

**ANÁLISIS MULTIESCALA DE CICLICIDADES EN REGISTROS DE POZO A
PARTIR DE LA TRANSFORMADA DE ONDÍCULA, APLICADO AL CAMPO
COLORADO.**

JULIE STEPHANIE BEDOYA MONTILLA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FÍSICOQUIMICAS
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2015**

**ANÁLISIS MULTIESCALA DE CICLICIDADES EN REGISTROS DE POZO A
PARTIR DE LA TRANSFORMADA DE ONDÍCULA, APLICADO AL CAMPO
COLORADO.**

JULIE STEPHANIE BEDOYA MONTILLA

**Trabajo de grado para optar el título de
Magíster en Geología**

Director:

LUIS ENRIQUE CRUZ

Ph. D., Geología

Codirector:

RICARDO MIER UMAÑA

Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FÍSICOQUÍMICAS

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2015

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros agradecimientos a Campo Escuela Colorado por suministrar la información para el desarrollo del presente estudio. A la Universidad Industrial de Santander y el profesorado de maestría.

Agradezco los comentarios y sugerencias de los directores y calificadores, quienes aportaron para mejorar la calidad del trabajo.

Por último, quiero agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado, aconsejado y motivado para ser una mejor profesional.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	14
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MARCO DE REFERENCIA	18
2.1. LA TRANSFORMADA ONDÍCULA CONTINUA.....	18
2.1.1. Ondículas Madre	19
2.1.1.1. Ondícula de Haar	19
2.1.1.2. Ondícula de Daubechies	20
2.1.1.3. Ondícula de Coiflet	20
2.1.1.4. Ondícula de Symlet	21
2.1.1.5. Ondícula de Morlet	21
2.1.1.6. Ondícula de Sombrero Mejicano	22
2.1.1.7. Ondícula Meyer	22
2.1.2. Escalamiento	23
2.1.3. Desplazamiento	24
2.2. LA TRANSFORMADA ONDÍCULA DISCRETA	24
2.2.1. Ondículas ortonormales.....	24
2.2.2. Análisis multiresolución.....	25
2.3. CONCEPTOS BÁSICOS DE MATLAB	26
2.3.1. El programa MATLAB.....	26
3. MARCO DE ANTECEDENTES	28
3.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	30
3.1.1. Estratigrafía Formación Mugrosa.....	33
3.1.2. Modelo Geológico Campo Colorado.....	34

4. METODOLOGÍA	36
4.1. ANÁLISIS DE REGISTROS DE POZO	36
4.1.1. Ubicación del intervalo de interés	38
4.2. PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS EN MATLAB	38
4.2.1. Elaboración de escalogramas.....	39
4.2.2. Análisis multiresolución.....	41
4.2.3. Análisis multiescala de ciclicidades	44
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
5.1. RESULTADOS DE LOS ESCALOGRAMAS (TRANSFORMADA DE ONDÍCULA CONTINUA)	45
5.1.1. Escalogramas del pozo C54	45
5.1.2. Escalogramas del pozo C56	48
5.1.3. Escalogramas del pozo C63	50
5.1.4. Escalogramas del pozo C65	52
5.1.5. Escalogramas del pozo C66	54
5.1.6. Escalogramas del pozo C68	56
5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN (TRANSFORMADA DE ONDÍCULA DISCRETA) EN REGISTROS GR.....	60
5.2.1. Análisis multiresolución del pozo C63	60
5.2.2. Análisis multiresolución del pozo C65	63
5.2.3. Análisis multiresolución del pozo C66	65
5.2.4. Análisis multiresolución del pozo C68	67
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	72

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS MULTIESCALA DE CICLICIDADES EN REGISTROS DE POZO A PARTIR DE LA TRANSFORMADA DE ONDÍCULA, APLICADO AL CAMPO COLORADO.*

AUTOR: JULIE STEPHANIE BEDOYA MONTILLA**

PALABRAS CLAVE: TRANSFORMADA DE ONDÍCULA, REGISTROS DE POZO, ESCALOGRAMAS, TOPES ESTRATIGRÁFICOS, ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN, FORMACIÓN MUGROSA.

DESCRIPCIÓN

La transformada de ondícula fue desarrollada en la década de los 80 para la resolución de problemas relacionados con señales no estacionarias presentes en las ondas sísmicas y recientemente en el análisis de registros de pozo. Los estudios realizados en campo Colorado revelan que la interpretación de registros de pozo se ha realizado a partir de la evaluación del comportamiento de las curvas de los registros. Por tal motivo, se aplicó la herramienta matemática de la transformada de ondícula en el análisis de registros Gamma Ray (GR) y Resistivos (ILD), para los pozos C54, C56, C63, C65, C66 y C68 del campo Colorado, ubicado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Los registros fueron procesados a través de la herramienta de la transformada de ondícula en el *Wavelet Toolbox* de MATLAB 7.1. Con esta herramienta se obtuvieron 12 escalogramas que permitieron corroborar los topes estratigráficos de las (Zonas B₁-B₂) y la Zona C de la Formación Mugrosa. Los topes fueron establecidos por la presencia de señales de alta intensidad en los escalogramas. Con la transformada de ondícula discreta se realizó un análisis multiresolución de registros (GR) en la Zona B de la Formación Mugrosa para los pozos C63, C65, C66 y C68. En los pozos C63, C65 y C68 se encontró que la relación 1:2 muestra las periodicidades de precesión 20 ka y oblicuidad 41 ka de los ciclos de Milankovitch. Sin embargo, la ausencia de una descripción sedimentológica detallada no permite mostrar la relación de estas ciclicidades con el modelo sedimentario para cada pozo. Estas periodicidades se relacionaron con las electroformas de canal y llanura de inundación definidas en el modelo sedimentológico y estratigráfico de Campo Colorado.

*Tesis de Maestría

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Ph. D. Luis Enrique Cruz. Codirector: Ricardo Mier Umaña.

ABSTRACT

TITLE: MULTISCALE ANALYSIS OF CYCLICITIES IN WELL LOGS FROM THE WAVELET TRANSFORM, APPLIED TO CAMPO COLORADO.*

AUTHOR: JULIE STEPHANIE BEDOYA MONTILLA**

KEYWORDS: WAVELET TRANSFORM , WELL LOGS, SCALOGRAMS, STRATIGRAPHIC TOPS, MULTIREOLUTION ANALYSIS , MUGROSA FORMATION.

DESCRIPTION

The wavelet transform was developed in the 80s for solve related problems with non-stationary signals on seismic waves and recently in well logs analysis. Studies realized in campo Colorado reveal that the interpretation of wells logs has been realized from the curve logs behavior. For this reason, it applies mathematical tool of wavelet transform in well logs analysis Gamma Ray (GR) and Resistivity (ILD) from C54, C56, C63, C65, C66 and C68 wells of campo Colorado, located in the Basin of Middle Magdalena. Records were processed through the tool wavelet transform in the *Wavelet Toolbox* from MATLAB 7.1. With this tool 12 scalograms were obtained which allowed corroborating stratigraphic tops of the (Zones B₁-B₂) and the Zone C of the Mugrosa Formation. Tops were established by the presence of high intensity signals in scalograms. With the discrete wavelet transform the multiresolution analysis of logs GR was realized in the Zone B of the Mugrosa Formation from C63, C65, C66 and C68 wells. In the wells C63, C65 and C68 it was found that the relation 1: 2 shows the periodicities of 20 ka precession and 41 ka obliquity from Milankovitch cycles. However, the absence of detailed sedimentological description doesn't allow showing the relationship of these cyclicities with the sedimentary model for each well. These periodicities are related with electroforms channel and flood plain defined sedimentological and stratigraphic model of campo Colorado.

*Master Theses

** Faculty of Physicochemical. Geology School. Director: Ph. D. Luis Enrique Cruz. Codirector: Ricardo Mier Umaña.

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Ondícula de Haar.....	19
Figura 2. Ondícula de Daubechies.....	20
Figura 3. Ondícula de Coiflet.	20
Figura 4. Ondícula de Symlet.....	21
Figura 5. Ondícula de Morlet.	21
Figura 6. Ondícula de Sombrero Mejicano.	22
Figura 7. Ondícula de Meyer.	22
Figura 8. Escalamiento de una ondícula.....	23
Figura 9. Desplazamiento de una ondícula en el tiempo.	24
Figura 10. Descomposición multiresolución de una señal.	25
Figura 11. Menú principal Wavelet Toolbox.....	27
Figura 12. Localización del Campo Colorado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM).	30
Figura 13. Estratigrafía del Valle Medio del Magdalena.....	32
Figura 14. Columna estratigráfica de la Formación Mugrosa en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.....	34
Figura 15. Metodología para el análisis, selección y procesamientos de los registros ILD y GR.	36
Figura 16. Ubicación de los pozos de estudio.	37
Figura 17. Parámetros para la elaboración de escalogramas.....	40
Figura 18. Parámetros para la elaboración de análisis multiresolución.	42
Figura 19. Análisis multiresolución del registro GR en el pozo C65.....	43
Figura 20. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C54.....	46
Figura 21. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C56.....	49
Figura 22. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C63.....	51
Figura 23. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C65.....	53
Figura 24. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C66.....	55

Figura 25. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C68.....	57
Figura 26. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C63.	61
Figura 27. Análisis multiresolución para las escalas (a: 16, a: 31 y a: 64).....	62
Figura 28. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C65.	63
Figura 29. Análisis multiresolución para las escalas (a: 13, a: 28 y a: 51).....	64
Figura 30. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C66.	65
Figura 31. Análisis multiresolución para las escalas (a: 14, a: 32 y a: 64).....	66
Figura 32. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C68.	67
Figura 33. Análisis multiresolución para las escalas (a: 13, a: 28 y a: 64).....	69

LISTA DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Propiedades de las ondículas madre.....	23
Tabla 2. Intervalo de interés para la elaboración de escalogramas.....	38
Tabla 3. Intervalo de interés para la elaboración de escalogramas.....	41
Tabla 4. Topes estratigráficos de las Zonas B ₁ -B ₂ de la Formación Mugrosa.....	59
Tabla 5. Topes estratigráficos de las Zonas B y C Formación Mugrosa.....	59
Tabla 6. Niveles de descomposición asociados a cada escala.....	61
Tabla 7. Niveles de descomposición asociados a cada escala.....	63
Tabla 8. Niveles de descomposición asociados a cada escala.....	66
Tabla 9. Niveles de descomposición asociados a cada escala.....	68

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIACIONES

Símbolos

Símbolo

Término

a	Escalamiento
---	--------------

Abreviaciones

Abreviatura

Término

SP	Spontaneous potential
----	-----------------------

SPN	Spontaneous potential Normalization
-----	-------------------------------------

GR	Gamma Ray
----	-----------

SGR	Spectral Gamma Ray
-----	--------------------

ILD	Deep Induction log
-----	--------------------

INTRODUCCIÓN

La transformada de ondícula fue introducida por el Geofísico Jean Morlet (1984), para la resolución de problemas relacionados con señales no estacionarias presentes en las ondas sísmicas y registros de pozo (Montejo y Suarez, 2007).

En general, las investigaciones de la transformada de ondícula han respondido a dos intereses principales, uno enfocado a la aplicación de la transformada de ondícula continua para el reconocimiento de los ciclos de Milankovitch en registros de pozo (YU *et al.*, 2008) y el otro con la aplicación de la transformada de ondícula discreta.

Las transformadas de ondícula continua y discreta, se han aplicado a datos de registros geofísicos de pozos para obtener pseudolongitudes de onda asociadas a periodos de sedimentación o ciclos de Milankovitch (Coconi *et al.*, 2010). Estas dos metodologías fueron empleadas por Sánchez (2011) en la definición de características no visibles en registros de pozos a partir del análisis de escalogramas.

En el Campo Colorado para el procesamiento de datos de registros de pozo, se ha empleado la técnica de redes neuronales en el modelado de atributos petrofísicos básicos de la Formación Mugrosa (Meneses y Ramírez, 2008). La incorporación de esta técnica abrió nuevas perspectivas para la integración de otras herramientas matemáticas en el análisis de datos. Otros estudios realizados en el campo revelan que los topes estratigráficos de las Zonas B y C de la Fm. Mugrosa, fueron definidos por Mier *et al.* (2013) a partir de la interpretación de las curvas de registros SP tomadas en cada uno de los pozos. Por tanto, en este trabajo se pretende validar estos topes estratigráficos, con una metodología que utiliza la herramienta matemática de la transformada de ondícula.

Aquí se plantea una metodología que emplea el software de computación matemática MATLAB 7.1, en la aplicación de la transformada de ondícula continua para el análisis de escalogramas en registros resistivos (ILD) y Gamma Ray (GR), en los pozos C54, C56, C63, C65, C66 y C68 del Campo Colorado, con el objetivo de caracterizar los topes estratigráficos de las Zonas B₁-B₂ y la Zona C de la Formación Mugrosa. Asimismo, se emplea en la aplicación de la transformada de ondícula discreta para el análisis de ciclicidades a partir de registros GR en los pozos C63, C65, C66 y C68, con el fin de evaluar su posible relación con los ciclos de Milankovitch.

En esta investigación se encontró que la aplicación de la transformada de ondícula continua, es apropiada para definir topes estratigráficos, y el análisis de escalogramas permite localizar señales de alta intensidad, que estudiadas a detalle por el análisis multiresolución sirven para reconocer periodicidades.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el Modelo geológico de Campo Colorado, los topes estratigráficos de las Zonas B y C de la Formación Mugrosa, fueron definidos por Mier *et al.* (2013) a partir de la interpretación de las curvas de registros SP tomadas en cada uno de los pozos. Sin embargo, la ausencia de núcleos de perforación no ha permitido validar estos topes estratigráficos. Por tal motivo, en este trabajo se pretende generar una nueva metodología que utiliza la herramienta matemática de la transformada de ondícula en el análisis de señales no estacionarias.

Los estudios previos han empleado la herramienta matemática de Redes Neuronales para el modelado de atributos petrofísicos básicos de la Fm. Mugrosa (Meneses y Ramírez, 2008). Su eficacia permite continuar con la integración de otras herramientas matemáticas como la transformada de ondícula que se ha ido empleando por YU *et al.* (2008), Coconi *et al.* (2010) y Sánchez (2011) en el análisis de datos de registros de pozo. Es necesario destacar que la transformada de ondícula permitió a los investigadores YU *et al.* (2008) el desarrollo de una metodología para el reconocimiento de los ciclos de Milankovitch en registros de pozo.

Por otro lado, los estudios estratigráficos de la Fm. Mugrosa en Campo Colorado, no revelan la presencia de ciclicidades estratigráficas en el ambiente sedimentario debido a la falta de estudios estratigráficos de alta resolución (Fonseca y García, 2009). Lo que permitió plantear la siguiente pregunta que pretende mostrar el uso de la herramienta matemática de la transformada de ondícula en el análisis de ciclicidades en registros de pozo del Campo Colorado.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la aplicación de la transformada de ondícula en el análisis de ciclicidades en los registros de pozo del campo colorado y su relación con los ciclos de milankovitch?

La fundamentación teórica de esta investigación permite la integración de una herramienta matemática evaluada en el área de la física y geofísica a partir de 1984 por el Geofísico Jean Morlet (Montejo y Suarez, 2007), y su aplicación en las ciencias geológicas para la resolución de problemas relacionados con señales no estacionarias (Registros de pozo); al permitir descomponer la señal en múltiples resoluciones mediante el análisis multiescala.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis multiescala de ciclicidades en registros Resistivos (ILD) y Gamma Ray (GR), a nivel de la Formación Mugrosa (Zonas B y C), para 6 pozos en Campo Colorado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Emplear el software matemático de MATLAB (versión 7.1) para aplicar la transformada de ondícula en el análisis de registros ILD y GR, en los pozos de estudio.
- Definir topes estratigráficos de las Zonas B y C de la Formación Mugrosa, mediante el análisis de escalogramas en los pozos de interés.
- Determinar ciclicidades estratigráficas de la Zona B de la Formación Mugrosa, por medio de análisis multiresolución para el registro GR y su relación con los ciclos de Milankovitch.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. LA TRANSFORMADA ONDÍCULA CONTINUA

A principios de los años 80 el Geofísico Francés Jean Morlet, descubrió la transformada de ondícula para resolver problemas de procesamiento de señales para la prospección de petróleo. La transformada de ondícula es una herramienta matemática, que permite identificar en señales no estacionarias presentes en las ondas sísmicas y en los registros de pozo: discontinuidades, cambios abruptos, comienzos y finales de eventos. Su uso principal se basa en el procesamiento de señales en todas las escalas y distintas posiciones. Es decir, las señales son escaladas de una ondícula madre y durante su procesamiento se puede localizar un evento simultáneamente en el dominio temporal (espacio) y frecuencial (escala) (Misiti *et al.*, 2007).

La transformada de ondícula continua fue desarrollada para superar algunos problemas de resolución presentes en la transformada de Fourier. A diferencia de la transformada de Fourier, la transformada de ondícula no descompone la señal en un grupo de sinusoides y cosinusoides de amplitud constante para cada frecuencia, ya que permite descomponer la señal en una serie de pequeñas ondas u ondículas (Montejo y Suarez, 2007).

El procesamiento de la transformada de ondícula continua consiste en comparar la señal con ciertas ondículas obtenidas de una ondícula madre, convirtiendo la señal original en una señal tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencia, representando la señal procesada en gráficos tiempo – frecuencia, denominados escalogramas (Misiti *et al.*, 2007).

2.1.1. Ondículas Madre

Una ondícula se define como una señal que desciende rápidamente a cero después de unas pocas oscilaciones, y que tiene un valor promedio nulo, con un comportamiento irregular y asimétrico (Montejo y Suarez, 2007).

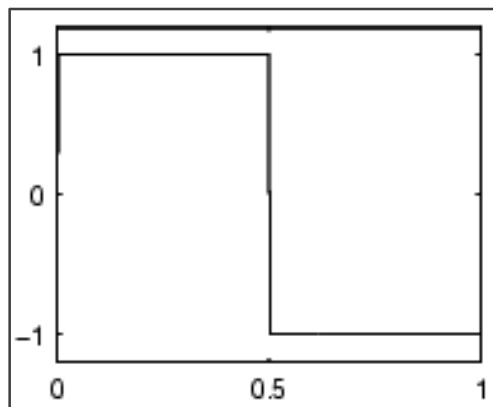
Las ondículas están definidas por familias de funciones de ondículas generadas al escalar (estirar y comprimir) y desplazar (mover) en el tiempo la ondícula madre. Su uso principal se basa en el procesamiento de señales y su selección depende del tipo de análisis a realizar.

A continuación se describen las familias de ondículas y sus características.

2.1.1.1. Ondícula de Haar

Es la primera ondícula, fue propuesta por Alfred Haar en 1909, se caracteriza por ser una ondícula simple y discontinua. Es la misma ondícula Daubechies de orden 1 (db1), (Figura 1).

Figura 1. Ondícula de Haar.

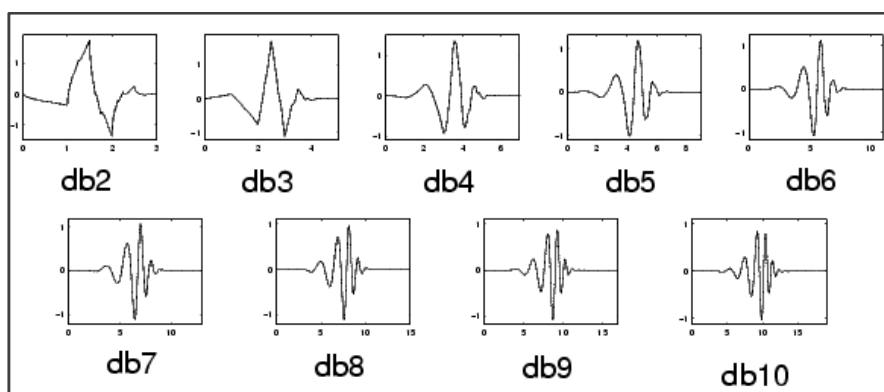


Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.1.1.2. Ondícula de Daubechies

Fue propuesta por Ingrid Daubechies quien desarrollo la ondícula ortogonal con soporte compacto. La ondícula de primer orden se refiere a la ondícula de Haar y se escriben dbN ; donde "N" es el orden de la ondícula. En la Figura 2, se muestran las ondículas de la familia de Daubechies.

Figura 2. Ondícula de Daubechies.

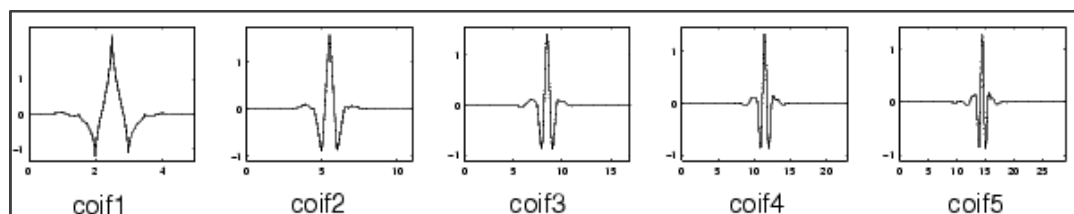


Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.1.1.3. Ondícula de Coiflet

Desarrollada por Ingrid Daubechies. Se define como una ondícula ortogonal con soporte compacto, y presenta tanto en la función ondícula como en la función escalada momentos iguales a cero. En la Figura 3, se muestran las ondículas de la familia de Coiflet.

Figura 3. Ondícula de Coiflet.

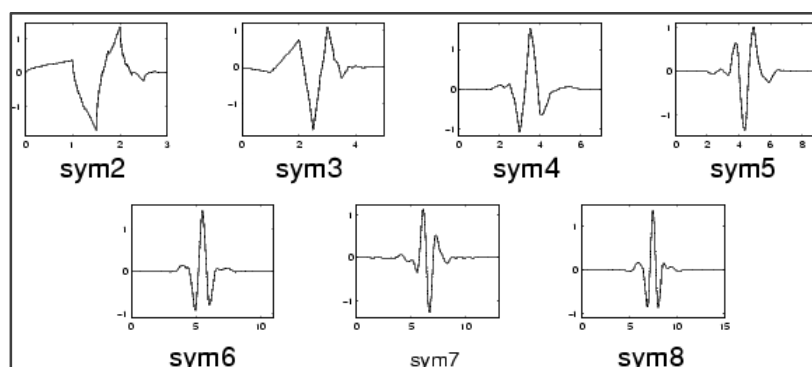


Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.1.1.4. Ondícula de Symlet

Propuesta por Ingrid Daubechies como modificación de las ondículas db. Presenta propiedades similares a las Daubechies, es asimétrica y posee características de ortogonalidad y biortogonalidad. En la Figura 4, se muestran las ondículas de la familia de Symlet.

Figura 4. Ondícula de Symlet.

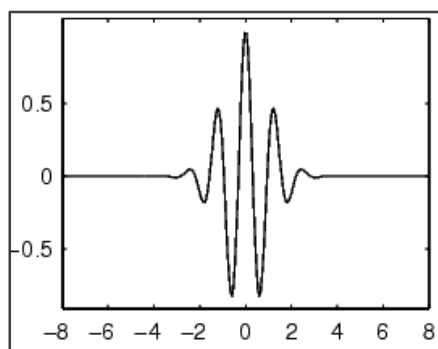


Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.1.1.5. Ondícula de Morlet

Fue propuesta por el geofísico Jean Morlet. Se define como una ondícula simétrica y no posee características de ortogonalidad y biortogonalidad (Figura 5).

Figura 5. Ondícula de Morlet.

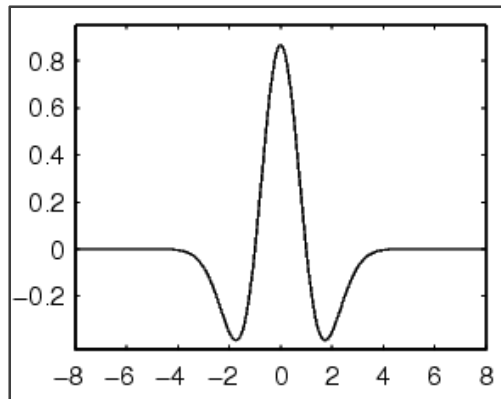


Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.1.1.6. Ondícula de Sombrero Mejicano

Es una ondícula que permite examinar las señales de un modo simétrico (Figura 6).

Figura 6. Ondícula de Sombrero Mejicano.

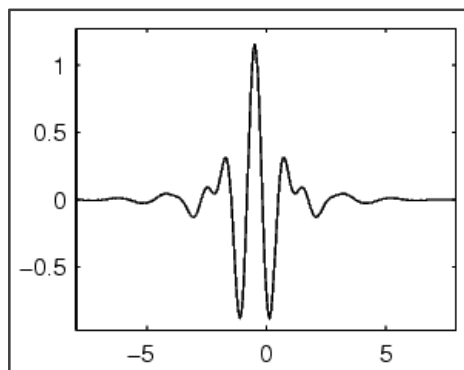


Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.1.1.7. Ondícula Meyer

Fue desarrollada por Yves Meyer, quien construyó una familia de ondículas regulares (Figura 7).

Figura 7. Ondícula de Meyer.



Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

En la Tabla 1, se relaciona el tipo de ondícula y sus propiedades.

Tabla 1. Propiedades de las ondículas madre.

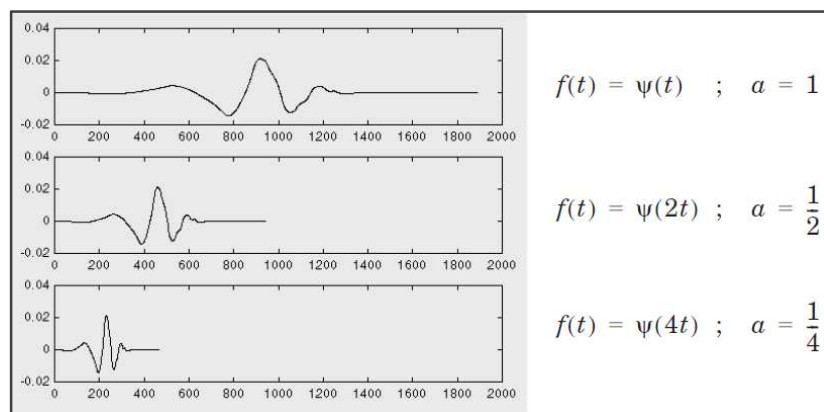
Propiedad	Haar	dbN	Coiflet	Symlet	Morlet	Sombrero Mejicano	Meyer
Soporte Compacto			
Simetría
Ortogonal
Biorotogonal
Transformada continua
Transformada discreta

Fuente: Modificado de Misiti et al. (1997).

2.1.2. Escalamiento

El escalamiento de la ondícula es el proceso de estiramiento o compresión, y se representa por la letra **a** (Figura 8). El estiramiento permite a mayor escala, menor frecuencia, es decir, cuanto mayor sea la longitud de onda, el detalle de la señal será menor. Mientras que la compresión permite a menor escala, mayor frecuencia, o sea cuanto menor sea la longitud de onda, el detalle de la señal será mayor.

Figura 8. Escalamiento de una ondícula.

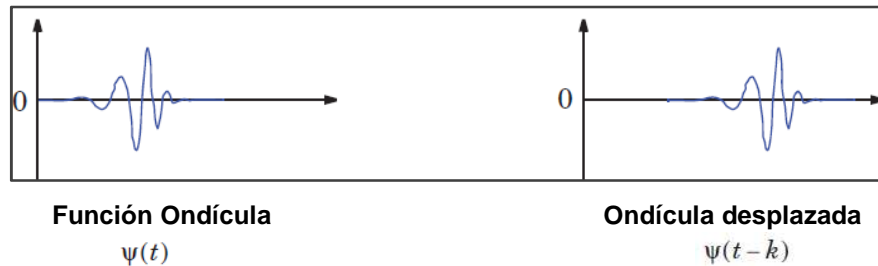


Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.1.3. Desplazamiento

El Desplazamiento consiste en el movimiento de la ondícula madre a través del eje de la señal, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Desplazamiento de una ondícula en el tiempo.



Fuente: Tomado de Misiti et al. (2007).

2.2. LA TRANSFORMADA ONDÍCULA DISCRETA

La transformada de ondícula discreta consiste en descomponer una señal en una cantidad de frecuencias mediante la aplicación de filtros multiniveles denominados multiresolución, de esta manera, se obtiene información detallada de la señal. Para descomponer la señal se debe seleccionar las ondículas que tengan la propiedad de ortonormalidad, la cual permite realizar una reconstrucción discreta de la señal (Misiti *et al.*, 2007).

2.2.1. Ondículas ortonormales

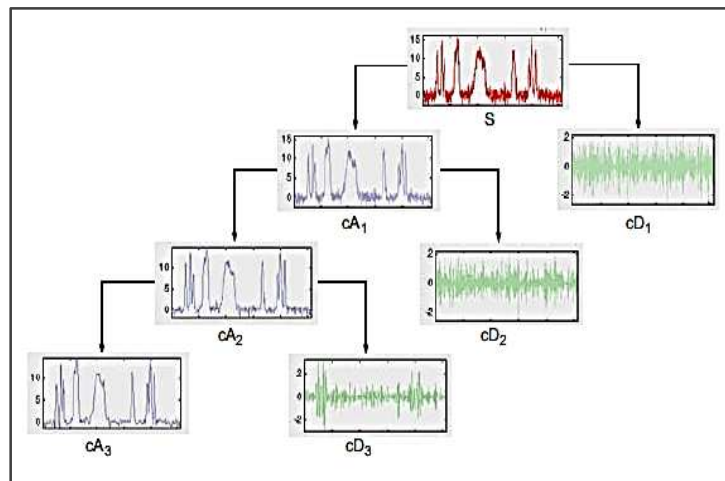
Son ondículas que forman una base ortonormal en el espacio L_2 o espacio de Hilbert. Por tanto, se debe considerar que una base ortonormal es una base ortogonal de vectores unitarios, y los espacios de Hilbert hacen referencia a los espacios vectoriales infinitamente grandes, que se caracterizan por ser espacios completos respecto al producto interno definido en dicho espacio (Navarro y Martínez, 2010).

2.2.2. Análisis multiresolución

El análisis multiresolución consiste en descomponer una señal en resoluciones bajas para obtener una visión general y en resoluciones altas para obtener una visión detallada de la señal. En este caso, se denomina aproximaciones a los componentes de baja frecuencia y escala alta de la señal; y detalles a los componentes de alta frecuencia y escala baja.

En la Figura 10, se tiene una señal S , en la que se produce dos secuencias cA y cD , donde se empleó la ondícula madre dB2 para el análisis. Además, se observa que los coeficientes de detalle cD son pequeños y se componen de un ruido de alta frecuencia, mientras que los coeficientes de aproximación cA contienen menos ruido que la señal original. El proceso de descomposición se repite con aproximaciones sucesivas descomponiendo una señal en varios componentes de resolución.

Figura 10. Descomposición multiresolución de una señal.



Fuente: Tomado de Misiti et al. (1997).

2.3. CONCEPTOS BÁSICOS DE MATLAB

2.3.1. El programa MATLAB

Como su nombre indica, MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. MATLAB se define como un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. En general, este programa permite trabajar con números tanto reales como complejos, con cadenas de caracteres o con estructuras más complejas.

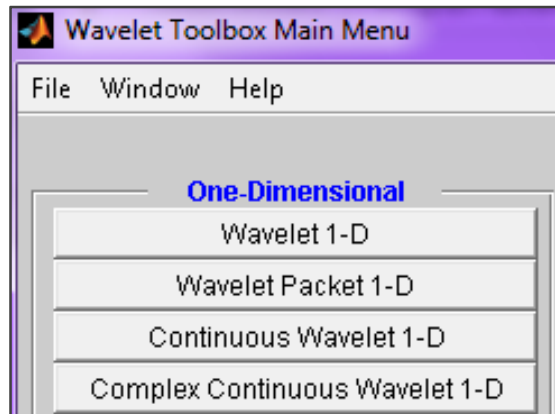
Su principal uso se basa en el cálculo técnico y científico, tiene un lenguaje de programación propio y la capacidad de realizar gráficos en dos y tres dimensiones. Cuenta con un entorno de trabajo muy gráfico, similar al de otras aplicaciones profesionales de *Windows*. Además, dispone de un código básico y de varias librerías especializadas o *toolboxes*, desarrollados para no requerir escritura de códigos y se puede emplear como un programa normal.

A continuación se mencionan las componentes del entorno de trabajo de MATLAB utilizadas en este estudio.

- **Matlab Desktop:** Es la ventana más general de la aplicación, muestra las herramientas del escritorio de MATLAB.
- **Command Window:** Es la ventana principal, se utiliza para ejecutar los comandos, abrir otras ventanas, ejecutar programas realizados por el usuario y gestionar el software de MATLAB.
- **Current Directory:** Es la ventana que permite visualizar los ficheros del directorio actual de trabajo. En MATLAB, por defecto, los programas se encuentran en ficheros con la extensión *.m.

- **Help:** Es la ventana de ayuda que proporciona la documentación para ayudar al usuario en el manejo de la aplicación.

Figura 11. Menú principal Wavelet Toolbox.



- **Wavelet Toolbox:** La
- Figura 11, muestra en el menú principal la opción “*One-dimensional*”, en la que se procesan las señales de registros de pozo. Los registros presentan una componente en el eje Y; en donde Y es la componente en profundidad, por lo tanto son 1D.
- **Wavelet 1-D:** Permite descomponer una señal en submúltiplos de menor resolución, la señal se descompone en aproximaciones y detalles, ver Figura 10.
- **Continuous Wavelet 1-D:** Permite obtener escalogramas (representación tiempo- frecuencial) de una señal.

3. MARCO DE ANTECEDENTES

Para el desarrollo del presente estudio, se recopiló los trabajos de investigación realizados tanto en Campo Colorado como en el área de la transformada de ondícula. En lo que se refiere al Campo Colorado, se destaca en el contexto geológico el modelo sedimentológico y estratigráfico, en el que Fonseca y García (2009) identifican las litofacies, sus asociaciones y las características de los elementos arquitecturales, además establecen para cada asociación de facies las electroformas de canal y llanura de inundación a partir de los registros SP y GR, en los pozos C21 y C27. En el modelo sedimentológico, los autores han establecido que la sedimentación de la Formación Mugrosa tuvo lugar en un ambiente de tipo fluvial meandriforme y en el modelo estratigráfico, no establecen la presencia de ciclicidades estratigráficas que permitan definir la influencia de los ciclos de Milankovitch en el ambiente de depositación de la Fm. Mugrosa debido a la falta de estudios estratigráficos de alta resolución.

Por otro lado, los topes estratigráficos de las Zonas B y C de la Formación Mugrosa, fueron definidos por Mier *et al.* (2013) a partir de la interpretación de las curvas de registros SP tomadas en cada uno de los pozos.

En lo que se refiere a la transformada de ondícula, YU *et al.*, (2008) han aplicado las transformadas de ondícula continua y de Fourier en los registros de los pozos del segundo campo petrolífero de Shengli en China. Los resultados obtenidos de la transformada de Fourier no permiten localizar en el tiempo las frecuencias; sin embargo, la ondícula continua revela el contenido de la frecuencia local y su distribución en forma de escalogramas, lo que permite reconocer los ciclos de Milankovitch en registros de pozo.

Además, Coconi y Morales (2010), también han aplicado las transformadas de ondícula continua y discreta para el análisis multiescala de registros geofísicos de pozo (GR, Resistividad y SP) en un área productora de aceite en el Golfo de México. Los registros fueron analizados e interpretados mediante los

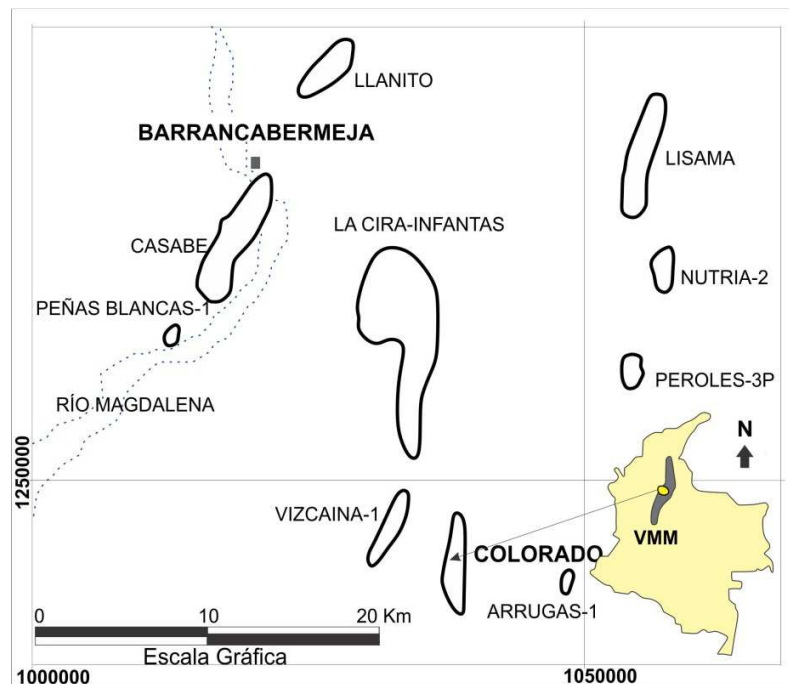
escalogramas-espectrogramas de las pseudolongitudes de onda asociadas a cada escala (frecuencia) y se relacionan a periodos de sedimentación o ciclos de Milankovitch.

A partir de estos estudios, Sánchez (2011) ha utilizado las transformadas de ondícula continua y discreta en el análisis de registros de pozo del Campo Lama, localizado en la Cuenca del Lago de Maracaibo, Venezuela. Los escalogramas obtenidos en el análisis de la transformada de ondícula permiten definir características no visibles en registros de pozos. Por otro lado, la descomposición espectral realizada en el análisis multiresolución revela que algunos procesos sedimentarios en el área estaban asociados con los ciclos de Milankovitch.

3.1. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El Campo Colorado se ubica en el Piedemonte Occidental de la cordillera Oriental, al sur del Campo La Cira-Infantas y al Sureste del municipio de Barrancabermeja, Santander; entre las coordenadas X= 1'036.000 -1'040.500 Este y Y= 1'238.000 - 1'247.500 Norte con origen Bogotá (Figura 12).

Figura 12. Localización del Campo Colorado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM).



Fuente: Modificado de ECOPETROL (2003) y Barrero et al. (2007).

La cuenca del Valle Medio del Magdalena se encuentra localizada en el piedemonte occidental de la cordillera Oriental. Sus principales reservorios se encuentran en el Paleógeno y fueron depositados en un ambiente continental caracterizado por importantes cambios laterales de facies y de espesor (Sarmiento y Rojas, 2001). La evolución de la cuenca durante el Mesozoico está estrechamente vinculada a la tectónica del margen del oeste de América del Sur (Cooper et al., 1995), caracterizada por una mega secuencia sin-Rift con depósitos continentales que se continuaron depositando hasta la transgresión del Cretáceo

temprano cuando la cuenca actuó como un área de retro arco detrás de la zona de subducción Andina, en la que predominó los depósitos marinos. Durante el Cretáceo tardío continúa el aumento del nivel del mar y al final del Cretáceo predominan procesos de compresión tectónica, debido a la acreción de la cordillera Occidental y se desarrolla la cuenca preandina. En el Paleógeno se evidencian procesos tectónicos controlados por eventos de deformación compresiva asociados a acreción y levantamiento de la cordillera Central (Cooper et al., 1995). Debido a la compresión se desarrolló una cuenca de antepaís asociada a la cordillera Central y el Escudo de la Guayana (Caballero et al., 2010), caracterizada por la acumulación de depósitos en ambientes continentales fluviales a deltaicos que suprayacen discordantemente la secuencia Cretácica. Durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano, se desarrolló un evento de deformación y elevación de la cordillera Oriental que originó una cuenca con una secuencia clástica derivada del evento deformativo en el que se depositaron las unidades que conforman la secuencia estratigráfica del Terciario.

La evolución tectono-sedimentaria de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, indica que el levantamiento de la cordillera Central durante el Eoceno temprano, fue la fuente de sedimentos para la depositación del Grupo Chorros (Formaciones La Paz y Esmeraldas) y la cordillera Oriental durante el Eoceno tardío-Oligoceno fue la fuente de sedimentos para la depositación del Grupo Chuspas (Formaciones Mugrosa y Colorado). La cordillera Central y Oriental fue la fuente de sedimentos para la depositación de la Formación Real durante el Mioceno (Caballero et al., 2010).

La secuencia estratigráfica de interés para este trabajo está conformada por las formaciones que van del Cretáceo al Paleoceno. Estas formaciones se depositaron en condiciones marinas durante un proceso tectónico de subsidencia, dando como resultado la depositación de las Formaciones Rosablanca, Paja, Tablazo, Simití y los Miembros Salada, Pujamana y Galembo de la Formación La Luna (Figura 13). La Formación La Luna representa el nivel de máxima inundación

marina durante el Cretáceo. El ciclo sedimentario culminó con un periodo tectónico compresivo (Paleoceno – Eoceno) que dio origen a elevaciones estructurales y posteriormente inician los grandes procesos erosivos que afectaron enormemente la parte superior de la secuencia Cretácea, en la que se depositó las Formaciones Umir y Lisama. Finalmente, y de manera discordante desde el Eoceno hasta el Mioceno se depositan las Formaciones La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado en ambientes de sedimentación de tipo continental.

Figura 13. Estratigrafía del Valle Medio del Magdalena.

SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	SIM-BOLO	LITOLOGIA	DESCRIPCION
T E R C I A R I O	PLIO.	GRUPO MESA	Qtf		Terrazas y aluviones Gravas, arenas y conglomerados. Espesor: 300 - 545 m.
		GRUPO REAL	TQ		Discontinuidad estratigráfica (?) Areniscas, lodolitas y conglomerados. Espesor: 500 - 700 m.
	MIOCENO	GRUPO CHUSPAS	FM. COLORADO	Tom	Discontinuidad estratigráfica (?) Lodolitas rojas y areniscas conglomeráticas. Espesor: 935 - 1.250 m.
			FM. MUGROSA	Teo	Lodolitas y capas delgadas de areniscas. Espesor: 550 - 850 m.
			FM. ESMERALDA FM. LA PAZ	Tpe	Areniscas, lodolitas y capas delgadas de carbón. Espesor: 160 - 575 m. Areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada. Espesor: 240 - 800 m.
	PAL.		FM. LISIANA	Tpe	Lodolitas areniscas y capas delgadas de carbón. Espesor: 300 - 950 m.
	C R E T A C I O	SUPERIOR	FM. UMIR	TKs	Lodolitas con concreciones ferruginosas y capas explotables de carbón. Espesor: 800 - 1.400 m.
			FM. LA LUNA	Kalc	Calizas, lodolitas calcáreas, concreciones calcáreas y rocas fosfóricas. Espesor: 280 - 630 m.
		INFERIOR	FM. SIMITI	Kbal	Lodolitas principalmente, areniscas y calizas en menor proporción. Espesor: 250 - 660 m.
			FM. TABLAZO	TKl	Calizas y lodolitas calcáreas. Espesor: 240 - 325 m.
FM. PAJA				Lodolitas y areniscas. Espesor: 150 - 625 m.	
FM. ROSA BLANCA				Calizas, lodolitas y areniscas. Espesor: 290 - 450 m.	
FM. CUMBRE FM. LOS SANTOS			Kbeh	Areniscas gris verdosas, cuarzosas, de grano fino, localmente lodosas, con intercalaciones de limolitas, arcillolitas y lodolitas de color gris, negro y rojizo, piritosas. Espesor: 25 - 100 m.	

Fuente: Tomado de Clavijo y Royero (2001).

El nombre de la Formación Mugrosa fue propuesto por McGill (1928) en Morales et al (1958); su nombre fue tomado de la quebrada Mugrosa, donde se encuentra su sección tipo. Su espesor varía entre 500 y 800 m., el contacto inferior de la Formación Mugrosa es discordante con la Formación Esmeraldas y el contacto superior es concordante con la Formación Colorado. Su edad es considerada del Eoceno superior – Oligoceno inferior (Royero y Clavijo, 2001).

Esta unidad en su parte inferior está compuesta por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. La parte media consta de lutitas moteadas con algunas intercalaciones de arenisca. Hacia la parte superior hay lodolitas moteadas, fosilíferas (Royero y Clavijo, 2001).

3.1.1. Estratigrafía Formación Mugrosa

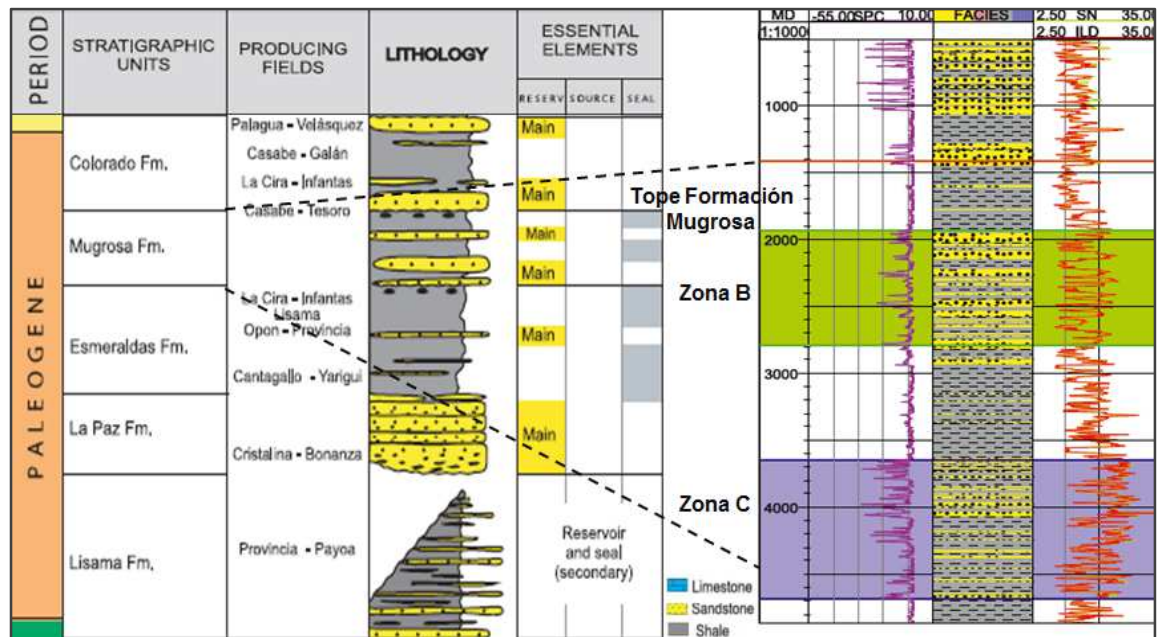
La Formación Mugrosa en el Campo Colorado suprayace el “Horizonte Fosilífero de los Corros” y en su parte superior se presenta el “Horizonte Fosilífero de Mugrosa”. Esta formación se ha dividido en dos zonas; la parte superior o Zona B y la parte inferior o Zona C, separadas por intervalos potentes de lodolitas. ((Fonseca y García, 2009).

Figura 14). La Zona B, está compuesta por lodolitas grises-verdosas y en algunos casos varicoloreadas, con un espesor de 20 m. Presenta algunos intervalos de areniscas, de grano fino a medio, subangulares a subredondeadas, con espesores máximos de 1.5 m.

La Zona C, está compuesta por sucesiones granodecrecientes de areniscas feldespáticas, de grano medio a grueso, angulares, de regular calibrado, con un espesor promedio de 2 metros. En algunas ocasiones presenta sucesiones de gravas, con una extensión lateral que no sobrepasa los 10 m. Las lodolitas de esta zona son limolitas arenosas grises a verdes, con espesores máximos de 15 cm y

se encuentran separando a los cuerpos de areniscas feldespáticas (Fonseca y García, 2009).

Figura 14. Columna estratigráfica de la Formación Mugrosa en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.



Fuente: Modificado de Barrero et al. (2007).

3.1.2. Modelo Geológico Campo Colorado

En el modelo estratigráfico, se encontró que trabajos realizados en Campo Colorado revelan la presencia de las Zonas B y C de la Formación Mugrosa. En este estudio, se tomó la subdivisión de la Fm. Mugrosa en las subzonas (B₁-B₂) y (C₁-C₂) propuesta por ECOPETROL (2003), las cuales fueron definidas a partir de la interpretación de los registros SPN y microresistivos.

Por otro lado, los topes estratigráficos de las Zonas B y C de la Fm. Mugrosa, fueron definidos por Mier *et al.* (2013) a partir de la interpretación de las curvas de registros SP tomadas en cada uno de los pozos. Los autores definieron el tope de la Fm. Mugrosa en la primera arena que se encuentra antes de una secuencia lodososa; el tope de la Zona B en la primera arena con alta respuesta en los

registros resistivos la cual se encuentra después de la secuencia lodosa seguida del tope de la Fm. Mugrosa, y la base de la Zona B en la última arena la cual se encuentra antes de una secuencia lodosa. Para la Zona C el tope fue definido en la primera arena con alta respuesta en los registros resistivos la cual se encuentra después de la segunda secuencia lodosa seguida de la base de la Zona B, y la base de la Zona C la definen en la última arena presente en los registros SP. Sin embargo, los autores no establecen la existencia de las Zonas B₁-B₂ y C₁-C₂ de la Fm. Mugrosa.

En el modelo sedimentológico, Fonseca y García (2009) a partir de registros SP y GR, en los pozos C21 y C27 identifican las litofacies, sus asociaciones y las características de los elementos arquitecturales, adicionalmente definen para cada asociación de facies las electroformas de canal y de llanura de inundación.

La sedimentación de la Formación Mugrosa tuvo lugar en un ambiente de tipo fluvial meandriforme, caracterizado por una marcada migración lateral del cauce, de mediana sinuosidad, con barras alternantes, con presencia de los elementos arquitecturales tipo “*crevasse splay*” y en menor proporción “*crevasse channel*”, donde el desarrollo de paleosuelos es poco, pero la construcción de depósitos de llanura de inundación es fuerte (Fonseca y García, 2009).

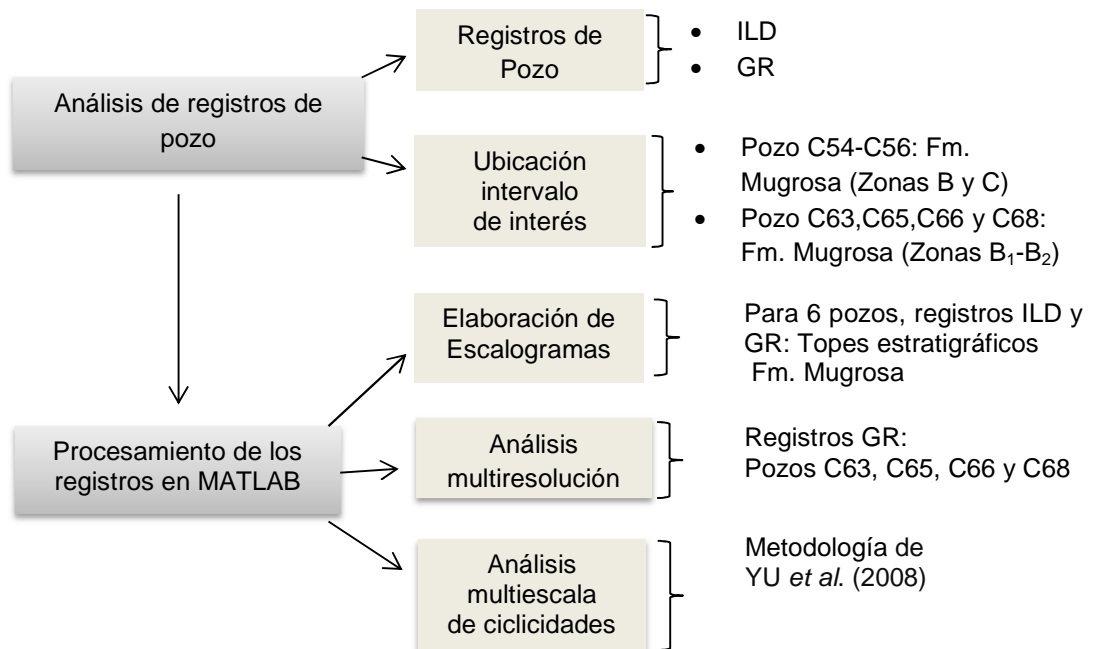
En el modelo estructural los estudios realizados en Campo Colorado permiten establecer un sistema de 5 fallas satélites, que están asociadas a una falla principal denominada Falla Colorado, caracterizada por presentar un fallamiento de tipo inverso con dirección N-S y buzamiento hacia el este.

De las cinco fallas satélites, se tiene dos fallas localizadas hacia el sur del Campo, mientras que las otras tres se localizan hacia el norte, y están conformando bloques semicirculares que revelan la influencia de los esfuerzos compresivos ejercidos sobre la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Mier *et al.*, 2013).

4. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología empleada para la selección, análisis y procesamiento de registros ILD y GR, la cual permitió la definición de topes estratigráficos de las Zonas B₁-B₂ y la Zona C de la Formación Mugrosa, que es la unidad de interés de este estudio. Las etapas seguidas se presentan en la (Figura 15).

Figura 15. Metodología para el análisis, selección y procesamientos de los registros ILD y GR.



4.1. ANÁLISIS DE REGISTROS DE POZO

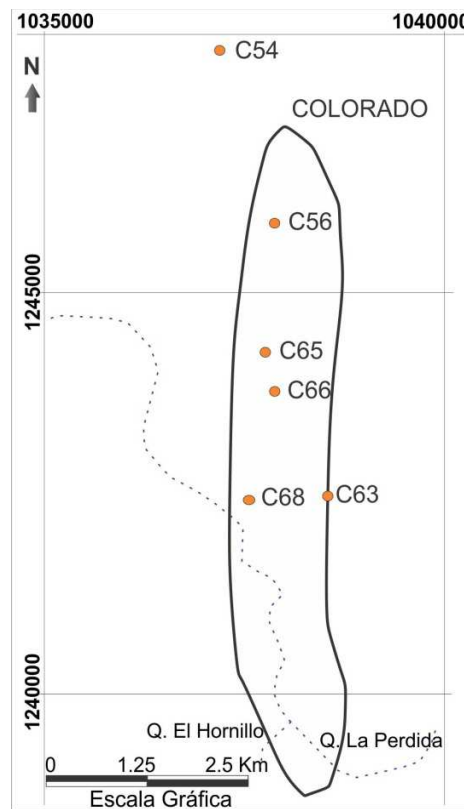
Para el análisis de los registros de pozo se realizó una revisión de archivos “.las” disponibles en la base de datos de Campo Escuela Colorado. De esta revisión se encontró un total de 68 archivos “.las”, los cuales corresponden a 21 archivos de registros ILD y 17 GR. De esta manera, se estableció como primer criterio de selección la existencia de registros ILD y GR para cada pozo. Sin embargo, una vez seleccionados los pozos con la presencia de archivos “.las” de registros ILD y

GR, con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados fue necesario continuar la selección para descartar aquellos registros con falta de información y presencia de valores nulos derivados por posibles errores en la toma de datos. Debido a eso, solo se seleccionaron los registros que muestran continuidad en profundidad y alcanzan el tope de la Fm. Mugrosa.

Además de este criterio de selección, también se consideraron las recomendaciones de Fonseca y García (2009), en las que se indica la ausencia de la Zona C en los registros de los pozos C25 y C13, y la repetición de la secuencia estratigráfica (B_1 y B_2) en los pozos C70 y C30 debido a la influencia de la Falla Colorado.

Finalmente se escogieron 6 pozos localizados en el sector Norte, Centro y Sur del campo Colorado (Cuenca Valle Medio del Magdalena), (Figura 16).

Figura 16. Ubicación de los pozos de estudio.



4.1.1. Ubicación del intervalo de interés

Se tomó como base los topes de las Zonas B y C de la Fm. Mugrosa para establecer las profundidades del intervalo de interés. Por lo tanto, para este trabajo se consideró el análisis estratigráfico de Mier *et al.* (2013), con el propósito de corroborar los topes estratigráficos. En la Tabla 2, se presenta los intervalos de interés en los que se realizó este estudio.

Tabla 2. Intervalo de interés para la elaboración de escalogramas.

Pozo	Registros	Intervalo de interés (Pies)	Longitud del intervalo (Pies)
C54	Resistivos (ILD) y (GR).	2900-5880	5961
C56	Resistivos (ILD) y (GR).	1500-5630	8261
C63	Resistivos (ILD) y (GR).	700-3410	5421
C65	Resistivos (ILD) y (GR).	840-3122	4565
C66	Resistivos (ILD) y (GR).	840-3360	5041
C68	Resistivos (ILD) y (GR).	700-3424	5449

En la selección del intervalo de interés, se identificaron dos intervalos estratigráficos que incluyen: las Zonas B y C de la Fm. Mugrosa en los pozos C54 y C56; y las Zonas B₁-B₂ de la Fm. Mugrosa en los pozos C63, C65, C66 y C68. Después de esto, se consideró que el primer paso para el procesamiento de los registros de pozo es realizar la conversión de archivos originales “.las” a Excel, el cual es el formato requerido para importar archivos en el software MATLAB 7.1.

4.2. PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS EN MATLAB

Para el procesamiento de cada uno de los 6 pozos en MATLAB, se emplearon los archivos en formato Excel de los registros ILD y GR con su respectivo intervalo de interés en la Fm. Mugrosa, con el propósito de realizar el análisis de la

transformada de ondícula utilizando las opciones *Continuous Wavelet 1-D* y *Wavelet 1-D* del módulo *Wavelet Toolbox* de MATLAB 7.1.

4.2.1. Elaboración de escalogramas

Una vez creados los archivos en formato Excel, se cargaron en el software MATLAB 7.1 los archivos correspondientes a los registros ILD y GR para cada pozo. De igual manera se realizó la conversión de los archivos de formato Excel a formato “.mat”, el cual es el formato requerido para importar archivos en el módulo *Wavelet Toolbox*.

Para la elaboración de los escalogramas en el módulo *Wavelet Toolbox*, se cargaron los archivos .mat de registros ILD y GR para los pozos C54, C56, C63, C65, C66 y C68 en la opción *Continuous Wavelet 1-D*. En la Figura 17, se observan los parámetros requeridos para la elaboración de los escalogramas.

El primer parámetro para la elaboración de escalogramas muestra la opción *Data (Size)* que permite visualizar la longitud de muestras a analizar y corresponde a la longitud del intervalo de interés en pies, ver Tabla 2.

El segundo parámetro muestra la opción *Wavelet* que permite indicar la ondícula madre. En esta opción, solo se seleccionaron las ondículas que conforman una base ortonormal para L^2 ; las cuales permiten realizar el análisis multiresolución a partir de la transformada de ondícula discreta. Para tal efecto se realizaron pruebas con las ondículas Symlet, Daubechies y Coiflet para los registros ILD y GR, y se encontró que la ondícula de Coiflet 3, permite observar con mayor claridad la presencia de señales de alta intensidad relacionadas con valores mínimos para la curva del registro GR. Esta relación permitió asociar este comportamiento con los topes estratigráficos que interpretaron Mier *et al.* (2013) para la Fm. Mugrosa. La utilidad de la ondícula de coiflet para evaluar la transformada de ondícula continua en el análisis de datos de registros geofísicos de pozos, fue probada por Coconi *et al.* (2010) en pozos de un área productora de

aceite en el Golfo de México y por Sánchez (2011) en 4 pozos del Campo Lama, en la Cuenca del Lago de Maracaibo en Venezuela.

El tercer parámetro corresponde al intervalo de muestreo usado en la adquisición de registros. En este caso, se tomó como referencia los registros cada 0.5 pies de profundidad. En la Figura 17 por ejemplo, se aprecia para el pozo C63 una longitud de 5421 pies, con un periodo de muestreo de 0.5 pies, teniendo en cuenta que el software, por defecto asigna la unidad, como valor para el periodo de muestreo.

Figura 17. Parámetros para la elaboración de escalogramas.

Data (Size)	(287000x2D34100x29500 (5421))	→ 1
Wavelet	coif 3	→ 2
Sampling Period	1	→ 3
Scale Settings		
	Step by Step Mode	→ 4
Min (> 0)	1	
Step (> 0)	1	
Max (<= 2048)	1400	
Analyze		

El último parámetro muestra la opción ajuste de escalas en la que se realizaron pruebas para definir los rangos de escalas altas y escalas bajas para procesar los registros. En este caso específico, se define el término escalas altas a rangos con un valor máximo de 1.400 y un valor mínimo de 1; por esta razón son utilizadas con el interés de tener una visión general del comportamiento de los registros a analizar.

De acuerdo a los parámetros establecidos se elaboraron un total de 12 escalogramas entre registros ILD y GR; para definir y corroborar topes estratigráficos de las (Zonas B₁- B₂) de la Fm. Mugrosa, en los pozos C63, C65, C66 y C68, y determinar la existencia de los topes estratigráficos de las Zonas C₁- C₂ de la Fm. Mugrosa, en los pozos C54 y C56.

4.2.2. Análisis multiresolución

Para el procesamiento de la transformada de ondícula discreta en el módulo *Wavelet Toolbox*, se cargaron los archivos .mat de registros GR en los intervalos de interés (Tope y Base de la Zona B de la Fm. Mugrosa) para los pozos C63, C65, C66 y C68 en la opción *Wavelet 1-D*.

En este estudio, se seleccionaron los registros GR en los que se observó con mayor claridad señales de alta intensidad, lo que permitió asociar estas señales con los topes estratigráficos de la Fm. Mugrosa.

Una vez definidos los topes de la Fm. Mugrosa a partir del análisis de los escalogramas procesados en la opción *Continuous Wavelet 1-D* de MATLAB 7.1, fue necesario delimitar el área de interés a los intervalos del tope y la base de las Zonas B₁-B₂ de la Fm. Mugrosa, definidos en el procesamiento de la transformada de ondícula continua; por tanto, con el propósito de realizar el análisis multiresolución, se procedió a elaborar nuevamente los escalogramas para los registros GR en los pozos C63, C65, C66 y C68. En la Tabla 3, se presenta los intervalos de interés en los que se realizaron los escalogramas.

Tabla 3. Intervalo de interés para la elaboración de escalogramas.

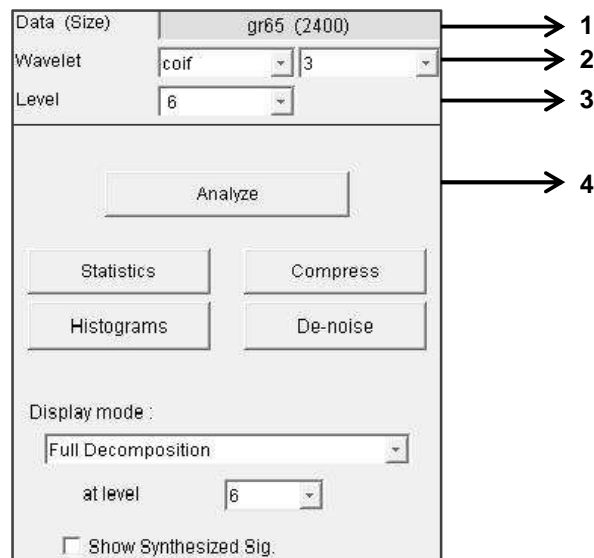
Pozo	Intervalo de interés (Pies)	Topes Fm. Mugrosa (Zonas B ₁ -B ₂); definidos a partir de los escalogramas (Pies)	
C63	1700-3099.5	Tope B ₁ : 1820 Base B ₁ : 2275	Tope B ₂ : 2275 Base B ₂ : 3040
C65	1450-2649.5	Tope B ₁ : 1590 Base B ₁ : 2150	Tope B ₂ : 2150 Base B ₂ : 2520
C66	1800-2599.5	Tope B ₁ : 1839.5 Base B ₁ : 2151	Tope B ₂ : 2151 Base B ₂ : 2475
C68	2100-3299,5	Tope B ₁ : 2050 Base B ₁ : 2699.5	Tope B ₂ : 2699.5 Base B ₂ : 3370

Para la elaboración de los escalogramas de registros GR, y de acuerdo con las pruebas realizadas con anterioridad, a cada registro se le aplicó la ondícula de

Coiflet 3, y en este caso específico, se define el término escalas bajas a rangos con un valor máximo de 100 y un valor mínimo de 1; por esta razón son utilizadas con el interés de tener una visión detallada del comportamiento de los registros.

Una vez seleccionados los valores de las escalas para cada pozo, en la opción *Wavelet 1-D* se cargaron los registros GR en el intervalo del tope y la base de las Zonas B₁-B₂ de la Formación Mugrosa para los pozos C63, C65, C66 y C68. En la Figura 18, se muestra los parámetros requeridos para el procesamiento de la transformada de ondícula discreta.

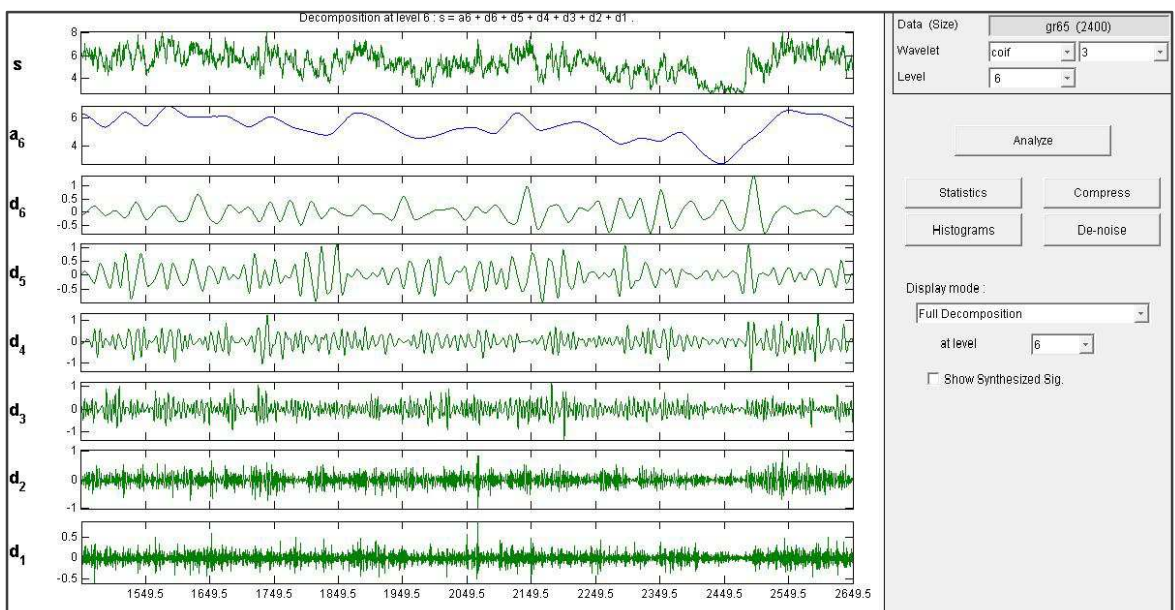
Figura 18. Parámetros para la elaboración de análisis multiresolución.



El primer parámetro para la elaboración de análisis multiresolución muestra la opción *Data (Size)* que permite visualizar la longitud de muestras a analizar y corresponde a la longitud del intervalo de interés en pies. El siguiente parámetro corresponde a la opción *Wavelet* en la que se aplicó la ondícula de Coiflet 3, seleccionada mediante las pruebas realizadas para la elaboración de escalogramas. El tercer parámetro muestra la opción *Level*, donde se debe tener en cuenta que el software, por defecto asigna los niveles de descomposición que dependen del valor del primer parámetro. En la Figura 19, por ejemplo, se aprecia para el pozo C65 una longitud de 2400 pies, con un nivel 6 de descomposición.

El último parámetro muestra la opción *Analyze* en la que el registro se descompone en una señal de aproximación y en 6 señales de detalles como se puede ver en la Figura 19, en donde **a6** corresponde a la señal de aproximación, con un nivel 6, que permite mostrar componentes de bajas frecuencias y los **d1**, **d2**, **d3**, **d4**, **d5**, **d6** corresponden a las señales de detalles que permiten mostrar componentes de altas frecuencias.

Figura 19. Análisis multiresolución del registro GR en el pozo C65.



Cada nivel de descomposición está relacionado con los valores de las escalas asociadas a las señales de alta intensidad. Estos valores fueron definidos en los escalogramas realizados en el intervalo del tope y la base de las Zonas B₁-B₂ de la Fm. Mugrosa. Para el cálculo del nivel de descomposición para cada escala se empleó el parámetro de descomposición $a = 2^n$, donde **n** es el nivel de descomposición, **a** es la escala y **2** es el número base; es decir, para determinar el nivel de descomposición, una vez elegida una base, se debe aplicar el logaritmo de base, en el cual el logaritmo del número es el exponente en el que la base se debe elevar para obtener el número (Misiti et al., 1997).

Por tanto para el cálculo del nivel de descomposición se usó la siguiente expresión:

$$(n) = \text{Log}_2(a).$$

El uso de esta expresión permitió definir que a mayor resolución, mayor detalle, lo que permite reconocer la presencia de ciclos para cada escala de pozo.

4.2.3. Análisis multiescala de ciclicidades

Para continuar con la metodología propuesta por (YU *et al.*, 2008), para el reconocimiento de los ciclos de Milankovitch en registros de pozo. Se pasó primero por la realización del conteo del número de ciclos para cada escala. Posteriormente estos datos se evaluaron con los valores teóricos de la relación 1:2:4.8 de los ciclos de Milankovitch, y de esa manera, definir la relación de los depósitos de la Zona B de la Formación Mugrosa con las periodicidades de excentricidad 100 ka, oblicuidad 41 ka y precesión 20 ka.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se describen cada uno de los resultados obtenidos durante el análisis de registros ILD y GR con el fin de caracterizar la Fm. Mugrosa en Campo Colorado para las siguientes zonas: (1) (Zonas B y C) en los pozos C54 y C56 y (2) (Zonas B₁-B₂) en los pozos C63, C65, C66 y C68.

5.1. RESULTADOS DE LOS ESCALOGRAMAS (TRANSFORMADA DE ONDÍCULA CONTINUA)

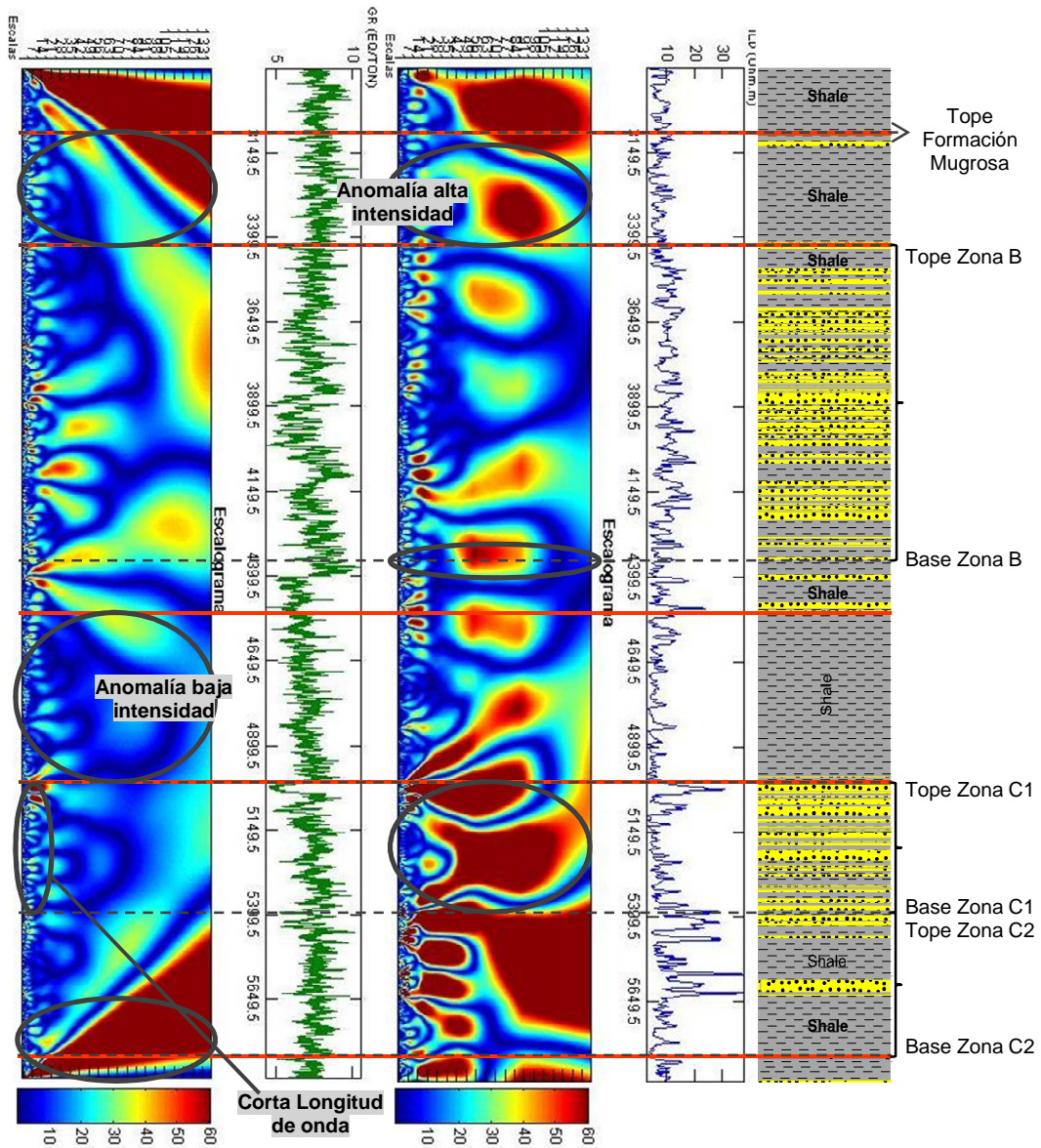
Para el análisis de 6 registros ILD y 6 GR mediante la aplicación de la transformada de ondícula continua en el software MATLAB 7.1 Se procesaron un total de 12 escalogramas utilizando escalas altas, rangos con un valor máximo de 1.400 y un valor mínimo de 1, en los que se muestra señales de alta intensidad localizadas en los valores máximos del rango. La presencia de señales de alta intensidad se relaciona con eventos estratigráficos que sirvieron para definir los topes de la Fm. Mugrosa. De este modo, es posible mostrar la relación entre los topes estratigráficos interpretados en los registros y los escalogramas.

En los escalogramas se representan las anomalías con círculos negros, los topes interpretados en registros con líneas rojas continuas y los topes interpretados en escalogramas con líneas negras no continuas.

5.1.1. Escalogramas del pozo C54

En el pozo C54, se realizaron los escalogramas de registros ILD y GR para el intervalo de profundidad de 2900 y 5800 pies, los cuales se presentan en la Figura 20, donde se puede observar el tope de la Fm. Mugrosa a 3100 pies, el cual corresponde con el mismo tope estratigráfico interpretado por Mier *et al.* (2013) en los registros.

Figura 20. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C54.



En la Figura 20, la columna estratigráfica interpretada con base en los registros ILD y SP muestra un primer paquete lodoso previo al tope de la Zona B, el cual se evidencia en el escalograma del registro ILD por la presencia de una anomalía o señal de alta intensidad entre 3100 y 3425 pies. A partir de 3425 pies comienzan a disminuir los valores en el rango de escalas y se distinguen unas cortas longitudes

de onda que corresponden a las intercalaciones de lodolitas y areniscas como se muestra en la columna estratigráfica. Asimismo, en los dos escalogramas se distingue a 4350 pies una anomalía de alta intensidad que sirvió para definir la base de la Zona B a unos 162 pies por encima de la base interpretada por Mier *et al.* (2013).

En los escalogramas a profundidades mayores de 4350 pies no se aprecia un comportamiento claro que indique la presencia de topes o que muestre la relación entre la columna estratigráfica y los escalogramas. Sin embargo, en el escalograma del registro ILD se identifica una anomalía de alta intensidad entre 5025 y 5399 pies. Por tanto, con esta anomalía fue posible definir el tope de la Zona C₁ a 5025 pies, y la base de la Zona C₁ y el tope de la Zona C₂ a 5399 pies.

Para este estudio se tiene como propósito mostrar la posible relación entre los topes estratigráficos interpretados en los registros y los escalogramas. Para ello, se tomó en cuenta el tope de la Zona C definido por Mier *et al.* (2013) en la primera arena que se encuentra después de la secuencia lodosa seguida de la base de la Zona B, el cual en los escalogramas corresponde a la profundidad donde se definió el tope de la Zona C₁. Con base en esto se propone en el presente trabajo subdividir en dos subzonas la Zona C.

Por otro lado en el escalograma del registro GR a 5025 pies se observa una anomalía de alta intensidad con un valor de 141. De igual manera y siguiendo con el mismo escalograma se encontró a 5825 pies de profundidad otra anomalía de alta intensidad, la cual se usó para definir la base de la Zona C que a su vez es la misma base de la Zona C₂ propuesta en el presente trabajo.

Finalmente, en el pozo C54 se procesó el escalograma del registro ILD con un rango de 1400 escalas, lo que permitió identificar anomalías de alta intensidad asociadas a los valores máximos en el rango de escalas. Esta característica no se observó claramente en los escalogramas de registros GR, lo cual se debe a que el registro GR sólo determina zonas sucias (arcillas) o zonas limpias (sin arcillas)

pero no litología. Sin embargo, la Fm. Mugrosa corresponde a intercalaciones de lodolitas y areniscas de poco espesor que para su identificación se deben procesar con un rango de escalas bajas, en la que se pueda tener mejor detalle de la información.

De lo anterior, se sugiere la posibilidad de determinar límites entre capas gruesas usando el escalograma del registro GR con un rango de 1400 escalas. Debido a que este estudio permitió identificar una relación entre las anomalías de baja intensidad y los paquetes lodosos como se muestra encima del tope de la Zona B y de la Zona C₁ (Figura 20).

5.1.2. Escalogramas del pozo C56

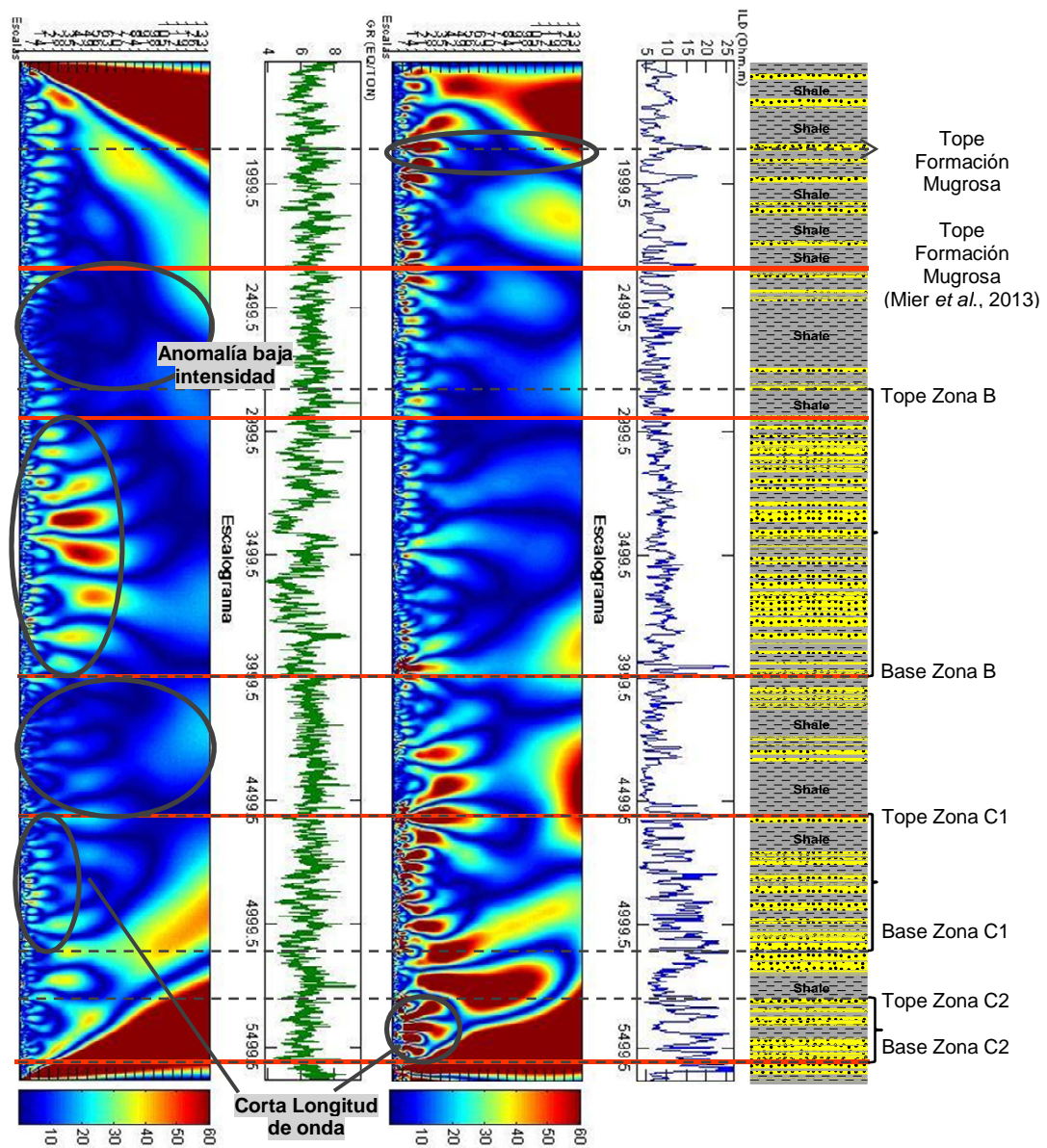
En el pozo C56, se realizaron los escalogramas de registros ILD y GR para el intervalo de profundidad de 1500 y 5630 pies, los cuales se presentan en la Figura 21, donde se aprecia el tope de la Fm. Mugrosa a 1820 pies, el cual no corresponde con el mismo tope estratigráfico interpretado por Mier *et al.* (2013) en los registros. Este tope se evidencia en el escalograma del registro ILD por la presencia de una anomalía de alta intensidad.

En el escalograma del registro GR se observa una anomalía de baja intensidad entre 2450 y 2850 pies. De igual manera en la Figura 21 la columna estratigráfica interpretada con base en los registros ILD y SP, muestra la relación entre esta anomalía y una secuencia lodosa seguida de la arena que fue marcada por Mier *et al.* (2013) como el tope de la Zona B. Sin embargo, para este estudio el tope de la Zona B se definió a 2850 pies, correspondiendo a 90 pies por encima del mismo tope estratigráfico definido por Mier *et al.* (2013).

Por otra parte entre las profundidades de 2850 y 3990 pies se distinguen en los escalogramas unas cortas longitudes de onda que corresponden a las intercalaciones de lodolitas y areniscas que se aprecian en la columna

estratigráfica. Este comportamiento de los escalogramas es un poco más claro que el observado para la Zona B, en el pozo C54.

Figura 21. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C56.



Además, en el escalograma del registro GR se identifica una anomalía de baja intensidad entre 3990 y 4550 pies. Por lo tanto, con esta anomalía fue posible definir la base de la Zona B a 3990 pies, la cual se relaciona con la secuencia

lodosa seguida de la base de la Zona B que corresponde con el mismo nivel estratigráfico definido por Mier *et al.* (2013) y asimismo, con esta anomalía fue posible definir el tope de la zona C₁ a 4550 pies.

Adicionalmente, en los escalogramas se distinguen unas cortas longitudes de onda que van hasta 5100 pies donde se presenta una longitud de onda de alta intensidad que permitió definir la base de la Zona C₁.

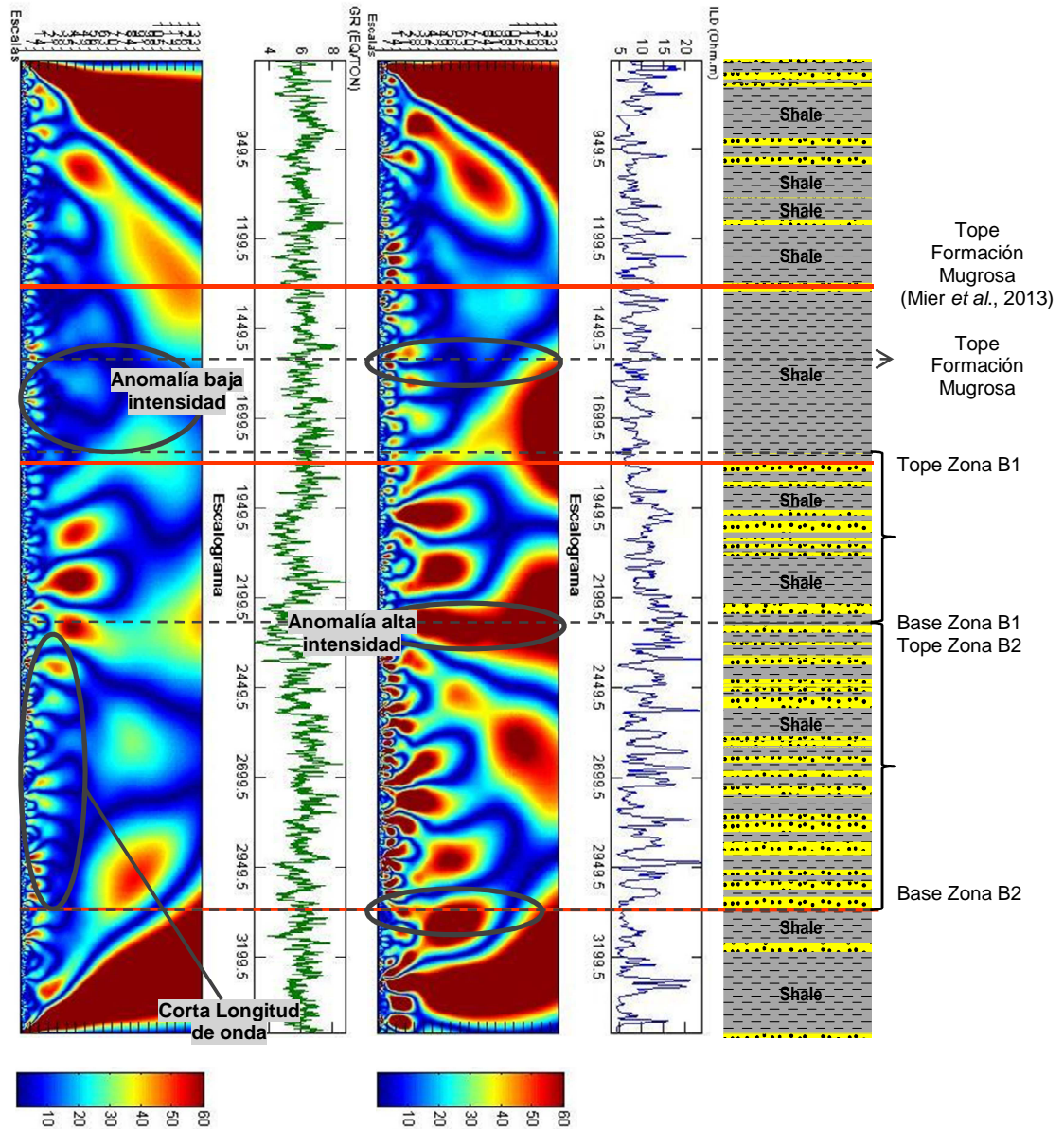
En el escalograma del registro ILD, se observa a una profundidad de 5300 pies una anomalía de alta intensidad que indica el tope estratigráfico de la Zona C₂, seguido por unas cortas longitudes de onda que corresponden a anomalías de alta intensidad que van hasta una profundidad de 5550 pies; siendo esta profundidad la base de la Zona C que a su vez es la misma base de la Zona C₂ propuesta en el presente trabajo.

Finalmente, para los pozos C54 y C56 se determinó la existencia de topes estratigráficos de la Zona C. De la misma forma se definieron dos subzonas: (1) la Zona C₁, compuesta por una intercalación de areniscas y lodolitas que se muestran en el escalograma del registro GR como cortas longitudes de onda y (2) la Zona C₂, la cual se identificó en cada pozo por corresponder con el final de una anomalía de alta intensidad.

5.1.3. Escalogramas del pozo C63

En el pozo C63, se realizaron los escalogramas de registros ILD y GR para el intervalo de profundidad de 700 y 3410 pies, los cuales se presentan en la Figura 22, donde se aprecia el tope de la Fm. Mugrosa a 1550 pies. Este tope se evidencia en el escalograma del registro ILD por el comienzo de una anomalía de alta intensidad a unos 200 pies por abajo del mismo tope estratigráfico definido por Mier *et al.* (2013).

Figura 22. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C63.



En la Figura 22, la columna estratigráfica interpretada muestra un primer paquete lodoso previo al tope de la Zona B₁, el cual se evidencia en el escalograma del registro GR por la presencia de una anomalía de baja intensidad entre 1500 y 1820 pies. Se definió el tope de la zona B₁ a unos 25 pies por encima del tope de la Zona B definido por Mier *et al.* (2013).

A partir de 1820 pies comienzan a disminuir los valores en el rango de escalas y se observan unas cortas longitudes de onda que corresponden a las intercalaciones de lodolitas y areniscas como se muestra en la columna estratigráfica. Se distinguen en los dos escalogramas a 2275 pies una anomalía de alta intensidad que permitió definir la base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂.

Para el presente trabajo se tiene como propósito mostrar la posible relación entre los topes estratigráficos interpretados en los registros y los escalogramas. Por lo tanto, se propone para los pozos C63, C65, C66 y C68 subdividir en dos subzonas la Zona B.

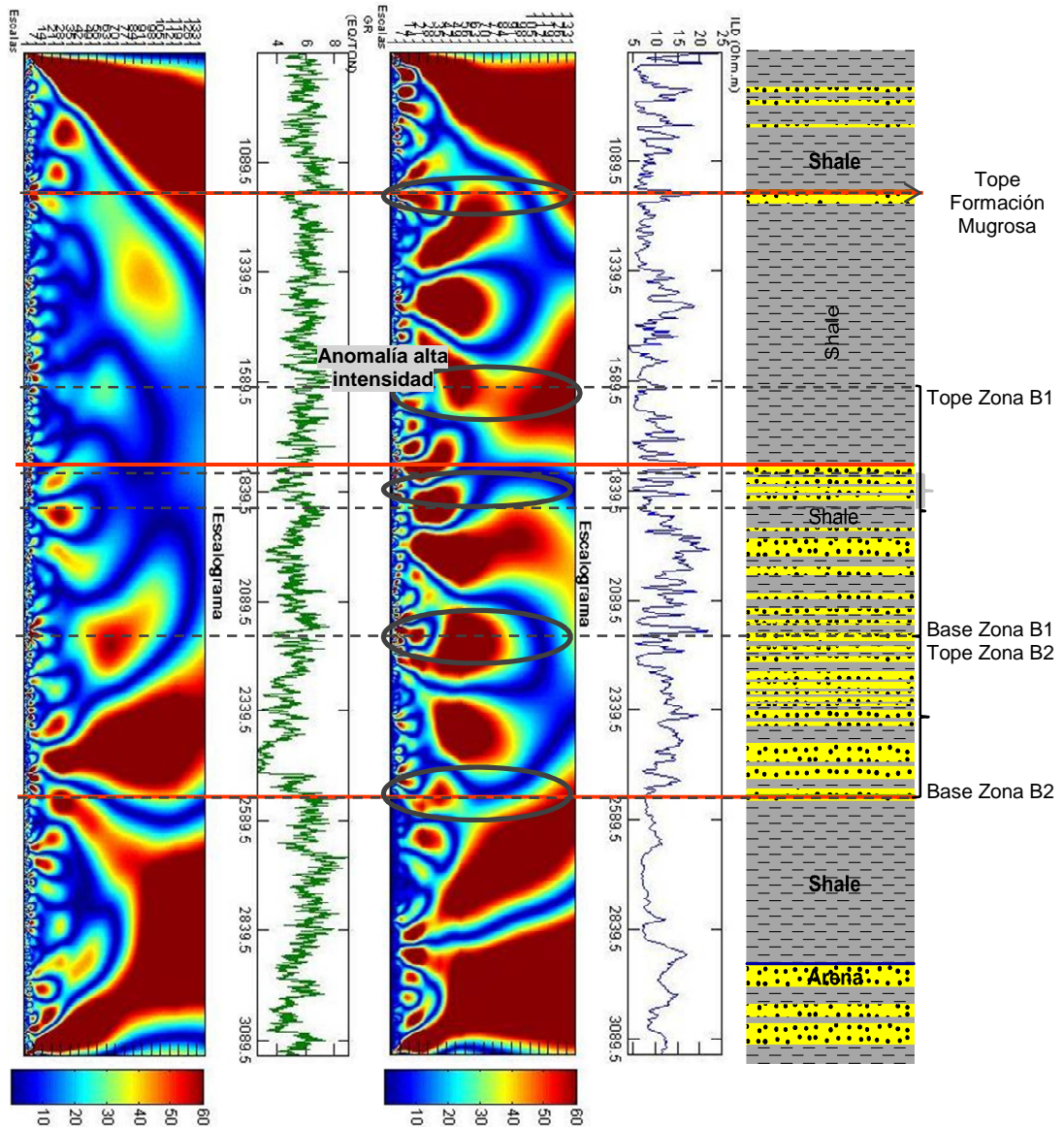
Por otro lado, en los escalogramas del registro ILD y GR se observan unas cortas longitudes de onda entre 2275 y 3040 pies. Además, se distingue a 3040 pies una anomalía de alta intensidad que sirvió para definir la base de la Zona B₂; siendo esta profundidad la base de la Zona B definida por Mier *et al.* (2013).

Por último en el pozo C63 se procesó el escalograma del registro GR con un rango de 1400 escalas, lo que permitió identificar los topes de la Zona B₂ por la presencia de anomalías de alta intensidad asociadas a los valores máximos en el rango de escalas. Esta característica se muestra a detalle en el escalograma del registro GR que se procesó con un rango de 100 escalas en el análisis multiresolución.

5.1.4. Escalogramas del pozo C65

En el pozo C65, se realizaron los escalogramas de registros ILD y GR para el intervalo de profundidad de 840 y 3122 pies, los cuales se presentan en la Figura 23, donde se puede observar el tope de la Fm. Mugrosa a 1150 pies, el cual se evidencia por la presencia de una anomalía de alta intensidad en el escalograma del registro ILD y corresponde con el mismo tope estratigráfico definido por Mier *et al.* (2013).

Figura 23. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C65.



Se observa en el escalograma del registro ILD a 1590 pies una anomalía de alta intensidad que sirvió para definir el tope de la Zona B₁ a unos 185 pies por encima del tope de la Zona B interpretado por Mier *et al.* (2013) en los registros. Para esta profundidad se identifica en la columna estratigráfica interpretada unas capas gruesas de areniscas, las cuales se evidencian en los dos escalogramas por la

presencia de una anomalía de alta intensidad que sirvió para definir una subzona dentro de la Zona B₁.

Después de esto, en el escalograma del registro GR a 2150 pies se aprecia una anomalía de alta intensidad que permitió definir la base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂. Adicionalmente, en los escalogramas ILD y GR se observa a 2550 pies una anomalía de alta intensidad, la cual corresponde con la base definida por Mier *et al.* (2013) y se identifica en la columna estratigráfica a partir de la última arena que se encuentra antes de la secuencia lodosa.

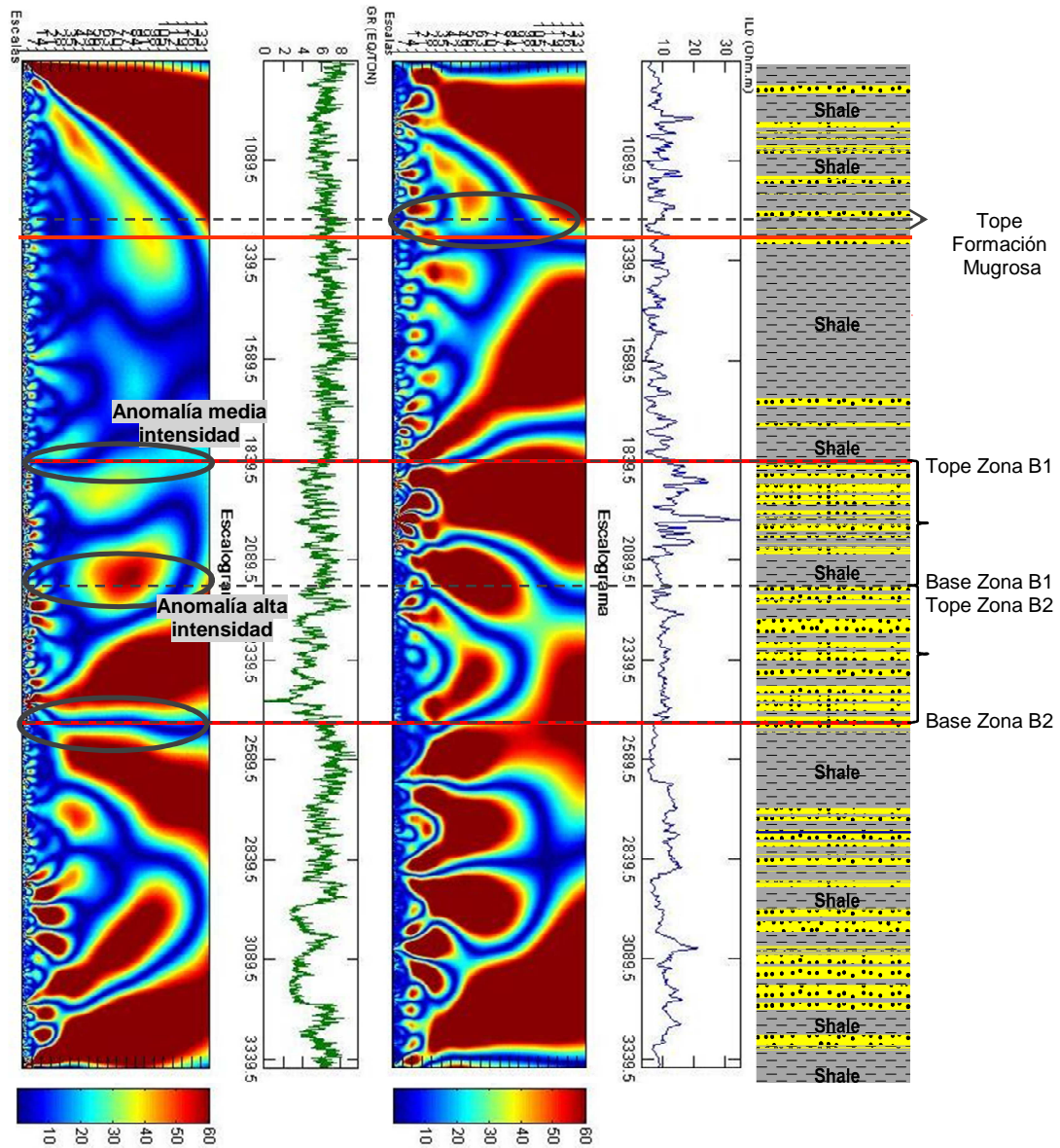
5.1.5. Escalogramas del pozo C66

En el pozo C66, se realizaron los escalogramas de registros ILD y GR para el intervalo de profundidad de 840 y 3360 pies, los cuales se presentan en la Figura 24, donde se puede observar el tope de la Fm. Mugrosa a 1200 pies. Este tope se evidencia en el escalograma del registro ILD por la presencia de una anomalía de alta intensidad a unos 25 pies por encima del mismo tope estratigráfico definido por Mier *et al.* (2013).

A partir de esta profundidad en el escalograma del registro GR no se observa un comportamiento claro que indique la presencia de topes o que muestre la relación entre la columna estratigráfica y los escalogramas. Sin embargo a 1825 pies en el escalograma del registro GR se identifica una anomalía de media a alta intensidad que sirvió para definir el tope de la Zona B₁.

En el escalograma del registro GR se continúa la ausencia de un comportamiento claro que indique la presencia de topes. Sin embargo, se reconoce a 2151 pies una anomalía de alta intensidad que permitió definir la base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂.

Figura 24. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C66.



Finalmente, se identificó en el escalograma del registro GR un cambio a partir de 2475 pies, lo cual sirvió para definir la base de la Zona B₂. Esta base se evidencia por marcar el final e inicio de unas anomalías de alta intensidad y corresponde con la base de la Zona B definida por Mier *et al.* (2013).

5.1.6. Escalogramas del pozo C68

En el pozo C68, se realizaron los escalogramas de registros ILD y GR para el intervalo de profundidad de 700 y 3424 pies, los cuales se presentan en la Figura 25, donde se puede observar el tope de la Fm. Mugrosa a 1250 pies. Este tope se evidencia en los dos escalogramas por marcar el final de una anomalía de alta intensidad a unos 375 pies por encima del mismo tope estratigráfico definido por Mier *et al.* (2013).

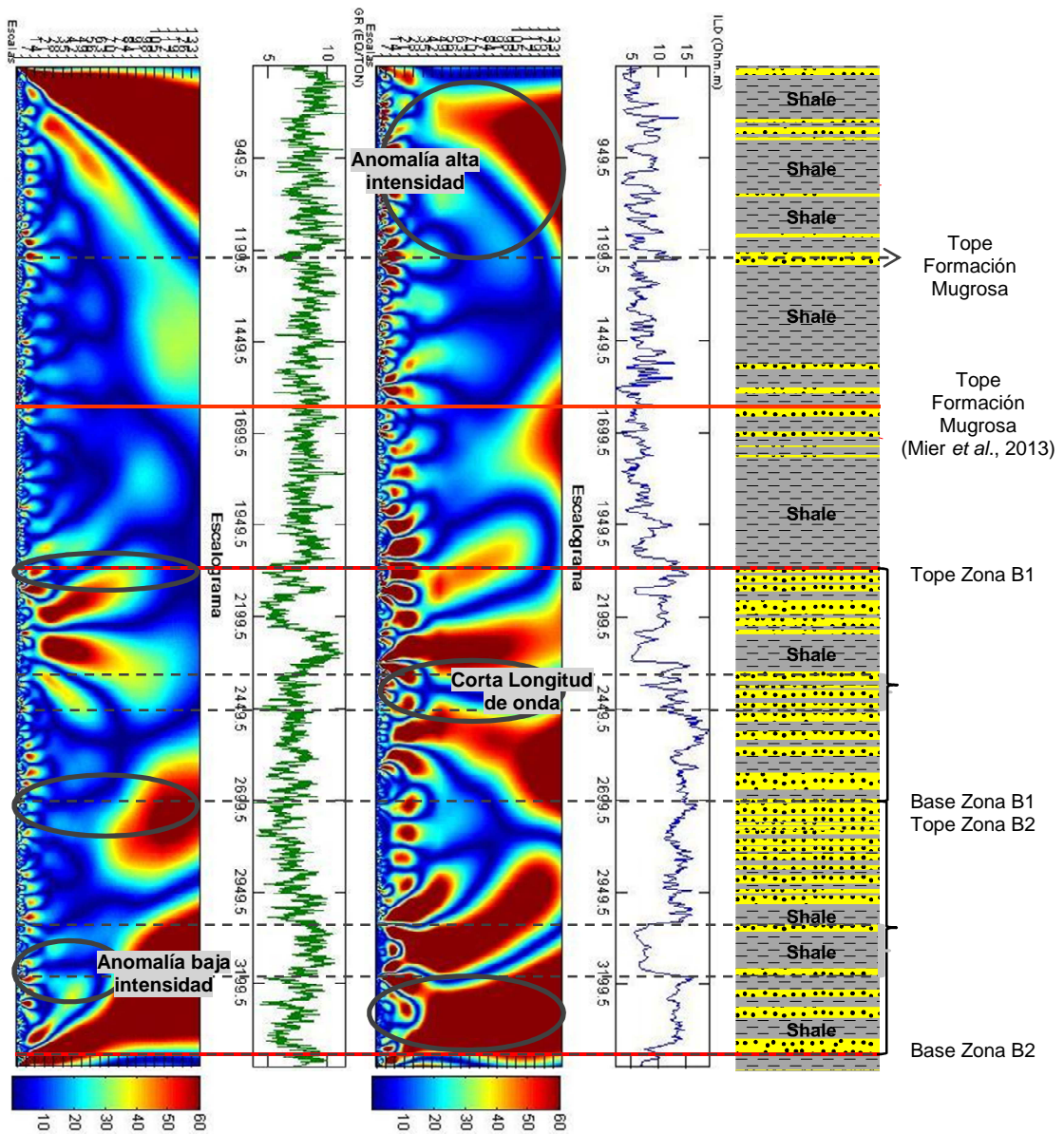
En el escalograma del registro GR se identifica una anomalía de alta intensidad que permitió definir el tope de la Zona B, el cual se relaciona con la primera arena que se encuentra después de la secuencia lodosa del tope de la Fm. Mugrosa. Esta relación hace referencia al criterio empleado por Mier *et al.* (2013) para definir topes estratigráficos.

Por otro lado, en el escalograma del registro ILD a 2449 pies se identifican dos anomalías de alta intensidad y corta longitud de onda, separadas por dos anomalías de alta intensidad. La presencia de las dos anomalías de corta longitud de onda sirvió para definir una subzona dentro de la Zona B₁, las cuales probablemente correspondan a unas capas delgadas de areniscas limitadas hacia la parte superior con unas capas gruesas de lodolitas y hacia la parte inferior con una intercalación de areniscas y lodolitas.

Adicionalmente, en el escalograma del registro ILD se identifica una anomalía de alta intensidad entre 2449 y 2699 pies. Para una profundidad de 2699 pies en el escalograma del registro GR se observa una anomalía de alta intensidad que sirvió para definir la base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂.

A partir de 3100 pies en el escalograma del registro ILD, se presenta una anomalía de alta intensidad que se relaciona con una capa gruesa de una secuencia lodosa debido a que en el escalograma del registro GR se muestra como una anomalía de baja intensidad.

Figura 25. Escalogramas de los Registros ILD y GR del pozo C68.



Finalmente, se identificó en los escalogramas de los dos registros una anomalía de alta intensidad que sirvió para definir la base de la Zona B₂ a 3370 pies, la cual corresponde a la base de la Zona B interpretada por Mier *et al.* (2013).

Se encontró en la interpretación de los escalogramas de registros ILD y GR para los pozos C63, C65, C66 y C68, que los registros ILD procesados a escalas altas permiten identificar señales de alta intensidad asociadas a los valores máximos en el rango de escalas. Esta característica no fue observada en los escalogramas de los registros GR. Por lo tanto, se consideró procesar los registros GR con un rango de escalas bajas con el propósito de encontrar señales de alta intensidad localizadas en las mismas profundidades de los registros ILD. Estos escalogramas son analizados a detalle en el capítulo de análisis multiresolución (transformada de ondícula discreta) en registros GR.

Se encontró una relación entre los bajos valores para la curva del registro GR y la presencia de señales de alta intensidad en los escalogramas. Esta relación permitió asociar los bajos valores para la curva del registro GR con los topes estratigráficos definidos por Mier *et al.* (2013) para la Fm. Mugrosa, la cual presenta su tope a partir de la primera arena que se encuentra antes de una secuencia lodosa. Asimismo, se definieron los topes para las zonas B y C a partir de la primera arena que se encuentra después de una secuencia lodosa.

Para los pozos C63, C65, C66 y C68 se subdividió en dos subzonas la Zona B de la Fm. Mugrosa: (1) Zona B₁ y (2) Zona B₂. Estas dos subzonas se establecieron por la presencia de señales de alta intensidad, empleadas como criterio para definir topes estratigráficos en los escalogramas.

En la Zona B de los escalogramas de los pozos C66 y C68, se encontró que los topes estratigráficos obtenidos tanto en el análisis de escalogramas como los interpretados por Mier *et al.* (2013) en los registros SP de estos pozos, corresponden a las mismas profundidades así como se muestra en la (Tabla 4). Mientras que en los pozos C63 y C65, los topes estratigráficos solo fueron observados hacia la base de la Zona B (Tabla 4).

Tabla 4. Topes estratigráficos de las Zonas B₁-B₂ de la Formación Mugrosa.

Pozo	Registros disponibles	Intervalo procesado (Pies)	Interpretación Registros SP (Pies)		Escalogramas Registros (ILD) y (GR), (Pies)	
			Zona B de la Formación Mugrosa		Zonas B ₁ -B ₂ de la Formación Mugrosa	
C63	Resistivos (ILD) y (GR).	700-3410 (2710)	Tope B: 1825 Base B: 3040		Tope B ₁ : 1820 Base B ₁ : 2275	Tope B ₂ : 2275 Base B ₂ : 3040
C65	Resistivos (ILD) y (GR).	840-3122 (2282)	Tope B: 1775 Base B: 2520		Tope B ₁ : 1590 Base B ₁ : 2150	Tope B ₂ : 2150 Base B ₂ : 2520
C66	Resistivos (ILD) y (GR).	840-3360 (2520)	Tope B: 1825 Base B: 2475		Tope B ₁ : 1825 Base B ₁ : 2151	Tope B ₂ : 2151 Base B ₂ : 2475
C68	Resistivos (ILD) y (GR).	700-3424 (2724)	Tope B: 2050 Base B: 3370		Tope B ₁ : 2050 Base B ₁ : 2699.5	Tope B ₂ : 2699.5 Base B ₂ : 3370

En la (Tabla 5) se muestran el tope y la base de la Zona C, los cuales fueron obtenidos en el análisis de escalogramas y corresponden con los topes interpretados por Mier *et al.* (2013) en los registros SP para estos pozos.

Tabla 5. Topes estratigráficos de las Zonas B y C Formación Mugrosa.

Pozo	Registros disponibles	Intervalo procesado (Pies)	Interpretación Registros SP (Pies)		Escalogramas Registros (ILD) y (GR), (Pies)	
			Zona B de la Formación Mugrosa	Zona C de la Formación Mugrosa	Zona B de la Formación Mugrosa	Zona C de la Formación Mugrosa
C54	Resistivos (ILD) y (GR).	2900-5880 (2980)	Tope B: 3425 Base B: 4512	Tope C: 5025 Base C: 5825	Tope B ₁ : 3425 Base B ₁ : 4350	Tope C: 5025 Base C: 5825
C56	Resistivos (ILD) y (GR).	1500-5630 (4130)	Tope B: 2940 Base B: 3990	Tope C: 4550 Base C: 5550	Tope B ₁ : 2850 Base B ₁ : 3990	Tope C: 4550 Base C: 5550

5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN (TRANSFORMADA DE ONDÍCULA DISCRETA) EN REGISTROS GR.

Una vez definidos los topes estratigráficos de las Zonas B₁-B₂ de la Formación Mugrosa para los pozos C63, C65, C66 y C68 (Tabla 4), se procesaron un total de 4 escalogramas de registros GR, en los que se utilizó escalas bajas, rangos con un valor máximo de 100 y un valor mínimo de 1, con el propósito de obtener variaciones de orden menor que muestren información más detallada de la señal.

Posterior a eso, se realizó el análisis multiresolución, en el que se utilizó la metodología propuesta por YU *et al.* (2008) para el reconocimiento de los ciclos de Milankovitch en registros de pozo. Esta metodología consiste en realizar el conteo del número de ciclos para los intervalos de las Zonas B₁ y B₂ de la Fm. Mugrosa (Figura 27).

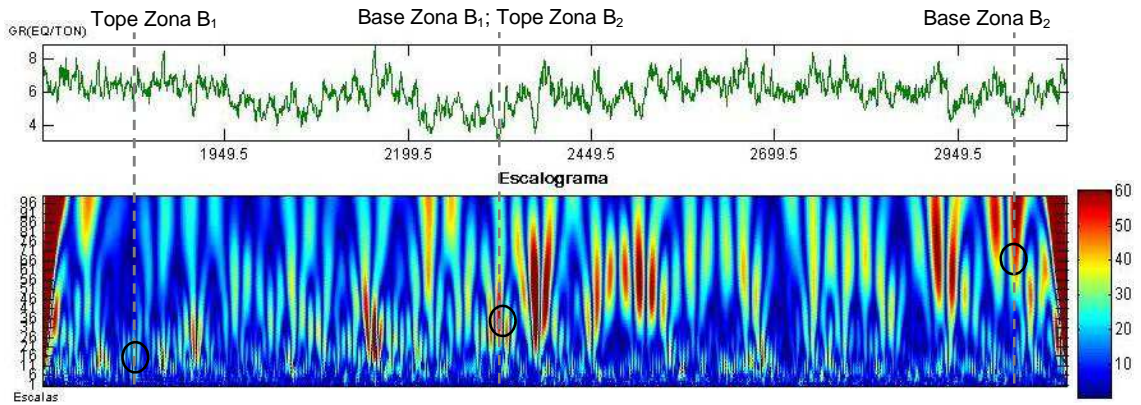
En los escalogramas se representan los topes de las zonas con líneas negras no continuas y las escalas con círculos de color negro.

5.2.1. Análisis multiresolución del pozo C63

El escalograma del registro GR C63 para el intervalo del tope de la Zona B₁ a 1700 pies y la base de la Zona B₂ a 3099.5 pies, se muestra en la Figura 26.

En el escalograma se identifica una anomalía de media a alta intensidad con una escala a: 16 hacia el tope de la Zona B₁ a 1820 pies. A medida que se desciende en el escalograma se observa una anomalía de alta intensidad y corta longitud de onda con una escala a: 31 hacia base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂ a 2275. Por último se identifica una anomalía de alta intensidad con una escala a: 64 hacia base de la Zona B₂ a 3040 pies.

Figura 26. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C63.



Una vez definidas las escalas, se procedió a calcular para cada escala el nivel de descomposición de la señal, el cual se realizó usando la siguiente fórmula:

$$(n) = \text{Log}_2 (a)$$

En la Tabla 6 se muestran los niveles de descomposición para las escalas.

Tabla 6. Niveles de descomposición asociados a cada escala.

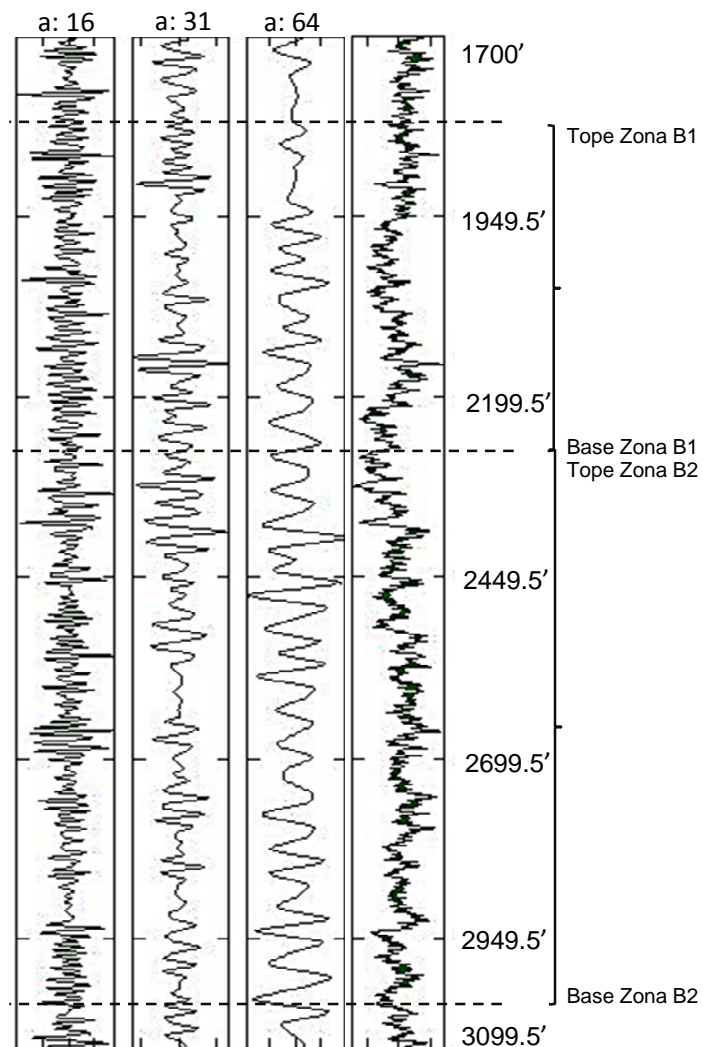
Escala (a)	Nivel de descomposición
16	6
31	5
64	4

En el pozo C63 se realizó el análisis multiresolución del registro GR, el cual se basó en la metodología de YU *et al.* (2008), en la que se realizó la descomposición del registro en señales de detalle que muestran componentes de altas frecuencias para cada escala (Figura 27).

En la Zona B₁ se encontró para las escalas a: 16, a: 31 y a: 64 un total de 12, 24 y 36 ciclos respectivamente con una relación 1:2:3, mientras que en la Zona B₂ se identificó un total de 19,32 y 64 ciclos con una relación 1:1.7:3.4.

De lo anterior se puede determinar en el intervalo de la Zona B₁ que la relación 1:2:3.2 cumple con los valores teóricos 1:2:4.8 de los ciclos orbitales de precesión 20 ka y oblicuidad 41 ka. A diferencia del intervalo de la Zona B₂, en donde no se encontró ninguna relación con los ciclos de Milankovitch.

Figura 27. Análisis multiresolución para las escalas (a: 16, a: 31 y a: 64).

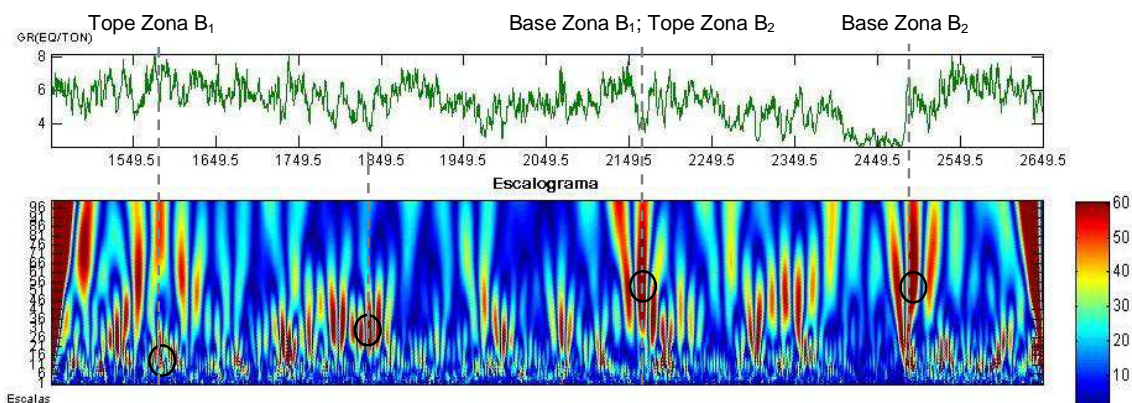


5.2.2. Análisis multiresolución del pozo C65

El escalograma del registro GR del pozo C65 para el intervalo del tope de la Zona B₁ a 1400 pies y la base de la Zona B₂ a 2649.5 pies, se muestra en la Figura 28.

En el escalograma se identifica una anomalía de alta intensidad con una escala a: 13 hacia el tope de la Zona B₁ a 1590 pies. A 1839 pies de profundidad aproximadamente se aprecia una anomalía de alta intensidad y corta longitud de onda con una escala a: 28. Finalmente se identifica unas anomalías de alta intensidad con una escala a: 51 hacia la base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂ a 2150 pies e igualmente hacia la base de la Zona B₂ a 2520 pies.

Figura 28. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C65.



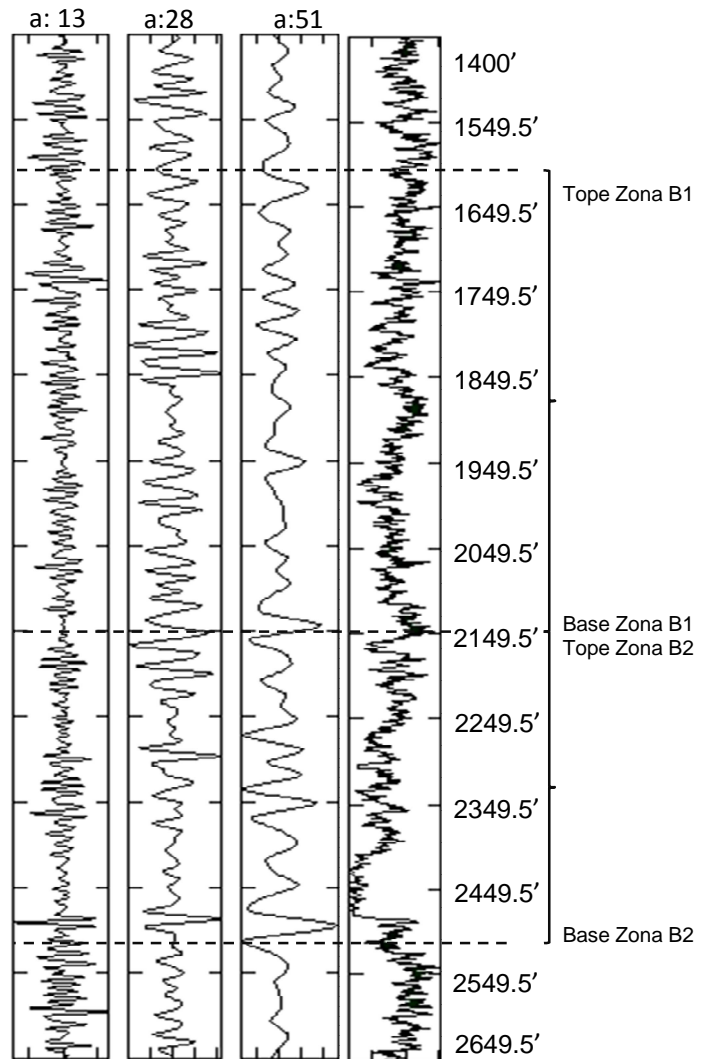
Una vez definidas las escalas, se procedió a calcular los niveles de descomposición asociados a cada escala (Tabla 7). Con estos datos se realizó el análisis multiresolución del registro GR del pozo C65.

Tabla 7. Niveles de descomposición asociados a cada escala.

Escala (a)	Nivel de descomposición
13	6
28	5
51	4

En la Figura 29, se muestra el análisis multiresolución para el reconocimiento de los ciclos de Milankovitch en registros de pozo.

Figura 29. Análisis multiresolución para las escalas (a: 13, a: 28 y a: 51)



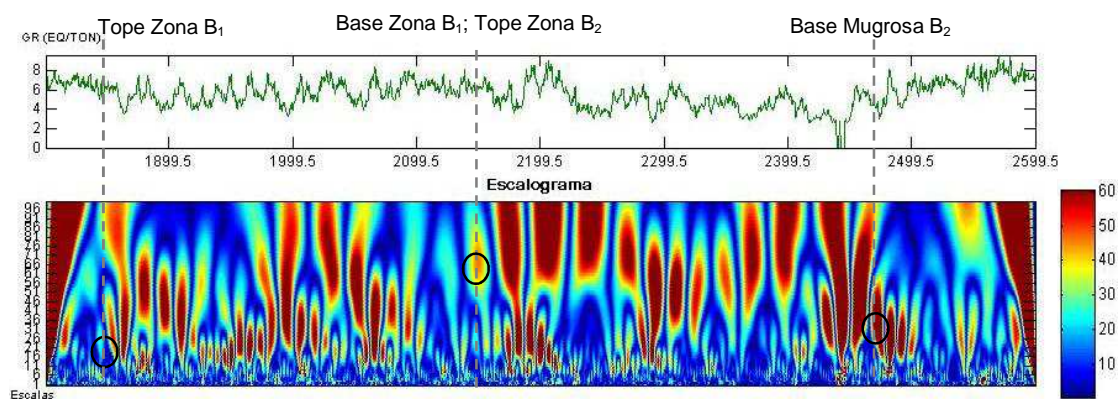
Luego se realizó el conteo del número de ciclos para las escalas a: 13, a: 28 y a: 51. En la Zona B₁ se encontró un total de 14, 28 y 45 ciclos respectivamente con una relación 1:2:3.2 y en la Zona B₂ se contó un total de 10, 17 y 34 ciclos con una relación 1:1.7:3.4.

Finalmente, en los pozos C63 y C65 en el intervalo de la Zona B₁ se encontró que la relación 1:2:3.2 cumple con los valores teóricos 1:2:4.8 para los ciclos orbitales de precesión 20 ka y oblicuidad 41 ka. Sin embargo, en el pozo C65 el intervalo de la Zona B₂ no tiene ninguna relación con los ciclos de Milankovitch.

5.2.3. Análisis multiresolución del pozo C66

El escalograma del registro GR del pozo C66 para el intervalo del tope de la Zona B₁ a 1800 pies y la base de la Zona B₂ a 2599.5 pies, se muestra en la Figura 30.

Figura 30. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C66.



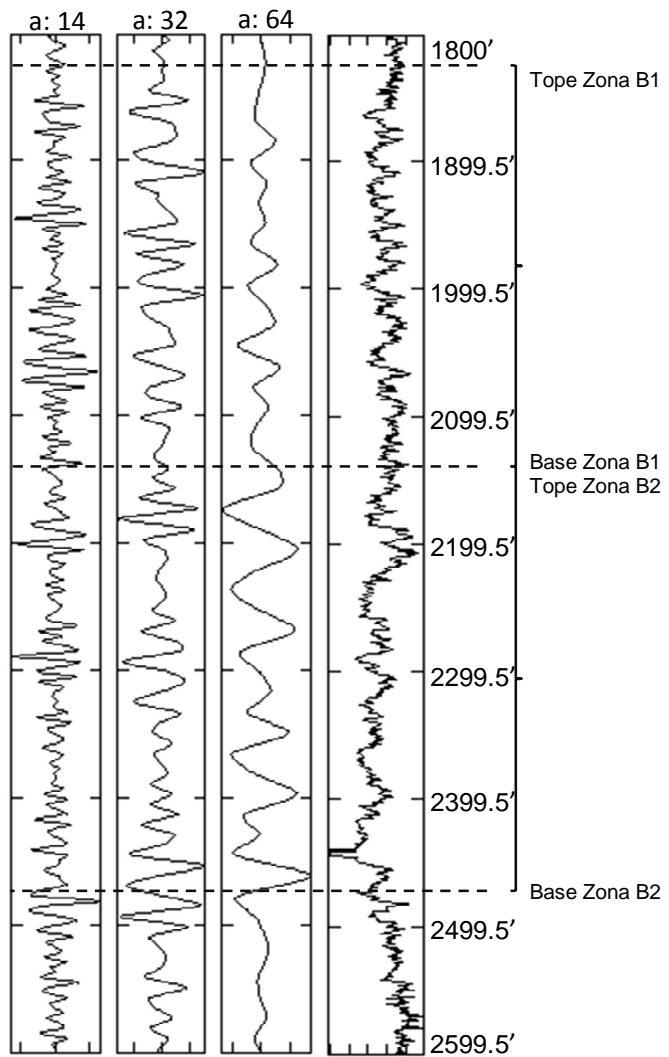
En el escalograma se identifica una anomalía de media a alta intensidad con una escala a: 14 hacia el tope de la Zona B₁ a 1825 pies. A medida que se desciende en el escalograma se observa una anomalía de alta intensidad con una escala a: 64 hacia base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂ a 2151. Por último se identifica una anomalía de alta intensidad con una escala a: 32 hacia base de la Zona B₂ a 2475 pies.

En la Tabla 8, se aprecian los niveles de descomposición para las escalas definidas previamente. Está información se utilizó para el procesamiento del registro GR del pozo C66 con la transformada de ondícula discreta.

Tabla 8. Niveles de descomposición asociados a cada escala.

Escala (a)	Nivel de descomposición
14	6
32	5
64	4

Figura 31. Análisis multiresolución para las escalas (a: 14, a: 32 y a: 64)



En la Figura 31, se muestran las señales de detalle de las escalas a: 14, a: 32 y a: 64. En la Zona B₁ se obtuvo un total de 8, 13 y 32 ciclos respectivamente con una

relación 1:1.6:4 y en la Zona B₂ se encontró un total de 7,16 y 29 ciclos, con una relación 1:2.3:4.1.

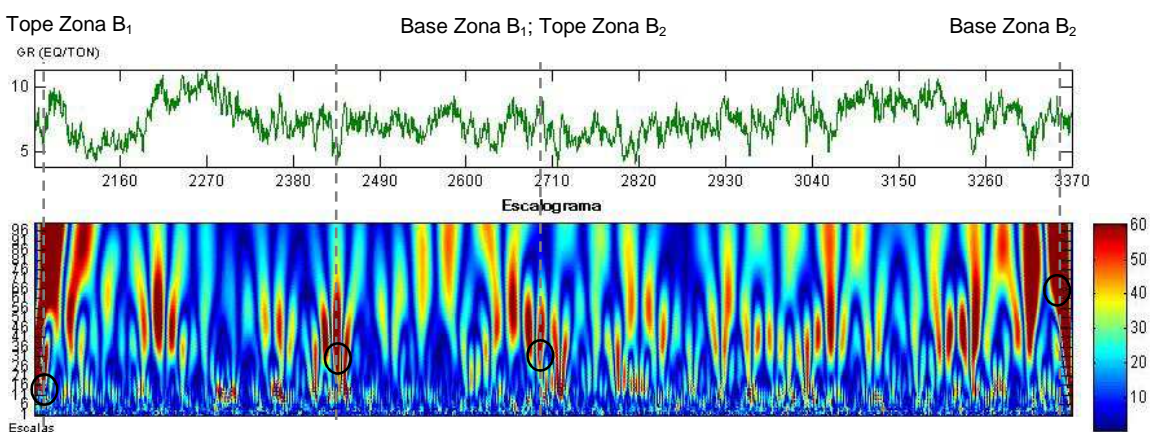
Una vez realizados los conteos para cada escala. En las Zonas B₁ y B₂ se puede determinar que la relación entre el número de ciclos no cumple con los valores teóricos 1:2:4.8 de los ciclos de Milankovitch.

5.2.4. Análisis multiresolución del pozo C68

El escalograma del registro GR del pozo C68 para el intervalo del tope de la Zona B₁ a 2050 pies y la base de la Zona B₂ a 3370 pies, se muestra en la Figura 32.

En el escalograma se identifica una anomalía de alta intensidad con una escala a: 13 hacia el tope de la Zona B₁ a 2050 pies. A 2449 pies aproximadamente se aprecia una anomalía de alta intensidad y corta longitud de onda con una escala a: 28. Este mismo valor de escala se observa hacia la base de la Zona B₁ y el tope de la Zona B₂ a 2699 pies. Por último se identifica una anomalía de alta intensidad con una escala a: 64 hacia base de la Zona B₂ a 3370 pies.

Figura 32. Escalograma del Registro GR en el intervalo de la Zona B de la Fm. Mugrosa, Pozo C68.



Una vez definidas las escalas, se procedió a calcular los niveles de descomposición asociados a cada escala, ver Tabla 9. Con estos valores se realizó la aplicación de la transformada de ondícula discreta en los registros GR del pozo C68.

Tabla 9. Niveles de descomposición asociados a cada escala.

Escala (a)	Nivel de descomposición
13	6
28	5
64	4

En la Figura 33, se muestra el análisis multiresolución para el reconocimiento de los ciclos de Milankovitch en registros de pozo.

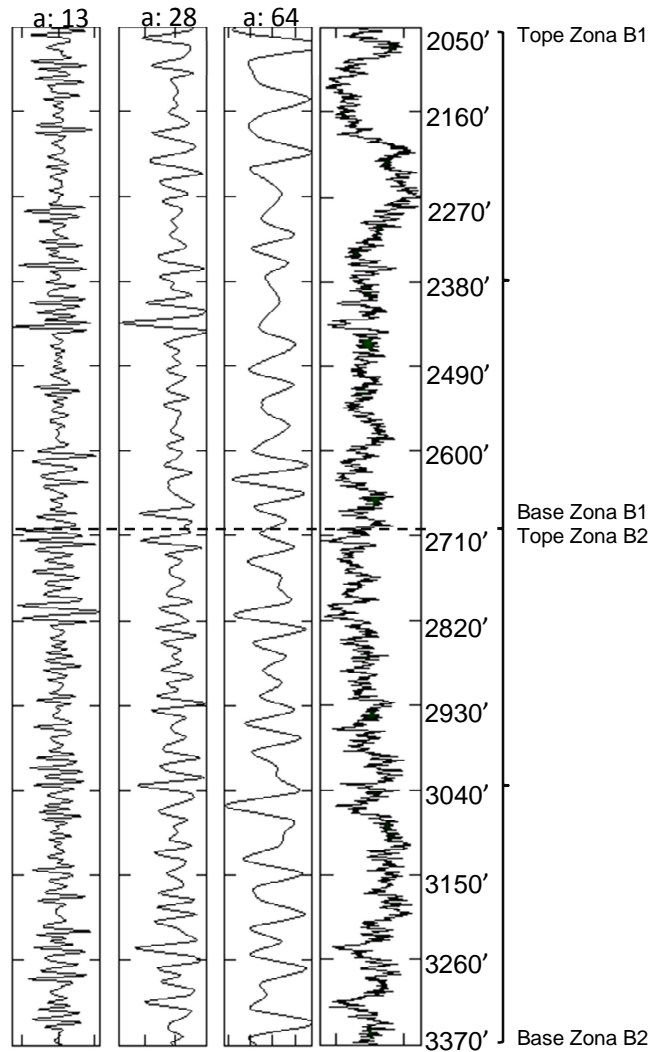
En la Zona B₁ se encontró para las escalas a: 13, a: 28 y a: 64 un total de 13, 26 y 51 ciclos respectivamente con una relación 1:2:3.9, mientras que en la Zona B₂ se identificó un total de 17,30 y 52 ciclos con una relación 1:1.7:3.

En el pozo C68, se encontró en el intervalo de la Zona B₁ que la relación 1:2:3.9 cumple con los valores teóricos 1:2:4.8 de los ciclos de Milankovitch de precesión y oblicuidad (20 y 41 ka). Sin embargo, en el intervalo de la Zona B₂ no se encontró ninguna relación con los ciclos de Milankovitch.

Para el intervalo de la Zona B₁, en los pozos C63, C65 y C68 los valores de las escalas obtenidas tienen la relación 1: 2, lo que indica la presencia de los ciclos de Milankovitch de precesión y oblicuidad (20 y 41 ka). Estas dos periodicidades permiten identificar la existencia de dos eventos sedimentológicos que se evidencian por la presencia de señales de alta intensidad con un valor mínimo a: 13 y un valor máximo a: 31. Estos eventos se relacionaron tanto con la (1) electroforma de canal como con (2) la electroforma de llanura de inundación, las cuales fueron definidas por Fonseca y García (2009) a partir de la interpretación de los registros SPN y GR. Sin embargo, la ausencia de una descripción

sedimentológica detallada no permite mostrar la relación de estas ciclicidades con el modelo sedimentario para cada pozo.

Figura 33. Análisis multiresolución para las escalas (a: 13, a: 28 y a: 64)



Para el intervalo de la Zona B₂, en los pozos C63, C65 y C68 se observó la presencia de señales de alta intensidad con un valor mínimo a: 51 y un valor máximo a: 64. De este modo, se logró identificar que los valores de las escalas obtenidas no tienen ninguna relación con los ciclos de Milankovitch.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis de registros de pozo en Campo Colorado revela que la aplicación de la transformada de ondícula continua es apropiada para definir topes estratigráficos de las Zonas B y C de la Fm. Mugrosa, y se establece la presencia de señales de alta intensidad como criterio para la definición de topes estratigráficos en los escalogramas.
- En la interpretación de los escalogramas de registros GR para los pozos C63, C65, C66 y C68 se encontró que los escalogramas procesados a escalas altas, es decir, a rangos con un valor máximo de 1400 y los escalogramas procesados a escalas bajas, es decir, a rangos con un valor máximo de 100 permiten identificar señales de alta intensidad asociadas a los valores máximos en el rango de escalas, lo que demuestra la utilidad de la transformada de ondícula en la definición de topes estratigráficos.
- En los escalogramas procesados a escalas bajas se identifican señales de alta intensidad, en las que la descomposición a detalle permite reconocer dos periodicidades en la Zona B₁ de los pozos C63, C65 y C68. Estas periodicidades se relacionan con dos ciclos orbitales de los valores teóricos de Milankovitch. Sin embargo, la ausencia de información de núcleos de perforación no permite tener una descripción sedimentológica detallada en la que se observen las facies y sus asociaciones para establecer las relaciones de las ciclicidades con el modelo sedimentario de cada pozo.
- El análisis de los escalogramas permite localizar señales de alta intensidad, que estudiadas a detalle por el análisis multiresolución dan como resultado el reconocimiento de periodicidades. Estas periodicidades, se pueden relacionar con la presencia de electroformas para indicar la existencia de eventos sedimentológicos.

- El análisis multiresolución del registro GR revela la presencia de dos periodicidades. De acuerdo con Fonseca y García (2009), en el modelo sedimentológico y estratigráfico de Campo Colorado, se definen dos electroformas: (1) electroforma de canal y (2) electroforma de llanura de inundación y desborde de canal; lo cual indica que la presencia de estas dos periodicidades en el intervalo de la Zona B₁ de la Fm. Mugrosa, se relaciona con las electroformas definidas a partir de la interpretación de los registros SPN y GR.
- Se recomienda emplear la herramienta matemática de la transformada de onícula en pozos con datos de núcleos de perforación y registros de Rayos Gamma en núcleos, con el fin de identificar la relación entre las periodicidades, las electrofacies y las litofacies, lo que sería una alternativa complementaria para obtener mayor utilidad de la información de pozo.
- A partir de los topes estratigráficos interpretados se recomienda continuar con la subdivisión propuesta en este trabajo para las Zonas B₁-B₂ en los pozos C63, C65, C66 y C68, y Zonas C₁-C₂ en los pozos C54 y C56. Asimismo no descartar la presencia de estas subzonas en los otros pozos del Campo, considerando que los pozos C31 y C39 de ECOPETROL (2003), presentan esta misma subdivisión.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martínez, J. F., (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal*. Bogotá, Colombia: Agencia Nacional de Hidrocarburos. 92p.
- Caballero, V., Parra, M., Mora, A., (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de nuevo mundo, Cuenca Valle medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, 32, (1): 45-77.
- Clavijo, J., & Royero, J.M., (2001). *Mapa geológico generalizado del Departamento de Santander. Escala 1:400.000. Memoria explicativa*, Bogotá, Colombia: INGEOMINAS.
- Coconi, E., Ronquillo, G., & Campos, J.O., (2010). Multi-scale analysis of well-logging data in petrophysical and stratigraphic correlation. *Geofísica Internacional*, 49, (2): 55-67.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, S.H., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., & Taborda, A., (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79, (10), 1421-1443.
- De Porta, J., et al., (1974). *Lexique Stratigraphique International*. Centre National Recherche Scientifique. Volume V. Amerique Latine, fascicule 4b, Colombie, 692 p. París.
- Ecopetrol. (2003). Diagnóstico y estrategias de recobro Campo Colorado, Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano de Petróleo. 109 p.
- Fonseca, C. & García, J., (2009). Modelo sedimentológico y estratigráfico de la Formación Mugrosa en el Campo Escuela Colorado. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 134 p.
- Meneses, J & Ramírez, J., (2008). Desarrollo de una metodología para la caracterización de atributos petrofísicos básicos de la Formación Mugrosa: Caso de estudio Campo Colorado. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 104 p.

- Mier, R., Chajin, P., Delgado, L., Luna, J., & Palmera, T., (2013). Modelo geológico de Campo Escuela Colorado. Universidad Industrial de Santander. 143 p.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., & Poggi, J.M., (1997). *Wavelet Toolbox, User's Guide*. Versión 1. The Maths Works, Inc.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., & Poggi, J.M., (2007). *Wavelet Toolbox, User's Guide*. Versión 4. The Maths Works, Inc.
- Montejo, L., & Suarez, L., (2007). Aplicaciones de la transformada ondícula ("wavelet") en Ingeniería estructural. *Mecánica Computacional*, (26): 2742-2753.
- Morales, L., et al., (1958). General geology and oil occurrence of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In habitat of oil a Symposium American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 641-695. Tulsa.
- Navarro, J., & Martínez, D., (2010). *Introducción a la transformada wavelet continua* (1era ed.). Azcapotzalco: Editorial Reverté. 109 p.
- Sánchez, F., (2011). Análisis multiescala de registros de pozo, Campo Lama; Venezuela. Tesis de pregrado. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas. 22 p.
- Sarmiento Rojas, L. F., (2001). Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. (Ph.D Thesis). Vrije University, Amsterdam. 295 p.
- Yu, J.F., Sui, F.G., Li, Z.X., Liu, H., & 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 & Technology*, 18, (4): 594-598.