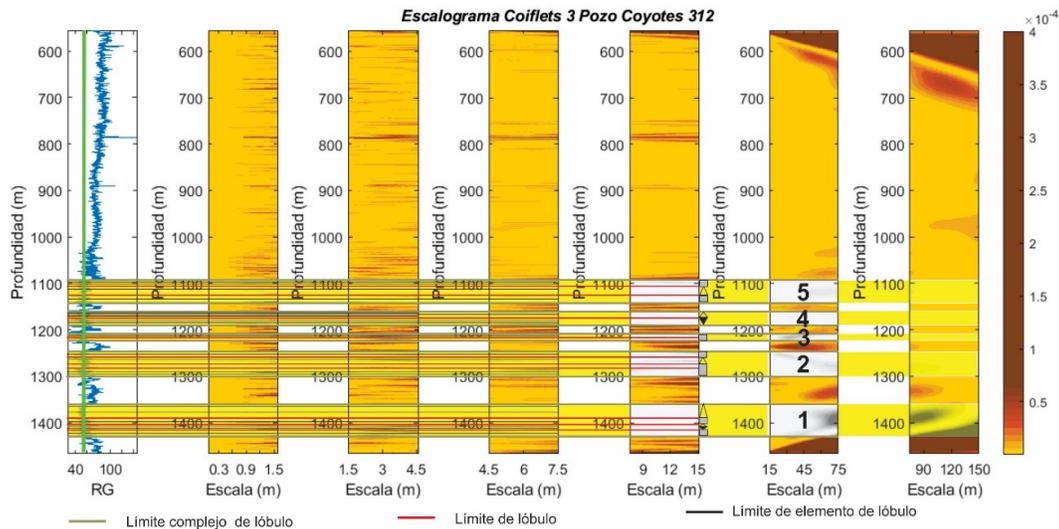


Figura 6.4: Registro de rayos gamma del C312 y sus escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m e) 15 - 70 m f) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los ELs .

La estructura jerárquica definida para el pozo Coyotes 318 consiste en cinco CLs . En el $CL1$ se observa un patrón estratigráfico que va de constante en la base a decreciente-creciente en la cima, cuyos elementos de lóbulos son de tipo O . El $CL2$ presenta un espesor poco común en este tipo de depósito, lo más probable es que el escalograma haya agrupados dos complejos en uno, sin embargo se observa un patrón que va de constante a creciente-decrecientes en la base luego pasa a decreciente, se repite el mismo patrón, posteriormente se observa un patrón constante a creciente luego pasa de constante a creciente-decreciente y de decreciente-creciente en la cima, los elementos de lóbulo en estos patrones, pasan de eL a FeL a eL . El $CL3$ presenta un patrón estratigráfico que va de constante en la base a creciente-decreciente en la cima, cuyos elementos de lóbulo son de tipo eL . El $CL4$ presenta un patrón que va de constante en la base a decreciente en la cima con elementos de lóbulos de tipo eL . En el $CL5$ se observa un patrón estratigráfico que va de constante en la base a decreciente en la cima, cuyos elementos de lóbulo son de tipo eL (Figura 6.5).

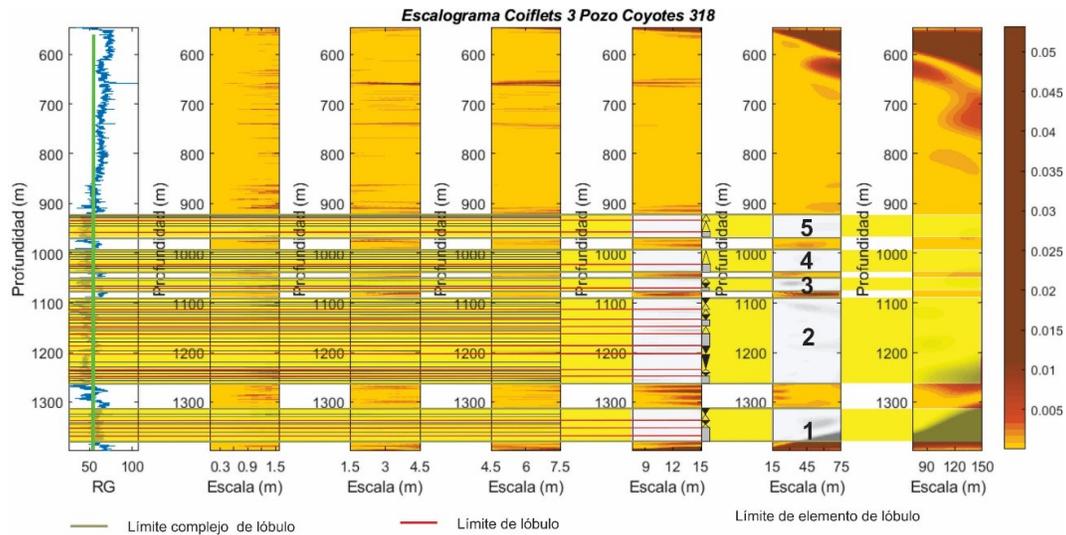


Figura 6.5: Registro de rayos gamma del C318 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 – 4.5 m c) 4.5 – 7.5 m d) 7.5 - 15 m e) 15 - 70 m e) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*.

La estructura jerárquica definida para el pozo Coyotes 331 consiste en cinco *CLs*. El *CL1* presenta un patrón que va de creciente-decreciente en la base a constante, luego creciente a constante y de decreciente a constante en la cima con elementos de lóbulo de *FeL*. El *CL2* presenta un patrón constante de base a cima pues no se aprecia estructura de elementos de lóbulos dentro de estos, de tipo *FeL*. En el *CL3* se observa un patrón de constante a creciente en la base y se repite el mismo ciclo a la cima, con elementos de lóbulo de tipo *eL* a *FeL*. En el *CL4* se observa un patrón estratigráfico que va de creciente a decreciente en la base y luego pasa constante en la cima, con elementos de lóbulos de tipo *FeL*. El *CL5* presenta un patrón estratigráfico constante en la base a creciente en la cima, cuyos elementos de lóbulo son de tipo *O* (Figura 6.6).

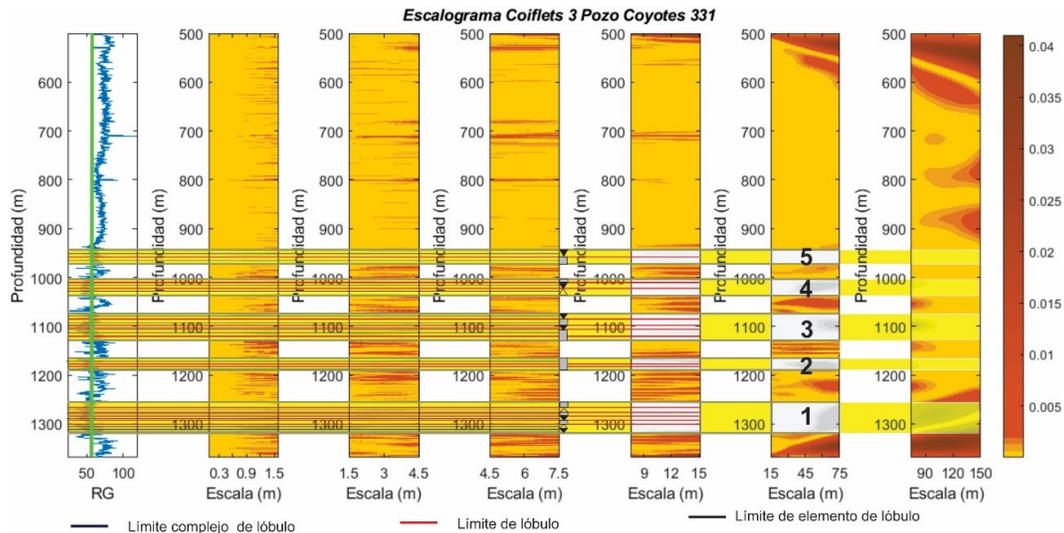


Figura 6.6: Registro de rayos gamma del C331 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 – 4.5 m c) 4.5 – 7.5 m d) 7.5 - 15 m e) 15 - 70 m e) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*.

La estructura jerárquica definida para el pozo Coyotes 332 consiste en cuatro *CLs*. El *CL1* presenta un patrón estratigráfico que va de decreciente a decreciente en la base a constante en la cima, con elementos de lóbulo de tipo *eL*. El *CL2* presenta un patrón estratigráfico que va de creciente a decreciente en la base a constante en la cima, cuyos elementos de lóbulo pasan de tipo *FeL* a *eL*. El *CL3* presenta un patrón estratigráfico que va de decreciente a decreciente en la base y luego pasa a constante en la cima, con elementos de lóbulo de tipo *eL*. El *CL4* presenta un patrón estratigráfico constante de base a cima con elementos de lóbulo de tipo *eL* (Figura 6.7).

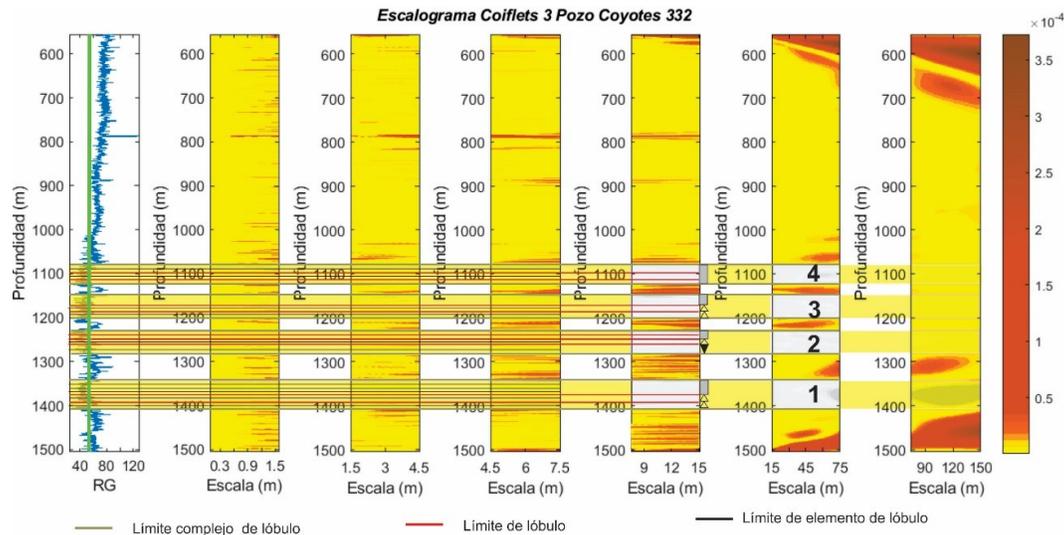


Figura 6.7: Registro de rayos gamma del C332 y sus escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m e) 15 - 70 m f) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*.

La estructura jerárquica definida para el pozo Coyotes 333 consiste en cuatro *CLs*. En el *CL1* presenta un patrón estratigráfico que va de creciente a decreciente en la base luego pasa de decreciente a constante en la cima, con elementos de lóbulo de tipo fuera de *eL*. El *CL2* presenta un patrón estratigráfico que va de constante a decreciente-creciente en la base y luego pasa a ser decreciente en la cima, con elementos de lóbulo de tipo *FeL*. El *CL3* presenta un patrón estratigráfico que va constante a decreciente en la base a constante en la cima, cuyos elementos de lóbulos son de tipo *FeL*. El *CL4* presenta un patrón estratigráfico que va de constante a creciente en la base y luego pasa a constante en la cima, cuyos elementos de lóbulo son de tipo *eL* (Figura 6.8).

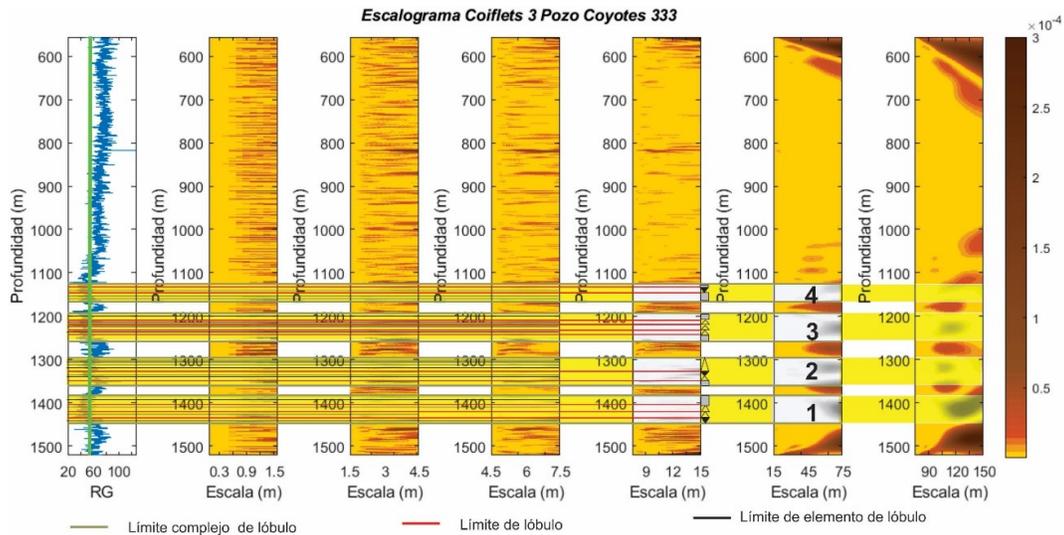


Figura 6.8: Registro de rayos gamma del C333 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m e) 15 - 70 m f) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*.

La estructura jerárquica definida para el pozo Coyotes 351 consiste en tres *CLs*. El *CL1* presenta un patrón estratigráfico que va de constante a creciente en la base y luego pasa de creciente a creciente-decreciente en la cima, con elementos de lóbulo de tipo *FeL*. El *CL2* presenta un patrón estratigráfico que va de decreciente a constante en la base luego pasa a creciente-decreciente y de creciente a constante en la cima, con elementos de lóbulo de tipo *FeL* a *O*. El *CL3* presenta un patrón estratigráfico que va de decreciente-creciente a constante en la base y luego pasa a decreciente en la cima, con elementos de lóbulo que pasan de *FeL* a *eL* (Figura 6.9).

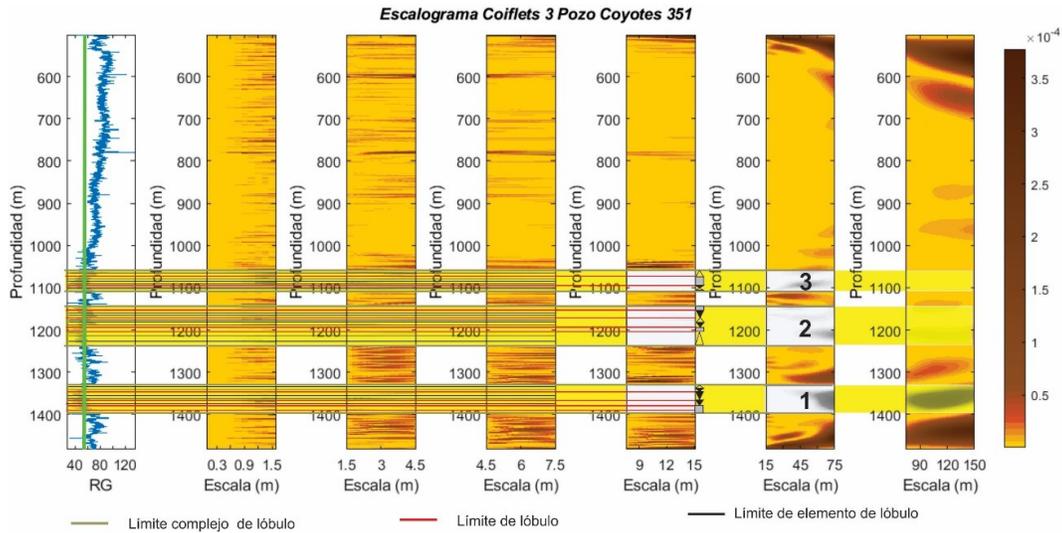


Figura 6.9: Registro de rayos gamma del C351 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 - 4.5 m c) 4.5 - 7.5 m d) 7.5 - 15 m e) 15 - 70 m f) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*.

La estructura jerárquica definida para el pozo Coyotes 353 consiste en cuatro *CLs*. El *CL1* presenta un patrón estratigráfico que va de constante a creciente en la base y pasa de creciente a decreciente a creciente-decreciente en la cima con elementos de lóbulo de tipo *FeL*. Los cuerpos *CL2*, *CL3* y *CL4* presentan patrón estratigráfico constante con elementos de lóbulo de tipo *FeL* (Figura 6.10).

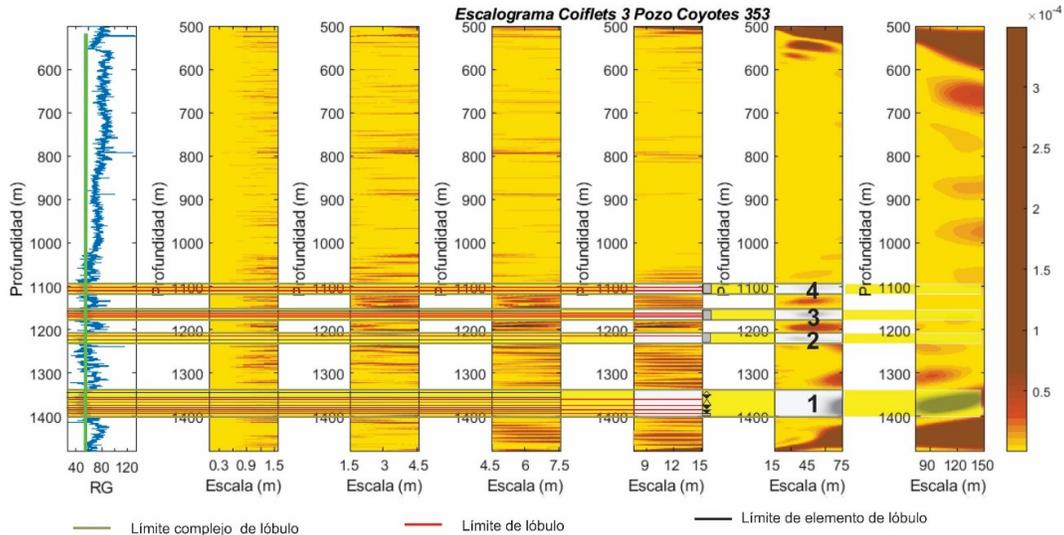


Figura 6.10: Registro de rayos gamma del C351 y su escalogramas usando la coif 3, considerando diferentes escalas a) 0 - 1.5 m b) 1.5 – 4.5 m c) 4.5 – 7.5 m d) 7.5 - 15 m e) 15 - 70 m f) 75 - 150 m. El color amarillo señala los coeficientes de baja intensidad y el color naranja a marrón los coeficientes de alta intensidad que marcan límites de interface. Los escalogramas muestran los niveles jerárquicos definidos a distintas escalas. En el borde de la escala de 15 m se señalan los patrones estratigráficos encontrados en los lóbulos a partir de los *ELs*.

De los escalogramas, además de los niveles jerárquicos, se pudieron distinguir patrones estratigráficos en todos los órdenes jerárquicos los cuales son de utilidad en el estudio de procesos sedimentarios del sistema.

El análisis de los patrones estratigráficos y niveles jerárquicos estratigráficos encontrados con la transformada de ondícula sugieren que es posible utilizar los escalogramas que son el resultado gráfico de la matriz de los coeficientes de la ondícula para encontrar puntos particulares dentro de la serie espacial a diferentes escalas que revelan la estructura del depósito. Esto permite definir las estructuras jerárquicas a partir de la separación de cuerpos ricos en arena (color amarillo) por líneas de intensidad de la ondícula (color marrón) que se corresponden con intervalos arcillosos que marcan puntos de interface litológicos.

6.3. Definiendo la jerarquía estratigráfica en términos de espesores y niveles jerárquicos con las líneas de los coeficientes

En los pozos coyotes 311, 312, 318, 331 y 333 se aprecia la presencia de cinco cuerpos arenosos definidos como *CLs* y los pozos coyotes 332 y 353 presentan solo cuatro *CLs*. Los límites cima y base de estos cuerpos fueron determinados a partir de los puntos inflexión seleccionados en cada una de las líneas de coeficientes.

Para identificar los puntos de inflexión que definen los *CLs*, se usó en la línea de coeficientes de mayor escala (75 - 150 m), donde en caso de faltar un punto de inflexión de interés en dicha escala, se recurrió a la siguiente curva de la escala de mayor frecuencia. Para la identificación

de los *Ls* se utilizó la curva con escala 7.5 - 15 m y para los *ELs* se utilizó la curva 4.5 - 7.5 m, complementada con las curvas con escalas de 0 - 1.5 m y 1.5 - 4.5 m.

Para las escalas 0 - 15 m se puede analizar que los contenidos de frecuencia son altos mostrando que los coeficientes dentro de los cuerpos arenosos presentan valores de baja intensidad, mientras que los valores de coeficientes en los horizontes guías son de alta, lo cual significa que dentro de esos cuerpos arenosos existe una jerarquía de orden inferior (*Ls*) que están siendo separados por coeficientes de alta intensidad (*ILs*). En las escalas de 15 - 150 m disminuye la frecuencia y refleja en la línea de coeficientes los miembros de la jerarquía de orden superior, verificados por los valles con bajos valores en la línea de coeficientes donde se concentran los cuerpos areno-arcillosos y en las crestas se ubican los cuerpos de lutitas con poca arena (Figura 6.11, Figura 6.12, Figura 6.13, Figura 6.14, Figura 6.15, Figura 6.16, Figura 6.17, Figura 6.18).

Aunque el análisis de esta investigación está centrado en la caracterización estática de cuerpo mayoritariamente arenosos, sin embargo, en la zona de lutitas se puede observar que existen puntos de inflexión que quizás marquen puntos de interface con otros tipos de litología que evidencia la ocurrencia de procesos sedimentarios que podrían usarse para documentar la historia tectonosedimentaria de la cuenca.

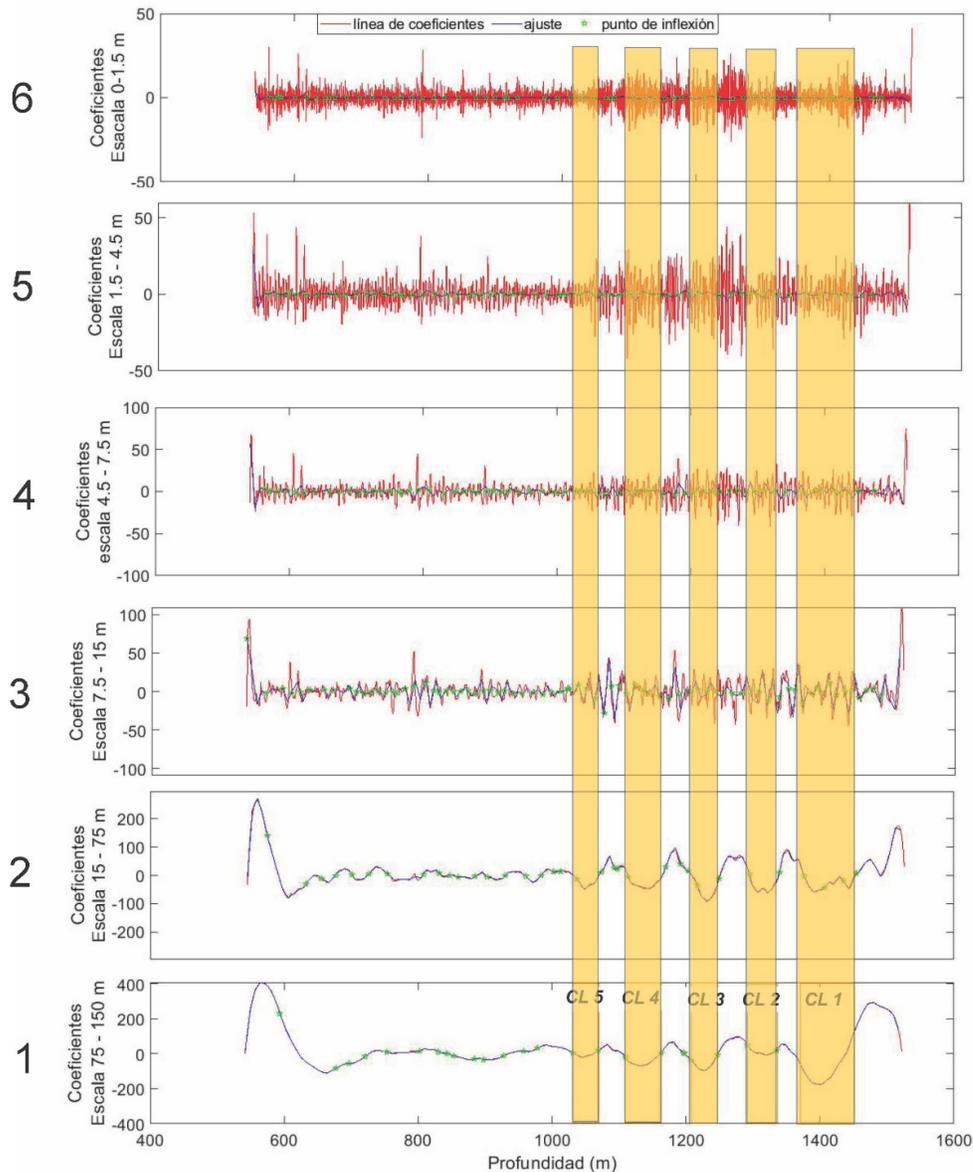


Figura 6.11: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-311 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerárquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

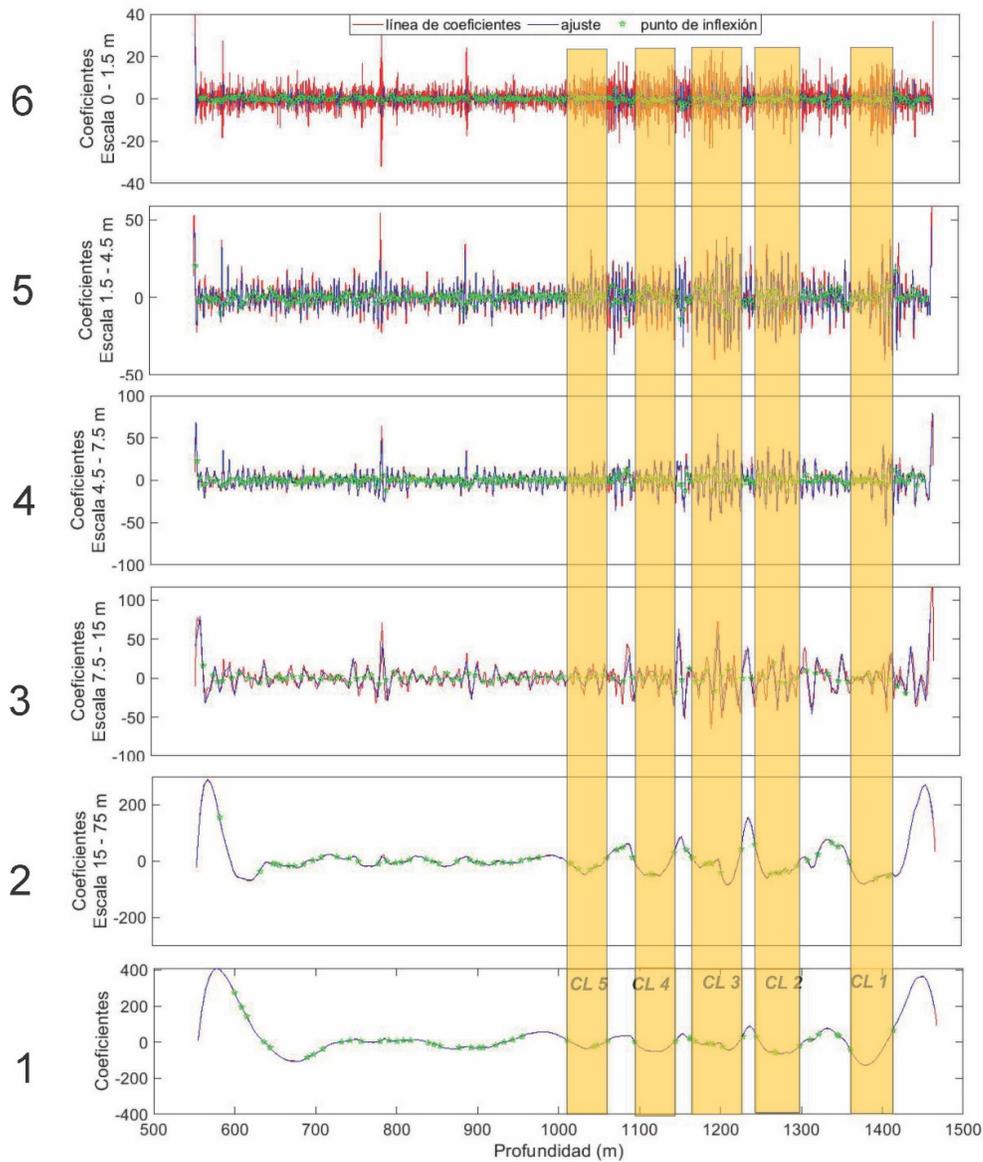


Figura 6.12: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-312 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior CL se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de L se usó la curva 3 y para el orden jerárquico de EL se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

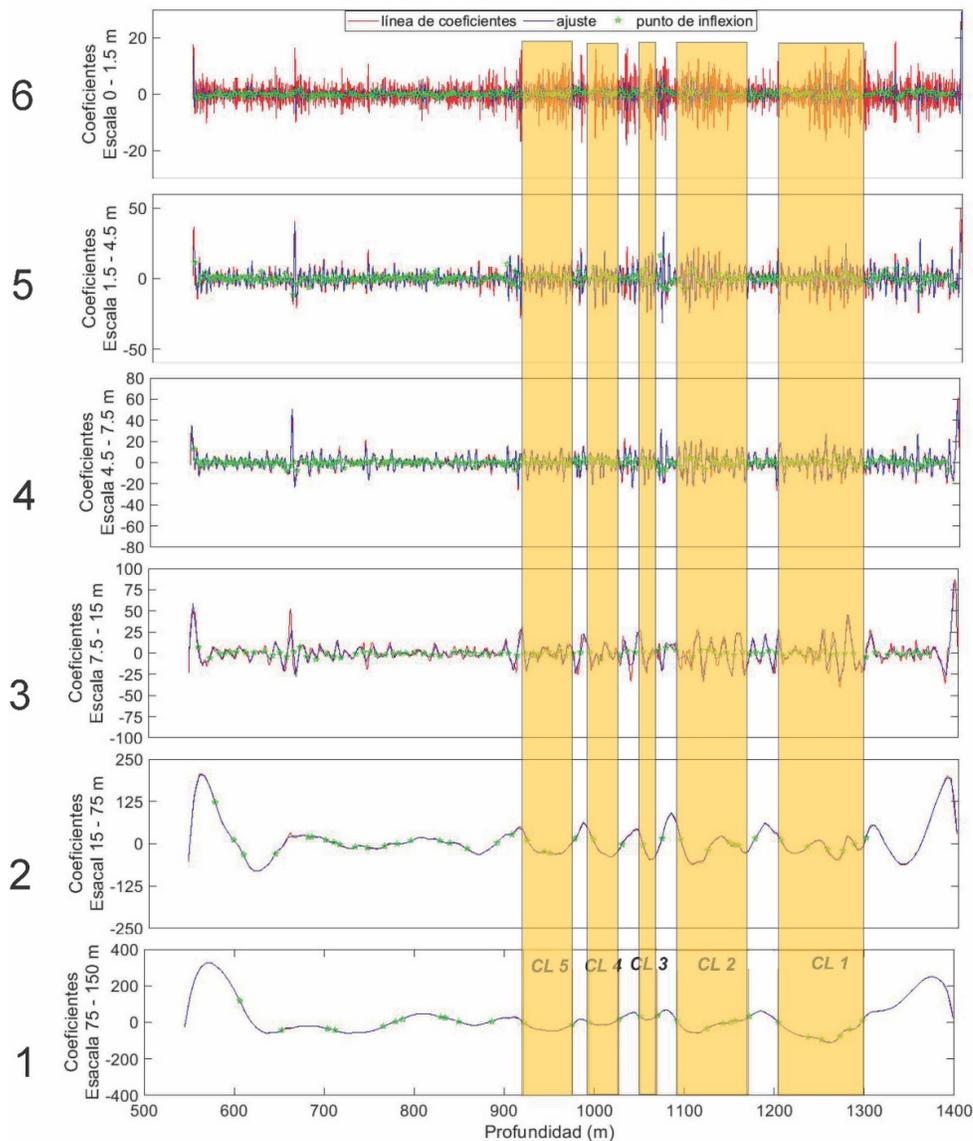


Figura 6.13: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-318 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior CL se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de L se usó la curva 3 y para el orden jerárquico EL se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

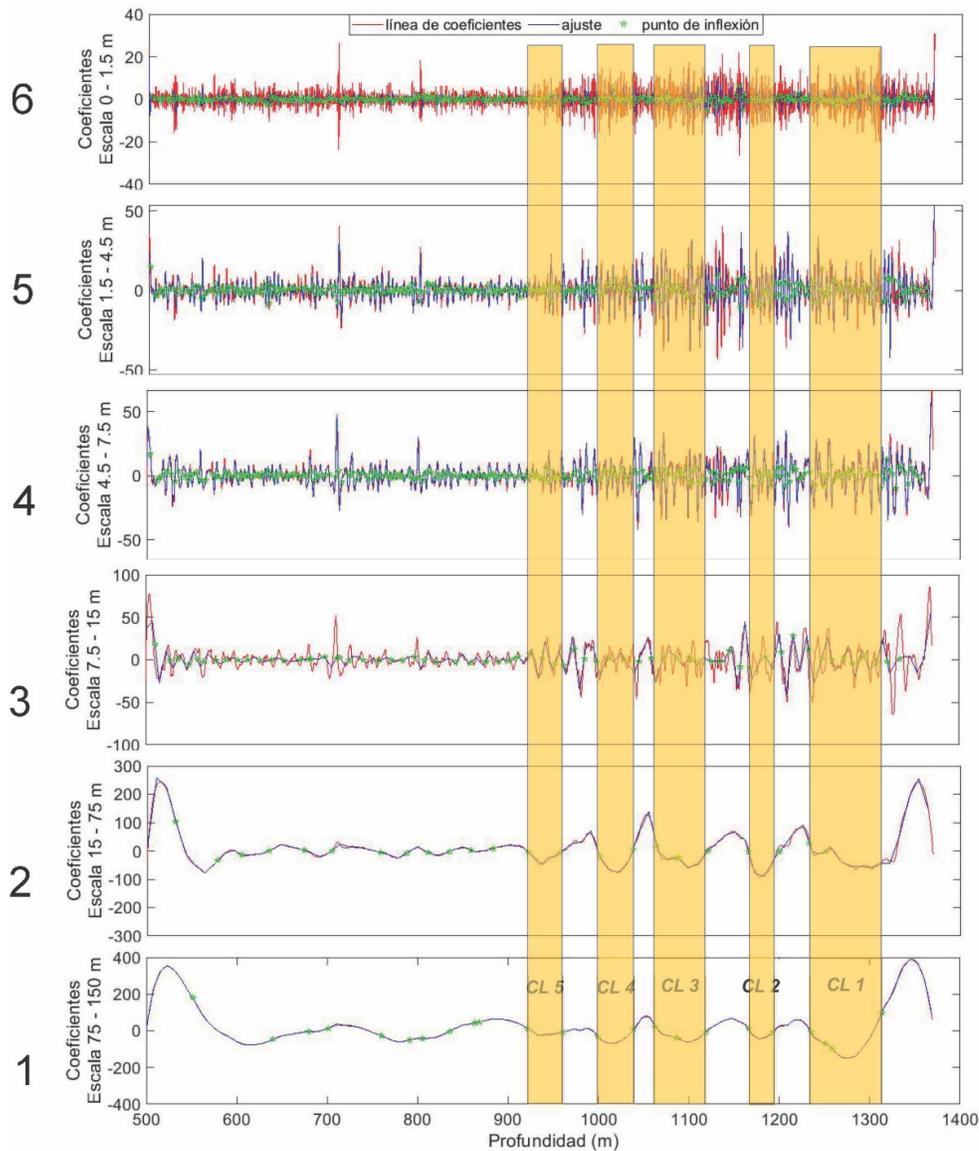


Figura 6.14: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-331 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior CL se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de L se usó la curva 3 y para el orden jerárquico EL se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

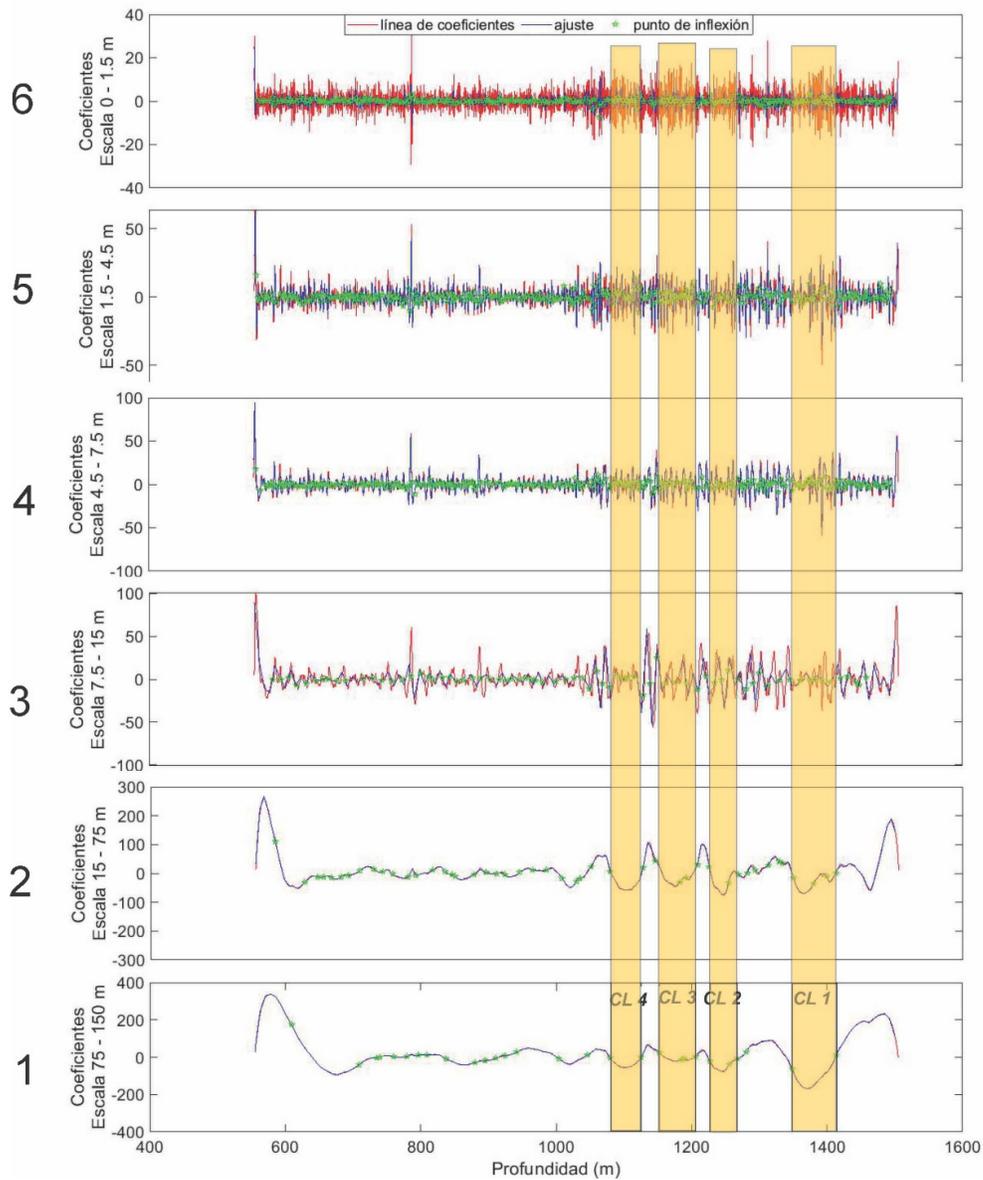


Figura 6.15: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-332 con cuatro cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior CL se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de L se usó la curva 3 y para el orden jerárquico EL se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

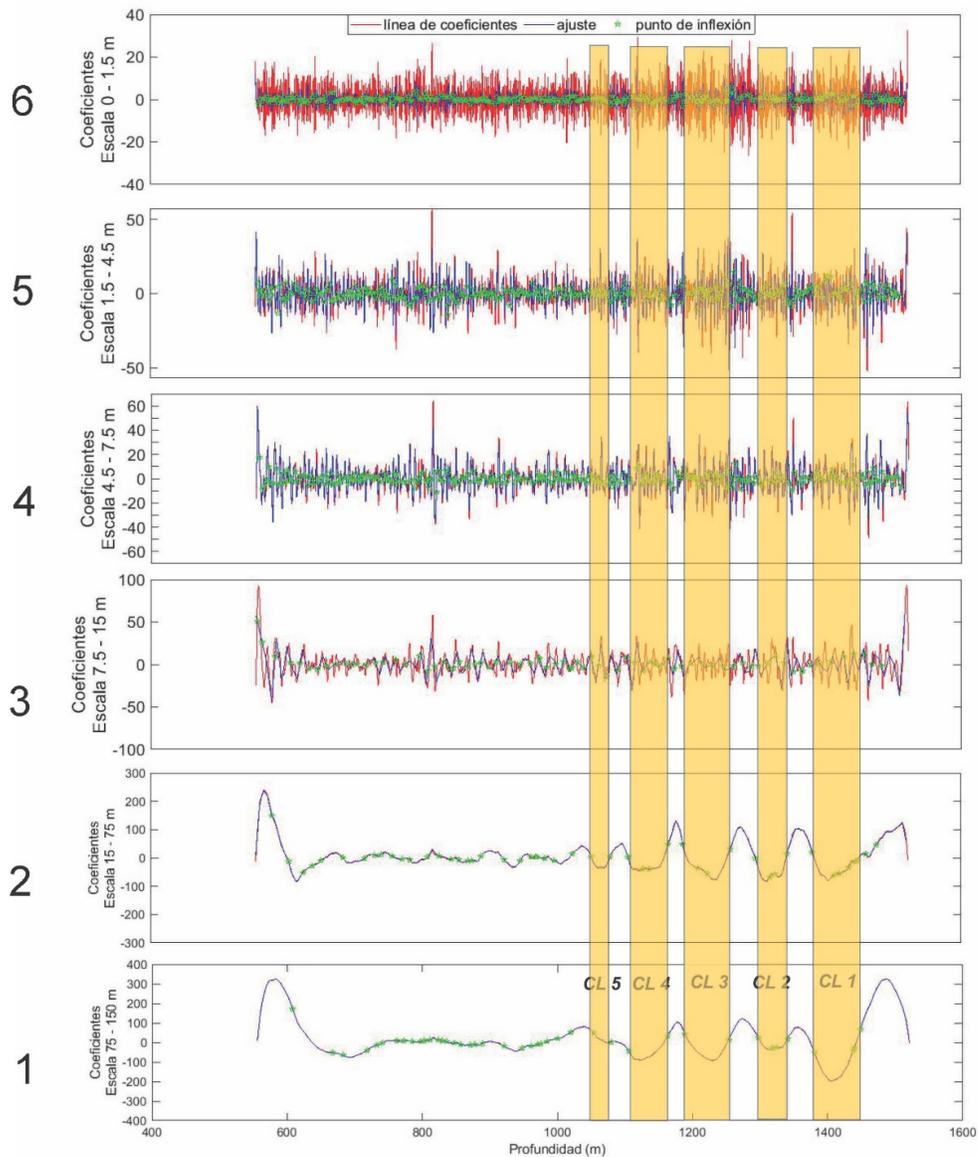


Figura 6.16: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-333 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior CL se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de L se usó la curva 3 y para el orden jerárquico CL se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

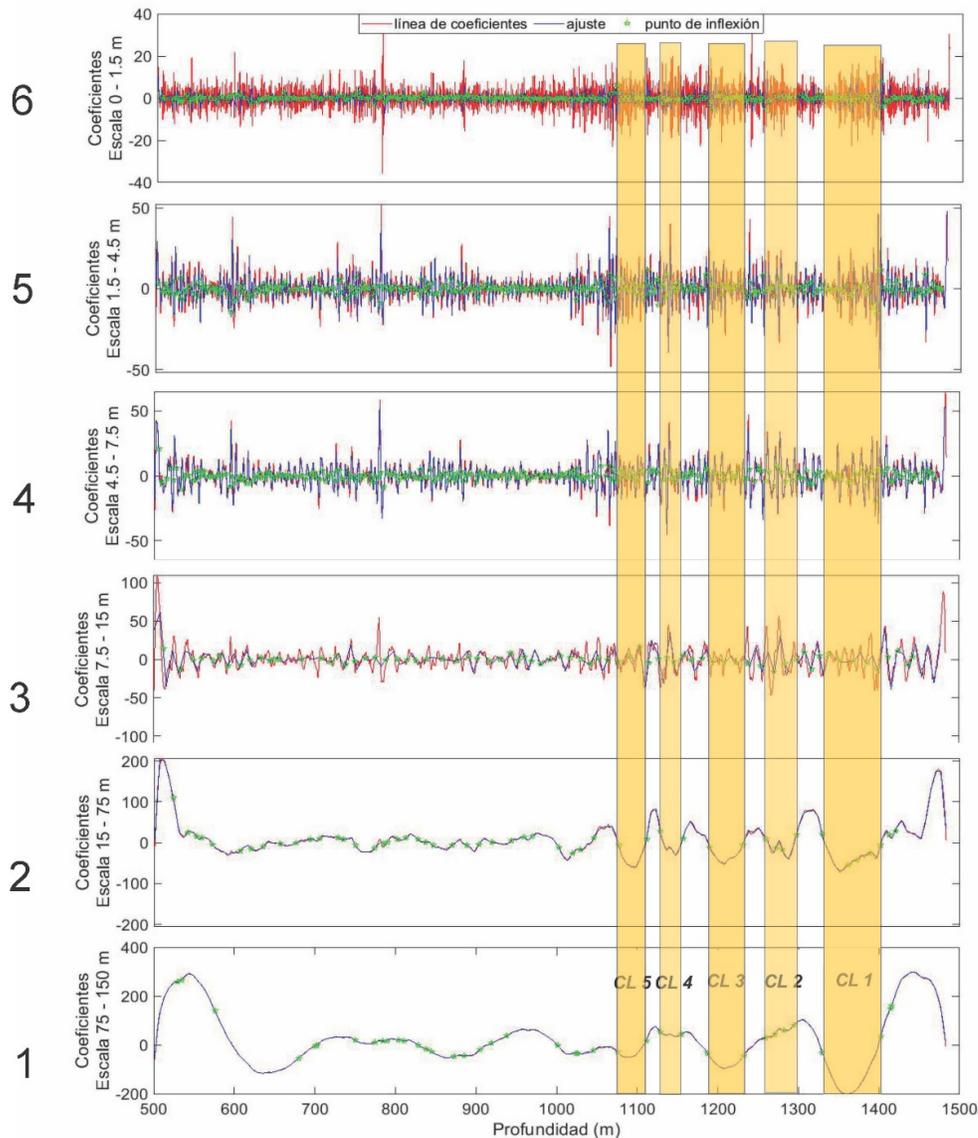


Figura 6.17: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-351 con cinco cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior *CL* se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de *L* se usó la curva 3 y para el orden jerárquico *EL* se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

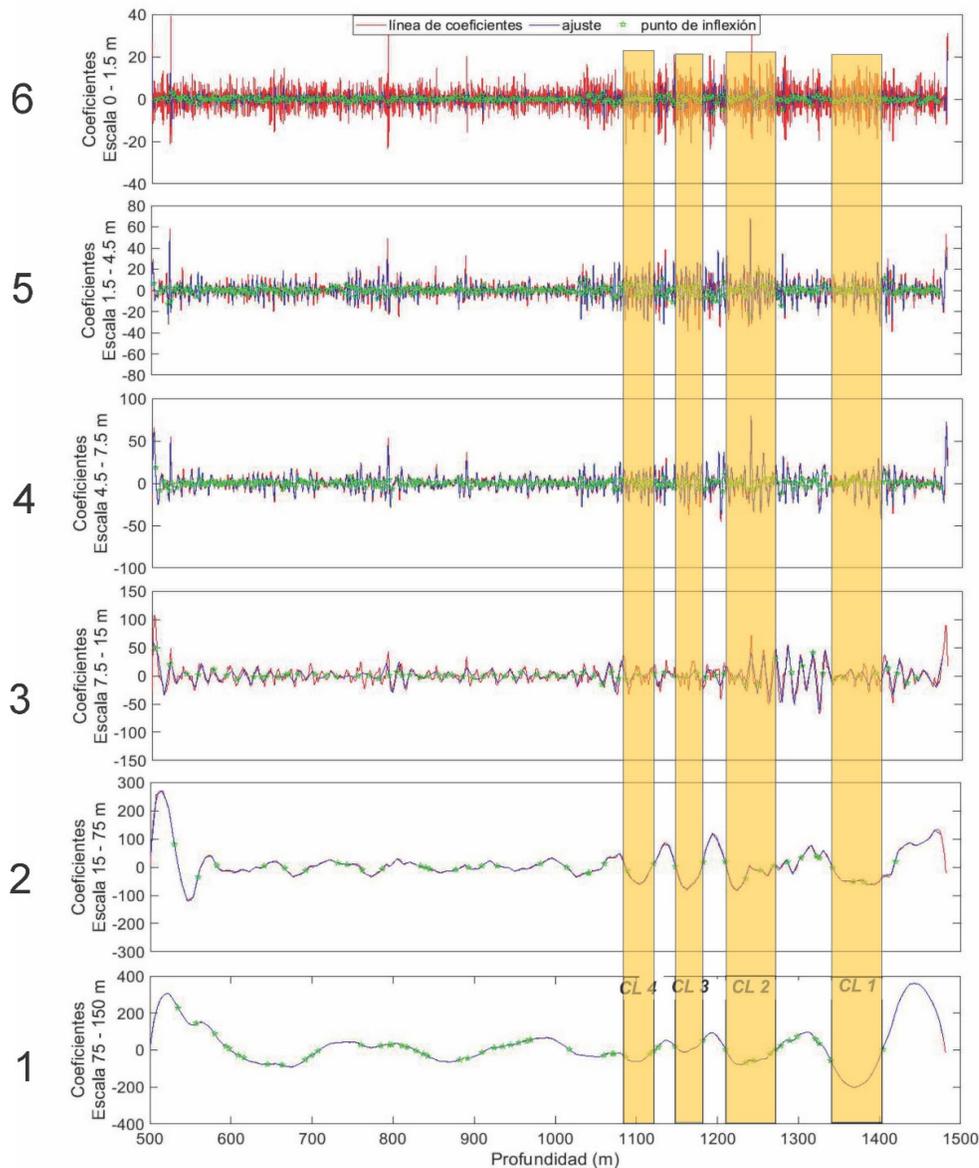


Figura 6.18: La gráfica muestra la curva de la línea de coeficientes con los puntos de inflexión calculados para el C-353 con cuatro cuerpos sombreados en color amarillo. La cima y base de los cuerpos de orden superior se toman a partir de la curva de menor frecuencia y mayor escala, estos puntos de inflexión se repiten en varias de las curvas de menor escala. Para la identificación de orden superior CL se usó en primer lugar la curva 1 complementada con la curva 2 que es la curva más próxima. Para el orden jerárquico de L se usó la curva 3 y para el orden jerárquico EL se usó la curva 4 complementada con las curvas 5 y 6. La frecuencia en las curvas aumenta de la curva 1 a la curva 6, siendo esta última la de mayor frecuencia.

La Tabla 6.2 muestra los límites (cima y base) de los cuerpos ricos en arena identificados en las líneas de los coeficientes y en los escalogramas. Con estos límites se calcularon los espesores correspondientes al nivel jerárquico de orden superior complejo de lóbulo definidos en (Prélat et al., 2009; Prelat et al., 2010). Se observa que entre los métodos (escalograma y línea de coeficientes) existen diferencia en cuanto a los límites en profundidad de los cuerpos, sin embargo, en algunos cuerpos (CLs) se presentan espesores parecidos.

Pozo	LÍNEA DE COEFICIENTES				ESCALOGRAMA			
	Cuerpos arenoso	Cima	Base	Espesor (m)	Cuerpos arenoso	Cima	Base	Espesor (m)
C311	<i>CL5</i>	1031	1068	37	<i>CL5</i>	1117	1172	55
	<i>CL4</i>	1110	1163	53	<i>CL4</i>	1186	1240	54
	<i>CL3</i>	1208	1247	39	<i>CL3</i>	1301	1336	35
	<i>CL2</i>	1292	1335	43	<i>CL2</i>	1370	1415	45
	<i>CL1</i>	1372	1449	76	<i>CL1</i>	1480	1518	38
C312	<i>CL5</i>	1012	1060	48	<i>CL5</i>	1091	1146	55
	<i>CL4</i>	1094	1144	50	<i>CL4</i>	1164	1190	26
	<i>CL3</i>	1165	1227	62	<i>CL3</i>	1211	1222	11
	<i>CL2</i>	1245	1298	52	<i>CL2</i>	1250	1300	50
	<i>CL1</i>	1361	1413	52	<i>CL1</i>	1360	1427	67
C318	<i>CL5</i>	922	975	53	<i>CL5</i>	923	968	45
	<i>CL4</i>	996	1027	31	<i>CL4</i>	996	1038	42
	<i>CL3</i>	1051	1070	20	<i>CL3</i>	1053	1077	24
	<i>CL2</i>	1092	1172	80	<i>CL2</i>	1094	1272	178
	<i>CL1</i>	1205	1298	93	<i>CL1</i>	1314	1377	63
C331	<i>CL5</i>	922	960	38	<i>CL5</i>	943	969	26
	<i>CL4</i>	999	1039	40	<i>CL4</i>	1005	1035	30
	<i>CL3</i>	1063	1119	56	<i>CL3</i>	1075	1127	52
	<i>CL2</i>	1166	1193	27	<i>CL2</i>	1166	1187	21
	<i>CL1</i>	1235	1313	79	<i>CL1</i>	1256	1318	62
C332	<i>CL4</i>	1080	1126	46	<i>CL4</i>	1082	1113	31
	<i>CL3</i>	1153	1205	52	<i>CL3</i>	1150	1200	50
	<i>CL2</i>	1227	1268	40	<i>CL2</i>	1230	1279	49
	<i>CL1</i>	1348	1414	66	<i>CL1</i>	1343	1407	64
C333	<i>CL5</i>	1054	1080	26				
	<i>CL4</i>	1106	1163	57	<i>CL4</i>	1127	1164	37
	<i>CL3</i>	1189	1253	64	<i>CL3</i>	1194	1256	62
	<i>CL2</i>	1297	1340	43	<i>CL2</i>	1300	1358	58
	<i>CL1</i>	1381	1449	68	<i>CL1</i>	1384	1403	19
C351	<i>CL5</i>	1076	1111	35				
	<i>CL4</i>	1129	1156	27	<i>CL4</i>			
	<i>CL3</i>	1187	1232	45	<i>CL3</i>	1061	1107	46
	<i>CL2</i>	1259	1294	35	<i>CL2</i>	1147	1237	90
	<i>CL1</i>	1330	1402	72	<i>CL1</i>	1333	1396	63
C353	<i>CL4</i>	1086	1121	35		1096	1117	21
	<i>CL3</i>	1148	1182	35	<i>CL3</i>	1156	1178	22
	<i>CL2</i>	1210	1272	62	<i>CL2</i>	1209	1230	21
	<i>CL1</i>	1340	1404	64	<i>CL1</i>	1341	1400	59

Cuadro 6.2: Valores de la cima y base de los complejos de lóbulos calculados a partir de los puntos de inflexión en la línea de coeficientes de los pozos y los escalogramas.

La disminución en la cantidad de puntos de inflexión con el aumento de la escala dentro de los *CLs* marca la existencia de una organización jerárquica interna desde los *ELs* hasta los

Ls. En las líneas de coeficientes a distintas escalas hay puntos de inflexión con valores muy similares que delimitan órdenes multiescala.

El número de *CLs* calculados con los escalogramas y con las líneas de coeficientes son muy parecidos, sin embargo, subsisten algunas diferencias como se aprecia en la Tabla 6.2, mientras que para los *Ls* y *ELs* las diferencias en la cantidad de componentes jerárquicos es más notable. Estas diferencias se manifiestan en la medida que se disminuye la escala se pierde la exactitud al identificar los puntos de inflexión en la línea de coeficientes a partir del modelo de ajuste de los datos. Para estos órdenes de jerarquía se siguió el mismo criterio de similitud y repetición del valor cima y base a diferentes escalas de orden inferior; ya que la existencia de los puntos de inflexión en sí mismo constituyen puntos donde ocurrió un cambio de *eF*. A partir de los puntos inflexión se obtuvo la siguiente estructura jerárquica para los ochos pozos (Tabla 6.3).

Jerarquía estratigráfica	Elemento de lóbulo (<i>EL</i>)	Lóbulo (<i>L</i>)	Complejo de lóbulo (<i>CL</i>)
Coyote 311	82	19	5
Coyote 312	71	26	5
Coyote 318	76	35	5
Coyote 331	69	20	5
Coyote 332	60	19	4
Coyote 333	79	21	5
Coyote 351	68	18	5
Coyote 353	62	13	4

Cuadro 6.3: Jerarquía estratigráfica determinada en los depósitos a partir de los pozos coyotes de la Formación Chicontepec con las líneas de coeficientes y los puntos de inflexión.

La cantidad de componentes en la jerarquía de órdenes menores obtenidos con las líneas de coeficientes aumenta considerablemente con respecto a los componentes identificados con los escalogramas (Tabla 6.1 y Tabla 6.3). La jerarquía estratigráfica observada en estos cuerpos, es del tipo definido por Prélat et al. (2009); Prélat et al. (2010) para depósitos de abanicos de aguas profundas (Anexo B).

Capítulo 7

Discusión de los resultados

Los modelos jerárquicos propuestos por Con los escalogramas de la ondícula *coif3*, aplicada a los Pozos *P1*, *P2* y *P3*, se reconocieron los límites (profundidades de cimas y bases) de los diferentes niveles jerárquicos estratigráficos contenidos en los depósitos. Desde la escala de 0 a 10 m se observan los coeficientes de alta intensidad marcando el nivel jerárquico “*L*”, indicando los intervalos de profundidad de la interfaz correspondiente (*L – IL*); los límites del nivel jerárquico “*EL*” por lo general no se alcanzan a diferenciar, , salvo en algunos casos como en el intervalo de 0 a 2.5 m del *P3* (Figura 5.7) a. En los complejos de lóbulo detectados a partir de los 10 m en la escala de observación, se determinan bien las profundidades de las interfaces litológicas *CL – ICL* (Figura 5.7 e, f y g).

Los escalogramas son la salida gráfica de la matriz de coeficientes, en este caso de la ondícula *coif3*, los cuales son útiles para identificar las interfaces litológicas del depósito, con capacidad de resolución a partir del nivel jerárquico “*L*”, aunque los *Els* estén presentes, la resolución de los escalogramas no permite delimitarlos debido a que, en la matriz de coeficientes de la ondícula, el reflejo de los espesores utilizados para delimitar los *Els* es muy fino lo que provoca que no se resalten sus valores de coeficientes de alta intensidad en el escalograma a esta pequeña escala. Esto nos permitió observar que los escalogramas pueden utilizarse para la interpretación de la jerarquía estratigráfica dada su alta capacidad de correspondencia entre los puntos de interface litológico con los puntos de interface definidos en el *RG*.

Al calcular las líneas de coeficientes para los pozos *P1*, *P2* y *P3*, se observa que en las diferentes escalas existe una consistencia en cuanto a correspondencia con todos los niveles jerárquicos, incluidos los *ELs*, que no se observaron nítidamente en los escalogramas pero que se diferencian fácilmente en las líneas de coeficientes. En las líneas de coeficientes, a diferentes escalas, se pudo observar la correspondencia que existe entre los puntos de inflexión de estas líneas y los puntos de interface litológica (Figura 5.9), con estos puntos de inflexión, y los registros de *RG*, se obtienen los correspondientes intervalos de profundidad de las diferentes interfaces estratigráficas (Tabla 5.3). Las profundidades de las interfaces estratigráficas, obtenidas de los puntos de inflexión, permiten calcular los espesores de los diferentes niveles jerárquicos. (Tabla 5.3). Al usarse las líneas de coeficientes, el análisis se vuelve más cuantitativo que con los escalogramas, ya que con las líneas de coeficientes se pueden determinar los puntos de inflexión que son puntos de interface litológico a diferentes escalas. La correspondencia entre puntos de inflexión y puntos de interface litológico relacionan los espesores que definen niveles jerárquicos propios del sistema, y lo más importante, permite hacer el análisis desde el nivel jerárquico más pequeño detectado por la ondícula (*EL*).

Es importante interpretar la Tabla 5.3, resultante de calcular los puntos de inflexión, para

conocer las tendencias estratigráficas de los espesores que define cada nivel jerárquico, sobre la base del parecido en valor de profundidad de un mismo punto de inflexión a diferentes escalas.

Con los resultados obtenidos en los datos sintéticos, pasamos a aplicar la misma metodología en datos reales tomando como ejemplo ocho pozos del sector de 3 del campo Coyotes.

Para los pozos Coyotes, cuya estructura jerárquica no se conoce a priori en este estudio, se comenzó con un bosquejo de la jerarquía de orden superior partiendo de los registros de *RG*, donde se identifican intervalos estratigráficos de cuerpos mayoritariamente arenosos con dimensiones muy variables. En los pozos Coyotes 311, 312 y 318 se distinguen nueve cuerpos, en el pozo Coyotes 331 cinco cuerpos, en los pozos Coyotes 332 y 333 se distinguen seis cuerpos y en los Coyotes 351 y 353 con cuatro cuerpos (Figura 6.2). Esto pone de manifiesto la gran heterogeneidad lateral y vertical de estos depósitos areno-arcillosos. Se pudo visualizar que el patrón estratigráfico en todos los pozos analizados cambia de un depósito de cientos de metros, en la parte superior, mayoritariamente compuesto de lutitas, a otro también muy potente donde se depositan cuerpos areno-arcillosos de espesores variables separados por cuellos de lutitas.

Con la transformada de ondícula se obtuvieron los escalogramas correspondientes a los ocho pozos, con lo cual se analizó la jerarquía interna dentro del paquete estratigráfico inferior, donde se pudieron distinguir las agrupaciones y dimensiones de los órdenes jerárquicos gracias a los patrones de intensidad de la ondícula, que reveló la existencia de cuerpos arenosos dentro de paquetes más potentes a diferentes escalas, poniendo de manifiesto la organización inherente al depósito de alternancia de cuerpos mayoritariamente de areniscas separados por intervalos arcillosos (Figura 6.11, Figura 6.12, Figura 6.13, Figura 6.14, Figura 6.15, Figura 6.16, Figura 6.17 y Figura 6.18).

Los escalogramas, a diferencia de los *RG*, constituyen una aproximación al estudio estratigráfico de los depósitos, ya que con el análisis de estos se muestran los tres niveles jerárquicos, los cuales están dentro de los rangos de escala propuestos en Prélat et al. (2009); Prélat et al. (2010) para abanicos de aguas profundas. Esta aproximación permite el comparar estructuras entre pozos minimizando lo subjetivo que implica hacerlo de manera visual solo con los patrones presentes en los *RG*.

Al usarse la línea de coeficientes, el análisis se vuelve más cuantitativo que con el empleo de los puros escalogramas, ya que con las líneas de coeficientes se pueden determinar los puntos de inflexión que son puntos de interface litológico a diferentes escalas. La correspondencia entre puntos de inflexión y puntos de interface litológico relacionan los espesores que definen a los niveles jerárquicos propios del sistema.

La jerarquía determinada con los escalogramas, y con las líneas de los coeficientes, muestran rangos de espesores muy parecidos dentro de los mismo órdenes jerárquicos (*ELs* y *Ls*), sin embargo, en cuanto a los espesores de los componentes de órdenes de jerarquía superior (*CLs*) no sucede así, lo cual significa que, a diferencia de los datos sintéticos, la resolución de los (*RG*), la composición mineralógica del depósito, y las propias discordancias del sistema, influyen en la estructura jerárquica revelada por el análisis.

Con las líneas de coeficientes los órdenes jerárquicos arrojaron los siguientes espesores promedio: *ELs* = 3.11 m, *Ls* = 10.52 m y *CLs* = 50.03 m, mientras que con los escalogramas *ELs* = 5.81 m, *Ls* = 11.23 m y *CLs* = 47.74 m. Las dimensiones calculadas son muy parecidas a las descritas en la literatura, ya que en estos niveles de jerarquía se pudo constatar que los espesores promedios de los *ELs* y *Ls* calculados, tanto con las líneas de coeficientes, como con los escalogramas, presentan valores muy parecidos a los considerados por Prélat et al.

(2009); [Prelat et al. \(2010\)](#), debiéndose las variaciones en espesores a los procesos sedimentarios propios del ambiente sedimentario (Tabla 2.1).

Al obtener los puntos de inflexión y calcular los espesores de los niveles de jerarquía se comete un error donde se pudo constatar que este disminuye según aumenta la escala de observación. Esto se debe a que el modelo de ajuste usado se ajusta mejor en las escalas más grandes donde la frecuencia es baja y por tanto las curvas de las líneas de los coeficientes están más suavizadas. Como el elemento de lóbulo es el componente jerárquico de menor, es en este donde se comente el mayor en el espesor calculado.

La cantidad de componentes de este orden jerárquico calculado (ELs) con los escalogramas es menor que la cantidad calculada con las líneas de inflexión, esto se debe a que en los escalogramas se obtienen los componentes de forma manual, siguiendo visualmente las líneas que forman los coeficientes de alta intensidad mientras que con la curva de las líneas de coeficientes cada punto de inflexión calculado representa un cambio abrupto en el valor del coeficiente, lo cual se traduce en una interface arena-arcilla. Tal es el caso, que se determinaron más componentes en los órdenes jerárquicos usando las líneas de coeficientes que los escalogramas. Esto permite inferir que las líneas de coeficientes como método para calcular espesores es más exhaustivo en la búsqueda jerárquica de los depósitos que los escalogramas. Los escalogramas obtenidos con los datos sintéticos mostraron que es posible detectar los coeficientes de alta intensidad que definen los niveles jerárquicos estratigráficos a partir del nivel de L , no siendo así para el nivel de EL . Sin embargo, en los escalogramas de los datos reales de los pozos coyotes, los coeficientes de alta intensidad pudieron notarse en la mayoría de los casos hasta el nivel de EL , aunque en algunos casos se observó que el L no presentó estructura jerárquica interna. Por otro lado, para los datos sintéticos las líneas de coeficientes muestran una alta coincidencia con los puntos de inflexión, determinados desde el nivel de escala del EL hasta el de CL . Sin embargo, en el caso de los datos reales no hubo coincidencia en cuanto a la cima y base de los componentes de los tres órdenes jerárquicos con los métodos de líneas de coeficientes y escalogramas. Por lo cual, la forma en que fueron construidos los datos sintéticos influyó en la correspondencia de los puntos de interface estratigráfica en la señal, debido a que estos puntos de interface cambian de manera brusca en la señal, mientras que en los datos reales no sucede así, evidenciando que los cambios de facies en la señal ocurren comúnmente de manera transicional, y no tan abruptamente como en los datos sintéticos, lo cual influye a la hora de determinar los espesores de cada orden jerárquico estratigráfico.

La metodología resuelve la jerarquía estratigráfica del depósito hasta el nivel de resolución de los datos. Aun cuando el error se incrementa en los componentes jerárquicos de orden inferior o de menor espesor, el análisis de la jerarquía estratigráfica mediante estos métodos arroja una resolución más fina que la obtenida con datos sísmicos, pero más burda que la capaz de obtener con el análisis de núcleos, pero con la gran ventaja de requerir de poco tiempo para tener una idea bastante aproximada al arreglo estratigráfico interno real de los abanicos de aguas profundas.

Las tres formas de analizar e interpretar la jerarquía estratigráfica de los depósitos mostraron que unas pueden ser cualitativas y otras cuantitativas en términos de los espesores y las cimas y bases de las agrupaciones jerárquicas estratigráficas. Mientras los registros geofísicos sugieren la presencia de muchos cuerpos ricos en arenas y analizan el sistema de manera global, siendo su interpretación tan variada como el número de intérpretes, en contraste, la transformada de ondícula, tanto con las líneas de coeficientes, como con los escalogramas, muestra información global y detallada del sistema, además de que revela agrupaciones regidas por los

sistemas jerárquicos estratigráficos, cuyas dimensiones están dentro de los rangos documentados en la literatura de abanicos de aguas profundas. Concluimos que tanto la disposición de los cuerpos encontrados, como su orden jerárquico estratigráfico interno, para los depósitos aquí estudiados de la Formación Chicontepec corresponden al orden jerárquico reportado para los sistemas de abanicos de aguas profundas; en este caso constituido de cinco *CLs*, *Ls* y *ELs*.

Conclusiones

Los modelos jerárquicos analizados y los niveles jerárquicos determinados en los pozos Coyotes de la Formación Chicontepec coinciden en que existe una organización jerárquica en estos.

Los cuerpos arenosos resueltos como componentes jerárquicos van desde el elemento de lóbulo hasta el complejo de lóbulos intercalándose con unidades limo-arcillosas que van desde capas centimétricas hasta decenas de metros.

El modelo jerárquico más adecuado para evaluar la existencia de componentes jerárquicos es el propuesto por [Prélat et al. \(2009\)](#) que considera los componentes jerárquicos como cuerpos arenosos separados por horizontes guías limo-arcillosas que marcan los niveles de escalamiento de cada nivel jerárquico.

La Formación Chicontepec está caracterizada por la presencia de un sistema de abanicos de aguas profundas con depósitos areno-arcillosos, con una estructura jerárquica definida por la presencia de cuerpos ricos en arena de que van desde los 20 m - 70 m separados por grandes espesores de lutitas que superan los 10 m .

Los depósitos estudiados tienen una estructura jerárquica definida por complejos de lóbulos, lóbulos y elementos de lóbulos, cuyos rangos de espesores son consistentes con los tratados por otros autores, aunque este criterio puede variar, pues se comprueba que pueden existir espesores en niveles jerárquicos determinados que se salen de la media de esos rangos propuestos y que son muy propios para cada región geográfica y temporal en particular.

Las cimas y bases de los espesores calculados con la línea de coeficientes y los escalogramas son muy parecidos en el caso de los datos sintéticos, mientras que con los datos reales de los pozos coyotes no sucede así, esto da una medida de que el arreglo en los datos influye significativamente mostrando que los procesos sedimentarios tienen alto grado de complejidad e influyen en el resultado.

La línea de los coeficientes cuyos valores de espesores fueron calculados a partir de los puntos de inflexión, de manera global resultaron ser cualitativa y cuantitativamente superior a los resultados obtenidos con los escalogramas.

El análisis de la transformada de ondícula identifica la información en registros geofísicos de rayos gamma, dependiendo de la escala analizada mostrando que los componentes de orden inferior tienen mayor contenido de frecuencia y se observan en escalas pequeñas, mientras que los componentes de orden superior presentan escalas grandes con bajas frecuencias.

Como resultado final, la herramienta mostró que si es posible obtener la jerarquía y los espesores de cada nivel jerárquico. La no coincidencia de los datos en los escalogramas con las líneas de los coeficientes, en el caso de los datos reales, quizás esté muy relacionada con la alta frecuencia contenida en los datos de la señal mostrando que los procesos autógenos y alógenos del sistema de depósito sedimentario puede influir en el resultado obtenido.

Recomendaciones

Se recomienda aplicar la transformada de ondícula siguiendo los pasos empleados en esta investigación a depósitos de otro tipo cuyas características jerárquicas se conocen para probar los alcances de la metodología para apoyar el estudio de la jerarquía estratigráfica de otros ambientes sedimentarios.

Bibliografía

- Alvarez, G., Sansó, B., Michelena, R. J., and Jiménez, J. R. (2003). Lithologic characterization of a reservoir using continuous-wavelet transforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 41(1):59–65. (Citado en las páginas 4, 7 y 21.)
- Castro, R. (2002). Análisis de la teoría de ondículas orientada a las aplicaciones en ingeniería eléctrica: Fundamentos. *Departamento de Ingeniería Eléctrica*. (Citado en las páginas ix, x, x, 21, 23, 25, 26, 27 y 29.)
- Chandrasekhar, E. and Rao, V. E. (2012). Wavelet analysis of geophysical well-log data of bombay offshore basin, india. *Mathematical Geosciences*, 44(8):901–928. (Citado en la página 47.)
- Coconi-Morales, E., Ronquillo-Jarillo, G., and Campos-Enríquez, J. (2010). Multi-scale analysis of well-logging data in petrophysical and stratigraphic correlation. *Geofísica internacional*, 49(2):55–67. (Citado en las páginas 4, 8, 21 y 43.)
- Cullis, S., Colombera, L., Patacci, M., and McCaffrey, W. D. (2018). Hierarchical classifications of the sedimentary architecture of deep-marine depositional systems. *Earth-Science Reviews*, 179:38–71. (Citado en la página 7.)
- Dennielou, B., Droz, L., Babonneau, N., Jacq, C., Bonnel, C., Picot, M., Le Saout, M., Saout, Y., Bez, M., Savoye, B., et al. (2017). Morphology, structure, composition and build-up processes of the active channel-mouth lobe complex of the congo deep-sea fan with inputs from remotely operated underwater vehicle (rov) multibeam and video surveys. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 142:25–49. (Citado en la página 6.)
- Deptuck, M. E., Piper, D. J., Savoye, B., and Gervais, A. (2008). Dimensions and architecture of late pleistocene submarine lobes off the northern margin of east corsica. *Sedimentology*, 55(4):869–898. (Citado en las páginas ix, 1, 4, 5, 7, 10, 13, 14, 17 y 33.)
- Deptuck, M. E. and Sylvester, Z. (2018). Submarine fans and their channels, levees, and lobes. In *Submarine Geomorphology*, pages 273–299. Springer. (Citado en la página 6.)
- Fleming, A. (2010). *Stratigraphic architecture of lobe strata in a submarine fan setting, Point Loma Formation, California*. PhD thesis, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library. (Citado en la página 5.)
- Flint, S., Hodgson, D., Sprague, A., Brunt, R., Van der Merwe, W., Figueiredo, J., Prélat, A., Box, D., Di Celma, C., and Kavanagh, J. (2011). Depositional architecture and sequence stratigraphy of the karoo basin floor to shelf edge succession, laingsburg depocentre, south africa. *Marine and Petroleum Geology*, 28(3):658–674. (Citado en las páginas 1, 4 y 5.)

- Fryer, R. C. (2018). *Quantification of the bed-scale architecture of submarine depositional environments and application to lobe deposits of the Point Loma Formation, California*. PhD thesis, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library. (Citado en la página 7.)
- Gabor, D. (1946). Theory of communication. part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, 93(26):429–441. (Citado en la página 22.)
- García López, J., Ortega Coral, C., Palafox Maestre, L. E., and Esqueda, J. J. (2005). Training and development module for a digital signal processing laboratory. *Computación y Sistemas*, 9(1):55–62. (Citado en la página 24.)
- Gervais, A., Savoye, B., Mulder, T., and Gonthier, E. (2006). Sandy modern turbidite lobes: a new insight from high resolution seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 23(4):485–502. (Citado en las páginas ix, ix, 1, 4, 10, 11, 12, 17 y 39.)
- González, J. (2014). Transformadas wavelet impacto fundamental en procesamiento de señales y compresión de imágenes. *Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia*. (Citado en la página 28.)
- González, L. (2009). Informe geológico final de los pozos del campo coyotes, pemex. *Activo de exploración del Golfo de México Norte*, 33:1–37. (Citado en la página 53.)
- Goupillaud, P., Grossmann, A., and Morlet, J. (1984). Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis. *Geoexploration*, 23(1):85–102. (Citado en la página 26.)
- Guzmán-Hidalgo, E. (2012). Análisis fractal de los registros de rayos gamma de la formación chicontepe. tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional.Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Ticomán. (Citado en las páginas 31, 41 y 42.)
- Heisenberg, W. (1925). Quantum-theoretical re-interpretation of kinematic and mechanical relations. *Z. Phys*, 33:879–893. (Citado en la página 23.)
- Javid, M. and Tokhmechi, B. (2012). Formation interface detection using gamma ray log: A novel approach. *Journal of Mining and Environment*, 3(1):41–50. (Citado en las páginas 8 y 43.)
- Kadkhodaie, A. and Rezaee, R. (2017). Intelligent sequence stratigraphy through a wavelet-based decomposition of well log data. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 40:38–50. (Citado en las páginas 8 y 43.)
- Lapcik, P. (2017). Facies heterogeneity of a deep-sea depositional lobe complex: case study from the slonne section of skole nappe, polish outer carpathians. In *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, volume 87. (Citado en la página 6.)
- Liu, H. and Jiang, Z. (2010). Wavelet transform of geophysical well logging signal and its application to sequence division. In *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*, volume 7, pages 3470–3473. IEEE. (Citado en la página 8.)
- Macdonald, H. A., Peakall, J., Wignall, P. B., and Best, J. (2011). Sedimentation in deep-sea lobe-elements: implications for the origin of thickening-upward sequences. *Journal of the Geological Society*, 168(2):319–332. (Citado en la página 5.)

- Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, (7):674–693. (Citado en la página 28.)
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., and Poggi, J.-M. (2007). Wavelet toolbox 4-user's guide the mathworks. *Inc., Massachusetts, USA*. (Citado en la página 23.)
- Pan, S.-Y., Hsieh, B.-Z., Lu, M.-T., and Lin, Z.-S. (2008). Identification of stratigraphic formation interfaces using wavelet and fourier transforms. *Computers & Geosciences*, 34(1):77–92. (Citado en la página 7.)
- Perez-Muñoz, T., Velasco-Hernandez, J., and Hernandez-Martinez, E. (2013). Wavelet transform analysis for lithological characteristics identification in siliciclastic oil fields. *Journal of Applied Geophysics*, 98:298–308. (Citado en las páginas 4, 8 y 21.)
- Prelat, A., Covault, J., Hodgson, D., Fildani, A., and Flint, S. (2010). Intrinsic controls on the range of volumes, morphologies, and dimensions of submarine lobes. *Sedimentary Geology*, 232(1-2):66–76. (Citado en las páginas xv, 1, 4, 5, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 30, 43, 54, 73, 75, 77 y 78.)
- Prélat, A., Hodgson, D., and Flint, S. (2009). Evolution, architecture and hierarchy of distributary deep-water deposits: a high-resolution outcrop investigation from the permian karoo basin, south africa. *Sedimentology*, 56(7):2132–2154. (Citado en las páginas ix, ix, ix, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 30, 33, 41, 43, 54, 73, 75, 77 y 80.)
- Prélat, A. and Hodgson, D. M. (2013). The full range of turbidite bed thickness patterns in submarine lobes: controls and implications. *Journal of the Geological Society*, 170(1):209–214. (Citado en las páginas ix, 1, 4, 5, 14, 16, 18, 19, 20 y 30.)
- Sahimi, M. and Hashemi, M. (2001). Wavelet identification of the spatial distribution of fractures. *Geophysical research letters*, 28(4):611–614. (Citado en la página 7.)
- Sánchez, F., Aldana, M., and Falcón, R. (2017). Spectral decomposition of well logs using the wavelet transform for stratigraphic and ciclicity analysis, lama field, venezuela. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 40(1):3–10. (Citado en las páginas 4, 8 y 43.)
- Singh, A., Maiti, S., and Tiwari, R. (2016). Modelling discontinuous well log signal to identify lithological boundaries via wavelet analysis: An example from ktb borehole data. *Journal of Earth System Science*, 125(4):761–776. (Citado en la página 8.)
- Singh, U. K., Prajapati, R., and Kumar, T. (2018). Geological stratigraphy and spatial distribution of microfractures over the costa rica convergent margin, central america—a wavelet-fractal analysis. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7(2):179–187. (Citado en las páginas 9 y 43.)
- Srivardhan, V. (2016). Stratigraphic correlation of wells using discrete wavelet transform with fourier transform and multi-scale analysis. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2(3):137–150. (Citado en las páginas 8 y 43.)

- Starek, D. and Fuksi, T. (2017). Statistical analysis as a tool for identification of depositional palaeoenvironments in deep-sea fans (palaeogene formations, central western carpathians, north slovakia). *Acta Geologica Slovaca*, 9(2):149–162. (Citado en la página 6.)
- Straub, K. M. and Pyles, D. R. (2012). Quantifying the hierarchical organization of compensation in submarine fans using surface statistics. *Journal of Sedimentary Research*, 82(11):889–898. (Citado en la página 5.)
- Terlaky, V., Rocheleau, J., and Arnott, R. W. C. (2016). Stratal composition and stratigraphic organization of stratal elements in an ancient deep-marine basin-floor succession, neoproterozoic windermere supergroup, british columbia, canada. *Sedimentology*, 63(1):136–175. (Citado en la página 5.)
- Tokhmechi, B., Memarian, H., Rasouli, V., Noubari, H. A., and Moshiri, B. (2009). Fracture detection from water saturation log data using a fourier–wavelet approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 69(1-2):129–138. (Citado en las páginas 8 y 43.)
- Verma, A., Cheadle, B., Mohanty, W., Routray, A., and Mansinha, L. (2012). Detecting stratigraphic discontinuities using wavelet and s-transform analysis of well log data. *Geo-Convention 2012: Vision*, pages 1–8. (Citado en las páginas 4, 21, 24, 26, 43 y 47.)
- Yu, J.-F., Sui, F.-G., Li, Z.-X., Hua, L., and Wang, Y.-L. (2008). Recognition of milankovitch cycles in the stratigraphic record: application of the cwt and the fft to well-log data. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(4):594–598. (Citado en las páginas 7 y 21.)
- Zhang, J.-J., Wu, S.-H., Fan, T.-E., Fan, H.-J., Jiang, L., Chen, C., Wu, Q.-Y., and Lin, P. (2016). Research on the architecture of submarine-fan lobes in the niger delta basin, offshore west africa. *Journal of Palaeogeography*, 5(3):185–204. (Citado en la página 6.)
- Zhang, L., Pan, M., and Wang, H. (2017). Deepwater turbidite lobe deposits: a review of the research frontiers. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 91(1):283–300. (Citado en la página 6.)

.

Anexo A

Jerarquía estratigráfica pozo Coyotes 311 determinada con el escalograma aplicando la coiflet 3.

Jerarquía		Cima	Base	Espesor (m)			
CL5	L3	E2	1117	1126	9	13	55
		E1	1126	1130	4		
	IL2-3	<i>unidad arcillosa</i>			4		
	L2	E2	1134	1138	4	12	
		E1	1138	1146	8		
	IL1-2	<i>unidad arcillosa</i>			5		
	L1	E2	1151	1165	14	21	
E1		1165	1172	7			
ICL4-5	<i>unidad arcillosa</i>					18	
CL4	L3	E3	1190	1192	2	14	58
		E2	1192	1197	5		
		E1	1197	1204	7		
	IL2-3	<i>unidad arcillosa</i>			6		
	L2	E2	1210	1218	8	19	
		E1	1218	1229	11		
	IL1-2	<i>unidad arcillosa</i>			2		
L1	E2	1231	1236	5	17		
	E1	1236	1248	12			
ICL3-4	<i>unidad arcillosa</i>					18	

<i>CL3</i>	<i>L2</i>	E3	1303	1308	5	15	34
		E2	1308	1312	4		
		E1	1312	1318	6		
	<i>IL1-2</i>	<i>unidad arcillosa</i>				5	
	<i>L1</i>	E2	1323	1328	5	14	
E1		1328	1337	9			
<i>ICL2-3</i>	<i>unidad arcillosa</i>						33
<i>CL2</i>	<i>L2</i>	E3	1370	1376	6	28	45
		E2	1376	1389	13		
		E1	1389	1398	9		
	<i>IL1-2</i>	<i>unidad arcillosa</i>				5	
<i>L1</i>	E1	1403	1415	12	12		
<i>ICL1-2</i>	<i>unidad arcillosa</i>						67
<i>CL1</i>	<i>L2</i>	E1	1482	1494	12	12	36
	<i>IL1-2</i>	<i>unidad arcillosa</i>				2	
	<i>L2</i>	E3	1496	1502	6	22	
		E2	1502	1511	9		
E1		1511	1518	7			

Anexo B

Jerarquía estratigráfica pozo Coyotes 311 determinada con las líneas de coeficientes aplicando la coiflet 3.

Jerarquía			Escala (m)						
<i>CL</i>	<i>L</i>	<i>EL</i>	0-1.5	1.5-4.5	4.5-7.5	7.5-15	15-75	75-150	Prom
<i>CL5</i>	<i>L2</i>		1031.97	1033.12	1032.79	1032.19	1033.69	1032.74	1032.75
		<i>EL8</i>	2.82	2.46	2.90				2.72
			1034.79	1035.58	1035.68				1035.35
		<i>EL7</i>	2.61	2.62	2.61				2.61
			1037.40	1038.20	1038.34				1037.98
		<i>EL6</i>	2.02	1.20	1.35				1.52
			1039.42	1039.39	1039.69				1039.50
		<i>EL5</i>	1.45	1.17	0.87				1.16
			1040.86	1040.59	1040.56				1040.67
		<i>EL4</i>	2.28	2.70	2.47				2.48
			1043.15	1043.29	1043.03				1043.16
		<i>EL3</i>	2.23	2.28	2.35				2.28
			1045.37	1045.57	1045.38				1045.44
		<i>EL2</i>	2.89	2.70	2.73				2.77
			1048.26	1048.26	1048.11				1048.21
		<i>EL1</i>	2.97	2.61	2.60				2.73
			1051.24	1050.87	1050.71	1049.42			1050.56
	<i>IL1-2</i>	2.20	2.45	2.68			2.44		

<i>CL5</i>	<i>L1</i>		1053.44	1053.32	1053.39				1053.38	
		<i>EL7</i>	2.59	3.01	3.51				3.04	
			1056.03	1056.33	1056.90				1056.42	
		<i>EL6</i>	2.61	2.33	1.76				2.23	
			1058.64	1058.65	1058.65				1058.65	
		<i>EL5</i>	2.43	2.29	2.34				2.35	
			1061.07	1060.94	1060.99				1061.00	
		<i>EL4</i>	2.63	2.76	2.65				2.68	
			1063.70	1063.70	1063.64				1063.68	
		<i>EL3</i>	1.40	2.40	2.26				2.02	
			1065.10	1066.10	1065.90				1065.70	
		<i>EL2</i>	3.84	2.23	2.76				2.94	
			1068.94	1068.33	1068.66				1068.64	
	<i>EL1</i>	1.42	1.86	1.55				1.61		
		1070.36	1070.19	1070.21	1069.98	1069.59	1069.44	1069.96		
<i>ICL4-5</i>			38.09	39.77	40.00	39.61	40.82	40.33	39.77	
<i>CL4</i>	<i>L4</i>		1108.45	1109.97	1110.20	1109.59	1110.40	1109.77	1109.73	
		<i>EL5</i>	3.11	2.51	2.34				2.65	
			1111.56	1112.48	1112.54				1112.19	
		<i>EL4</i>	2.86	2.12	2.71				2.56	
			1114.42	1114.61	1115.25				1114.76	
		<i>EL3</i>	3.48	2.42	1.81				2.57	
			1117.90	1117.02	1117.06				1117.33	
		<i>EL2</i>	0.88	1.76	1.36				1.33	
			1118.78	1118.78	1118.42				1118.66	
		<i>EL1</i>	2.93	2.02	2.83				2.59	
		1121.70	1120.80	1121.25	1121.15			1121.23		
	<i>IL3-4</i>			3.14	2.31	2.21				2.56
	<i>L3</i>		1124.85	1123.11	1123.46				1123.81	
		<i>EL4</i>	2.93	2.61	1.80				2.45	
			1127.78	1125.73	1125.26				1126.25	
		<i>EL3</i>	1.65	2.47	2.58				2.23	
			1129.43	1128.19	1127.84				1128.49	
		<i>EL2</i>	1.70	2.97	3.18				2.62	
			1131.13	1131.17	1131.02				1131.11	
		<i>EL1</i>	2.76	3.40	3.44				3.20	
	1133.90	1134.56	1134.46	1133.62			1131.11			

<i>CL4</i>	<i>IL2-3</i>		2.88	3.16	3.49				3.18
	<i>L2</i>		1136.78	1137.73	1137.95				1137.49
		<i>EL3</i>	5.11	3.52	3.62				4.08
			1141.89	1141.25	1141.56				1128.49
		<i>EL2</i>	3.23	3.40	3.09				3.24
			1145.12	1144.65	1144.65				1144.81
		<i>EL1</i>	2.70	2.19	2.36				2.42
		1147.82	1146.84	1147.01	1147.49			1147.29	
	<i>IL1-2</i>		0.82	1.81	1.44				1.36
	<i>L1</i>		1148.64	1148.65	1148.45				1148.58
		<i>EL5</i>	1.89	2.94	2.67				2.50
			1150.53	1151.59	1151.12				1151.08
		<i>EL4</i>	5.05	3.73	4.05				4.28
			1155.59	1155.32	1155.18				1155.36
		<i>EL3</i>	2.90	3.60	3.59				3.36
			1158.48	1158.92	1158.76				1158.72
		<i>EL2</i>	2.90	2.83	2.95				2.89
			1161.38	1161.75	1161.71				1161.61
		<i>EL1</i>	2.66	2.82	3.05				2.84
	1164.04	1164.57	1164.76	1165.80	1166.76	1164.98	1165.15		
<i>ICL3-4</i>		31.22	30.65	30.44	35.94	29.64	30.88	31.46	
<i>CL3</i>	<i>L3</i>		1195.26	1195.21	1195.19	1201.74	1196.40	1195.86	1196.61
		<i>EL8</i>	3.71	2.96	3.30				3.32
			1198.97	1198.18	1198.49				1198.55
		<i>EL7</i>	1.86	2.65	2.58				2.61
			1200.83	1200.83	1201.08				1200.91
		<i>EL6</i>	1.62	1.82	1.02				1.49
			1202.44	1202.65	1202.10				1039.50
		<i>EL5</i>	4.09	2.65	2.99				3.24
			1206.53	1205.30	1205.09				1205.64
		<i>EL4</i>	2.25	2.83	3.16				2.75
			1208.78	1208.13	1208.25				1208.39
		<i>EL3</i>	2.94	2.51	3.42				2.96
			1211.73	1210.65	1211.67				1211.35
		<i>EL2</i>	2.67	3.93	2.90				3.17
			1214.40	1214.57	1214.57				1214.51
	<i>EL1</i>	2.81	2.53	2.27				2.73	
	1217.20	1217.10	1216.84	1216.40			1216.89		
<i>IL2-3</i>		2.61	2.71	2.68				2.67	

<i>CL3</i>	<i>L2</i>		1219.81	1219.81	1219.52				1219.71
		<i>EL3</i>	2.24	3.09	3.11				2.81
			1222.05	1222.90	1222.63				1222.53
		<i>EL2</i>	6.09	4.78	4.02				4.96
			1228.14	1227.68	1226.65				1227.49
		<i>EL1</i>	2.26	3.30	4.31				3.29
		1230.40	1230.98	1230.96	1230.11			1230.61	
	<i>IL1-2</i>	2.96	3.23	3.23				3.14	
	<i>L1</i>		1233.95	1233.95	1234.19				1234.03
		<i>EL5</i>	1.87	2.28	1.77				1.97
			1235.82	1236.22	1235.96				1236.00
		<i>EL4</i>	3.12	2.72	2.82				2.88
			1238.94	1238.94	1238.78				1238.88
		<i>EL3</i>	2.85	2.19	2.35				2.46
			1241.79	1241.13	1241.13	1241.40			1241.36
		<i>EL2</i>	2.14	2.22	1.74				2.03
			1243.93	1243.35	1242.86				1243.38
		<i>EL1</i>	2.43	2.66	3.70				2.93
		1246.37	1246.00	1246.56	1246.64	1246.13	1246.78	1246.41	
<i>ICL2-3</i>	45.53	46.79	45.46	46.10	45.02	44.38	45.55		
<i>CL2</i>	<i>L3</i>		1291.90	1292.79	1292.02	1292.74	1291.15	1291.17	1291.96
		<i>EL5</i>	3.05	3.13	3.87				3.35
			1294.95	1295.92	1295.89				1295.59
		<i>EL4</i>	3.04	3.06	3.45				3.18
			1297.98	1298.98	1299.34				1298.77
		<i>EL3</i>	3.51	2.97	2.85				3.11
			1301.49	1301.95	1302.18				1301.88
		<i>EL2</i>	3.50	2.99	2.66				3.05
			1305.00	1304.94	1304.84				1304.93
		<i>EL1</i>	3.26	2.87	3.00				3.04
		1308.26	1307.81	1307.85	1306.54			1307.61	
	<i>IL2-3</i>	2.42	2.87	2.83				2.70	
	<i>L2</i>		1310.68	1310.68	1310.68				1310.68
		<i>EL3</i>	3.34	2.88	2.59				2.93
			1314.01	1313.55	1313.26				1313.61
		<i>EL2</i>	2.99	3.00	3.14				3.04
			1317.01	1316.55	1316.41				1316.65
		<i>EL1</i>	3.07	3.10	3.31				3.16
			1320.08	1319.65	1319.71	1320.86			1320.07

<i>CL2</i>	<i>IL1-2</i>		3.33	3.43	3.32				3.36	
	<i>L1</i>		1323.41	1323.08	1323.03				1323.17	
		<i>EL4</i>	4.06	3.29	3.27				3.54	
			1327.47	1326.37	1326.30				1326.71	
		<i>EL3</i>	2.97	3.14	3.35				3.16	
			1330.44	1329.51	1329.65				1329.87	
		<i>EL2</i>	4.01	3.38	3.47				3.62	
			1334.45	1332.89	1333.12	1147.49			1333.49	
	<i>EL1</i>	2.39	3.64	3.29				3.11		
		1336.83	1336.53	1336.41	1337.90	1336.07	1335.75	1336.58		
<i>ICL1-2</i>			37.50	36.92	37.05	33.88	37.04	36.98	36.56	
<i>CL1</i>	<i>L7</i>		1374.33	1373.45	1373.47	1371.78	1373.11	1372.73	1373.15	
		<i>EL4</i>	4.24	3.19	4.01				3.81	
			1378.58	1376.64	1377.47				1377.56	
		<i>EL3</i>	2.83	4.16	3.87				3.62	
			1381.40	1380.81	1381.34				1381.18	
		<i>EL2</i>	2.48	2.81	2.27				2.52	
			1383.89	1383.61	1383.61				1383.70	
		<i>EL1</i>	3.14	3.22	2.99				3.12	
		1387.03	1386.83	1386.60	1384.77			1386.31		
	<i>IL6-7</i>			1.25	1.44	1.67				1.45
	<i>L6</i>		1388.28	1388.28	1388.28				1388.28	
		<i>EL3</i>	1.15	1.28	1.21				1.21	
			1389.43	1389.55	1389.48				1389.49	
		<i>EL2</i>	2.84	2.49	2.36				2.57	
			1392.27	1392.05	1391.85				1392.05	
		<i>EL1</i>	2.47	2.78	2.76				2.67	
			1394.74	1394.83	1394.61	1393.40			1394.39	
	<i>IL5-6</i>			2.74	2.90	3.12				2.92
	<i>L5</i>		1397.47	1397.73	1397.73				1397.90	
		<i>EL1</i>	2.70	3.08	3.28				3.02	
			1400.17	1400.81	1401.01	1401.05			1400.66	
	<i>IL4-5</i>			4.33	3.64	3.53				3.83
	<i>L4</i>		1404.51	1404.44	1404.54				1404.50	
		<i>EL3</i>	2.79	2.55	3.34				2.89	
			1407.30	1407.00	1407.87				1407.39	
		<i>EL2</i>	2.14	2.44	1.85				2.14	
			1409.44	1409.44	1409.73				1409.53	

<i>CL1</i>	<i>L4</i>	<i>EL1</i>	3.03	1.78	0.95				1.92
			1412.47	1411.22	1410.68	1412.49			1411.71
	<i>IL3-4</i>		2.74	2.97	3.51				3.07
	<i>L3</i>		1415.20	1414.19	1414.19				1414.53
		<i>EL2</i>	3.14	3.99	4.02				3.71
			1418.34	1418.18	1418.21				1407.39
		<i>EL1</i>	3.53	3.50	3.56				3.53
			1421.87	1421.68	421.77	1422.04			1421.84
	<i>IL2-3</i>		3.53	2.90	3.07				3.17
	<i>L2</i>		1425.40	1424.57	1424.84				1424.94
		<i>EL4</i>	1.37	2.20	2.32				1.97
			1426.77	1426.77	1427.17				1426.90
		<i>EL3</i>	2.25	2.53	1.95				2.25
			1429.03	1429.30	1429.11				1429.15
		<i>EL2</i>	3.02	2.28	2.07				2.46
			1432.05	1431.58	1431.18				1431.60
		<i>EL1</i>	4.01	3.77	3.74				3.84
			1434.16	1434.37	1434.29	1434.69			1434.38
	<i>IL1-2</i>		4.01	3.77	3.74				3.84
	<i>L1</i>		1438.17	1438.14	1438.04				1438.11
		<i>EL4</i>	3.06	3.14	3.60				3.27
			1441.23	1441.28	1441.64				1441.38
		<i>EL3</i>	2.14	2.25	1.90				2.25
			1443.37	1443.53	1443.53				1443.48
		<i>EL2</i>	2.46	2.30	2.30				2.46
			1445.83	1445.83	1445.83				1445.83
<i>EL1</i>		1.60	2.15	1.87				1.87	
		1447.43	1447.98	1447.71	1445.69	1451.62	1447.89	1448.05	