



***INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL***

***ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA***

***UNIDAD TICOMÁN***



***CIENCIAS DE LA TIERRA***

***“ANÁLISIS FRACTAL DE LOS REGISTROS DE RAYOS GAMMA DE LA FORMACIÓN  
CHICONTEPEC”***

***TESIS***

***QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
CON ESPECIALIDAD EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS  
NATURALES***

***PRESENTA:***

***ELIZABETH GUZMÁN HIDALGO***

***DIRECTOR DE TESIS: M. en C. LEOBARDO SALAZAR PEÑA***

***CODIRECTOR: DR. LUIS GERMÁN VELASQUILLO MARTÍNEZ***

***MEXICO, D.F., AGOSTO, 2012***



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 14:30 horas del día 26 del mes de Junio del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIA. U. Ticomán para examinar la tesis titulada:  
"Análisis fractal de los registros de rayos gamma de la Formación Chicontepec"

Presentada por el alumno:

Guzmán  
Apellido paterno

Hidalgo  
Apellido materno

Elizabeth  
Nombre(s)

Con registro: 

A	1	0	0	5	1	5
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

M. en C. Leobardo Salazar Peña

Dr. Luis Germán Velásquillo Martín

Dr. Arturo Ortiz Ubilla

M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán

Dr. Jorge Jacobo Albarrán



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Ing. Julio E. Morales de la Garza



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D. F., el día 27 del mes de Junio del año 2012, la que suscribe C. Elizabeth Guzmán Hidalgo, alumna del Programa de Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales, con número de registro A100515, adscrito a la ESIA, Ticomán, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Leobardo Salazar Peña y cede los derechos del trabajo intitulado “Análisis fractal de los registros de rayos gamma de la formación Chicontepec”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [elizaymc@hotmail.com](mailto:elizaymc@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

Nombre y firma



## DEDICATORIA

Para Tzu, Magos y Cande

Con todo cariño



## AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, que siempre han estado apoyándome incondicionalmente y que indirectamente hacen posible que mi esfuerzo se convierta en el presente trabajo: a Tzu, Margarita, Cande, Sergio, Coni, Karla, Carlos, Modesto, Tarcila, Berenice y a Miguel, gracias por su ánimo, calidez y compañía.

Agradezco a mis directores de tesis, Dr. Luis Germán Velasquillo y M. en C. Leobardo Salazar Peña, que han leído, opinado y corregido mi trabajo, por su orientación, motivación y confianza que ha sido fundamental en el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Gustavo Murillo Muñetón por su recomendación para que se me considerara a participar en el proyecto.

A todos mis compañeros de trabajo por brindarme su apoyo con importantes conocimientos de geología de campo, a Adriana por ayudarme en la ardua tarea de la adquisición de datos y por la alegría que comparte con todos, al Dr. Armando por sus valiosas observaciones y correcciones.

A la Dirección de Posgrado del IPN, a todos los profesores del posgrado, al Dr. Miguel García Reyes y el Dr. Arturo Ortiz Ubilla por su soporte en asuntos administrativos y académicos.

Al Departamento de Investigación y Posgrado del IMP.

El financiamiento y todas las facilidades para poder realizar este trabajo fueron bajo el auspicio del proyecto No. 143935 “Nuevas metodologías y herramientas de caracterización estática y dinámica considerando las propiedades fractales de los yacimientos petroleros” financiado por el fondo SENER-CONACyT-Hidrocarburos, con Instituto Mexicano del Petróleo como institución responsable y el Dr. Luis G. Velasquillo Martínez como responsable técnico del proyecto.



## RESUMEN

En el proceso de exploración y explotación de hidrocarburos se investigan distintas técnicas de análisis de datos para caracterizar los yacimientos petroleros altamente heterogéneos. Un ejemplo de este tipo de yacimientos en México, son los depósitos areno-arcillosos de la Formación Chicontepec, los cuales han sido objeto de diferentes tipos de estudio debido a su potencial almacenador de hidrocarburos. Sin embargo, hasta la fecha, el procesamiento y análisis convencional que se ha aplicado para la caracterización de estos depósitos, no han permitido resolver los problemas y/o explicar la baja productividad que presentan los pozos que se han perforado.

Con la finalidad de contribuir a mejorar la caracterización de las facies de la Formación Chicontepec, en este trabajo se estudió la viabilidad de aplicar técnicas fractales a los registros de rayos gamma medidos en afloramientos y en los pozos petroleros. Para lograr este objetivo, se estudiaron afloramientos con facies análogas a las perforadas por el pozo Coyotes-318 y los que conforman la macropera Coyotes-331. En estos afloramientos se midieron, con un espectrómetro portátil (modelo RS-230), datos de radioactividad natural en tres secciones (CH03, CH05 y CH06) en la localidad de Acatepec, Hgo.; adicionalmente se incluyeron los resultados de los estudios sedimentológicos y estratigráficos a detalle, de las tres secciones y de cuatro núcleos del pozo Coyotes-318 que realizó el grupo de geología del proyecto SENER-CONACyT # 143935.

De las curvas de radioactividad total (TOT), Torio (Th), Potasio (K) y Uranio (U), medidas en los afloramientos de la Formación Chicontepec, se determinaron los rangos de valores que



caracterizan a estas facies areno-arcillosas; adicionalmente, se realizó un análisis de las relaciones Th/K y Th/U para inferir la composición mineralógica de las arcillas y las condiciones en las que se depositaron las facies estudiadas. Las concentraciones de K(%) y Th (ppm) contribuyen a diferenciar entre grupos de arcillas que pueden estar presentes en la formación.

A partir de las electro-facies definidas en los pozos estudiados por el grupo de geología y geofísica, se estimaron espesores de areniscas, areniscas arcillosas y lutitas arenosas, los cuales sirvieron para realizar un análisis fractal que consistió en obtener el índice de Hurst y gráficas “Hurst Test”. En base a este análisis, se infirió si la distribución vertical de los estratos tiene un comportamiento aleatorio, o si dentro de la secuencia de espesores se detectaba algún tipo de distribución que pudiera repetirse en los pozos analizados.



## ABSTRACT

In oil exploration and exploitation, current data analyses techniques, directed to highly heterogeneous reservoir characterization, (*i.e.* the siliciclastic Chicontepec Formation in Mexico) have failed to solve low well productivities issues.

Detection of fractal distributions in gamma ray well-logs were attempted for facies characterization on three outcrops of the Chicontepec Formation; the localities studied proved to have analogue sedimentary facies to those present in rocks drilled into the Coyotes Oil Field wells (Coyotes 318 and seven wells belonging to the “macropera” Coyotes 331).

Natural radioactivity values of the rocks were measured using portable equipment (gamma ray spectrometer model RS-230), the processed data was integrated to stratigraphic columns and to core well descriptions documented with fine sedimentary detail by the geology team of the SENER-CONACyT’s project number 143935.

Total radioactivity (TOT), Thorium (Th), Potassium (K), and Uranium (U) logs, measured on Chicotepec Formation outcrops, were used to determine value intervals representative of sandstones and shales; Th/K, and Th/U ratios predict chemical composition of clay minerals, and offer physical and chemical information for sedimentary environment conditions at the time of deposition. K (%), and Th (ppm) concentration values contribute to differentiate among groups of clays that could be present in the rocks.



Thicknesses were obtained from electro-facies intervals (sandstones, clayey sandstones, sandy shales and shales), those values were used to perform fractal analyses by Hurst's index and Hurst Test plots methodologies, to research if vertical distribution of bed thicknesses was random, or if it resulted in a pattern detection of zones with stratigraphic similarities among wells.



## **TABLA DE CONTENIDOS**

<b>DEDICATORIA</b> .....	<i>i</i>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<i>ii</i>
<b>RESUMEN</b> .....	<i>iii</i>
<b>ABSTRACT</b> .....	<i>v</i>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<i>1</i>
1.1 <i>Objetivo General</i> .....	<i>1</i>
1.2 <i>Objetivos Particulares</i> .....	<i>1</i>
1.3 <i>Justificación e Importancia</i> .....	<i>1</i>
1.4 <i>Antecedentes</i> .....	<i>2</i>
1.5 <i>Estado del arte</i> .....	<i>3</i>
1.6 <i>Metodología general</i> .....	<i>9</i>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<i>12</i>
2.1 <i>Espectrometría de rayos gamma</i> .....	<i>12</i>
2.1.1 <i>Conceptos generales</i> .....	<i>12</i>
2.1.2 <i>Respuesta del registro de rayos gamma</i> .....	<i>13</i>
2.1.3 <i>Errores de medición</i> .....	<i>15</i>
2.1.4 <i>Identificación de minerales arcillosos y ambientes de depósito mediante “cross-plots”</i> .....	<i>16</i>
2.1.4.1 <i>Relación Th/K</i> .....	<i>16</i>



2.1.4.2 Relación Th/U.....	19
2.1.5 Presencia de Torio y Uranio en rocas sedimentarias.....	20
2.1.6 Criterios de determinación de ambientes de depósito mediante relaciones Th/U.....	22
2.2 Análisis de distribuciones de espesores de facies mediante técnica fractales.....	23
2.2.1 Conceptos generales.....	23
2.2.2 Auto-similitud.....	24
2.2.3 Auto-afinidad.....	24
2.2.4 Dimensión Fractal.....	25
2.2.5 Exponente de Hurst.....	26
2.2.6 Discriminación de facies en ambientes turbidíticos mediante índices de Hurst.....	27
<b>CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO.....</b>	<b>32</b>
3.1 Introducción.....	32
3.2 Antecedentes.....	33
3.3 Localización del área de estudio.....	35
3.3.1 Provincias fisiográfica y geológica.....	36
3.4 Estratigrafía.....	37
3.4.1 Formación Chicontepec Inferior (Paleoceno Superior).....	37
3.4.2 Formación Chicontepec Medio (Paleoceno Superior).....	38
3.4.3 Formación Chicontepec Superior (Eoceno Inferior).....	39
3.5 Sedimentología.....	41



**CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE RADIOACTIVIDAD NATURAL DE LA FORMACIÓN CHICONTEPEC**.....43

4.1 Descripción del equipo de adquisición de rayos gamma.....43

4.2 Metodología de adquisición y procesado.....49

4.3 Descripción de la radioactividad natural registrada.....51

4.4 Proporciones Torio- Potasio (Th/K, ppm/%) y Torio-Uranio (Th/U, ppm/ppm) en las facies de la Fm. Chicontepec.....56

4.5 Obtención de electro-facies a partir de rangos de valores de radioactividad total.....67

**CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE ESPESORES DE LAS FACIES DE LA FORMACIÓN CHICONTEPEC**.....76

5.1 Análisis de la distribución de espesores de electro-facies en pozos del campo Coyotes mediante leyes de potencia.....78

5.2 Análisis de la distribución de espesores de las electro-facies mediante el índice de Hurst.....83

5.3 Tendencias de agrupamiento de los espesores de las electro-facies de areniscas, areniscas arcillosas y lutitas arenosas de los pozos del campo Coyotes.....90

**CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN**.....101

**CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES**.....106

**ANEXOS**.....108

**REFERENCIAS**.....124

## ***CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN***

### ***1.1 Objetivo General***

Caracterizar las distribuciones de las facies de la Formación Chicontepec que afloran en las proximidades de la localidad de Acatepec, Hgo., mediante espectrometría de rayos gamma y clasificadores fractales.

### ***1.2 Objetivos particulares***

- Estimar la composición mineralógica de las facies areno-arcillosas mediante las relaciones Th/K y Th/U obtenidas de los registros de rayos gamma de las secciones medidas en afloramientos.
- Obtener criterios de correlación entre los registros de rayos gamma de las secciones medidas en afloramientos y los registros de rayos gamma de los pozos de la macro-pera del pozo Coyotes 331.
- Obtener parámetros fractales a partir de los registros de rayos gamma, que permitan una mejor comprensión de las distribuciones de las facies del campo Coyotes.

### ***1.3 Justificación e Importancia***

En el ejercicio de exploración y explotación de hidrocarburos se investigan distintas técnicas de análisis de datos que permitan caracterizar a los yacimientos heterogéneos. Los depósitos areno-arcillosos de la Formación Chicontepec, han sido objeto de estudio por que poseen rocas potencialmente almacenadoras de hidrocarburo. El procesamiento y análisis convencional del conjunto de datos de esta formación, permitirá la caracterización de las facies, mientras que con el análisis fractal se pretende investigar si facies de este tipo pueden

ser correlacionadas mediante técnicas fractales que faciliten la identificación de zonas de interés y la planeación de pozos.

#### ***1.4 Antecedentes***

El término fractal fue concebido, por Benoit B. Mandelbrot en 1975, para describir aquellos fenómenos u objetos, cuya forma irregular tiene la característica de repetirse así misma a través de diferentes escalas. Estos fenómenos son denominados auto-similares o de escala invariante.

Se han reportado en diversos trabajos, que un amplio conjunto de fenómenos geológicos y geofísicos muestran un comportamiento fractal en ciertos rangos de escala. Estos no tienen un tamaño específico de escala y su distribución espacial o temporal puede ser descrita mediante el uso de un algoritmo recursivo (Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1992). Los análisis de dimensión fractal han sido exitosamente utilizados para describir distribuciones espaciales de patrones de fracturas, campos de gas y aceite, distribución de terremotos, cuerpos de potencial aurífero, discriminación de facies de sub-ambientes de abanicos submarinos, entre otros rasgos geológicos (Mandelbrot, 1977, 1995; Turcotte, 1992; Barton and Scholz, 1995; Chen y Hiscott, 1999).

Algunos sistemas complejos que no pueden ser descritos de forma precisa dentro de los sistemas lineales, por lo que se han desarrollado técnicas de análisis fractal que permiten reconocer sus propiedades y comportamientos. Una técnica común para investigar las propiedades fractales de un fenómeno, es examinar la distribución de frecuencias de una propiedad medible del fenómeno como una función de su escala. Si tal distribución muestra una relación con una potencia de la escala, entonces no existe una sola escala describiendo el fenómeno (Pérez-López *et al.*, 2000).

Las turbiditas confinadas dentro de cuencas sedimentarias pueden representar importantes reservorios de hidrocarburos en todo el mundo, por esta razón, la discriminación de sub-ambientes sedimentarios basada en métodos estadísticos es de interés petrolero. Se ha

investigado el uso potencial de la prueba de Hurst en series de datos espaciales o temporales, como una herramienta estadística para discriminar sub-ambientes dentro de las unidades turbidíticas geológicamente complejas, que llenan una cuenca confinada con las transiciones de facies expuestas en las secciones estratigráficas verticales. La prueba de Hurst ha servido en algunos trabajos para determinar el grado de agrupamiento de los valores bajos y altos de variables sedimentológicas (tales como espesor de la capa, el tamaño de grano y de la relación arenisca / lutita) como un valor dependiente del sub-ambiente de depósito (Chen y Hiscott, 1999).

Tradicionalmente los estudios en sistemas turbidíticos antiguos recaen fuertemente en la identificación de ciclos asimétricos de espesores de estratos (adelgazamiento o engrosamiento) para la identificación de sub-ambientes (Mutti y Ricci Lucchi, 1972; Stow et al., 1996). Sin embargo, ha sido notado que no todos los paquetes de arenisca en las sucesiones de abanicos submarinos se caracterizan por simple engrosamiento o adelgazamiento asimétrico de los ciclos (Murray et al 1996; Chen y Hiscott 1999). Por lo que se ha planteado la necesidad de identificar una representación alternativa estadística que se utiliza para probar el grado de aleatoriedad y de tendencias en las sucesiones turbidíticas.

### *1.5 Estado del arte*

Rothman y Grotzinger (1995), analizaron distribuciones estáticas de depósitos de turbidíticos y flujos de detritos utilizando la siguiente relación, conocida como ley de potencias:

$$N(h) \propto h^{-B}$$

Donde: **N(h)** es el número de capa, **h** el espesor de capa y **B** un exponente de escala conocido como dimensión fractal.

Para obtener el exponente de escala **B**, el análisis se centra en estudiar las regresiones lineales de los gráficos en escala bilogarítmica **log (N)** vs **log (h)**. Los datos de entrada fueron

obtenidos de tres distintas unidades geológicas con sedimentos turbidíticos y flujos de detritos. Estos autores asumieron que en los depósitos de turbiditas los granos están en contacto unos con otros, mientras que en los de flujos de detritos, los granos están soportados por el lodo de la matriz. Rothman y Grotzinger (1995) analizaron 1235 espesores de capas de turbiditas y 24 flujos de detritos intercalados, con 2 órdenes de magnitud para  $h$  (de centímetros a metros) en la Formación Kingston Peak (al sureste de California). Para el conjunto de espesores de turbiditas se determinó un valor de  $B=1.39$ , mientras que para los flujos de detritos intercalados un valor de  $B=0.49$ . Al observar estas grandes diferencias entre estos dos conjuntos, los autores infieren dos distribuciones distintas dentro de la misma sucesión sedimentaria. En la Formación Laingsburg (al sureste de África), analizaron 878 espesores de turbiditas; encontrando dos parámetros de escala distintos ( $B=0.7$  para capas inferiores a 30 cm, y  $B=1.47$  para capas mayores de 30 cm) que también definieron dos distribuciones distintas en la misma formación. En un tercer análisis de 962 turbiditas, en Barberton al sur de África, no encuentran un buen ajuste con la ley de potencias para todas las capas. Sin embargo, para los espesores menores de 25 cm, encuentran un valor de  $B=1.58$ .

El análisis de sucesiones turbidíticas desde un punto de vista fractal, arrojó importantes conclusiones en el trabajo de Rothman y Grotzinger (1995). Por una parte, se observó que no hay un parámetro único de escala para este tipo de facies. En la Fm. Kingston Peak, el valor de  $B$  depende del tipo de depósito analizado (turbiditas y flujos de detritos), mientras que en la Fm Laingsburg,  $B$  depende de la magnitud del espesor de las capas de turbiditas. Por otro lado, los autores plantean que la ley de potencias indica que los mecanismos dinámicos responsables de la depositación de turbiditas pueden ser invariantes de escala.

Schlager (2004), analiza los órdenes de escalas de tiempo en estratigrafía de secuencias y propone que las secuencias con escalas de tiempo entre  $10^3$  a  $10^6$  años, muestran rasgos fractales. En su estudio, las unidades limitadas por superficies de inundación y las limitadas por superficies de exposición son aproximadamente iguales en cantidad para un rango amplio de órdenes. Schlager (2004), supone por lado que la arquitectura de los sedimentos es invariante de escala, en un amplio rango de tiempo – espacio, y por otro, que las tendencias de

primer orden ligadas a movimientos del nivel del mar y las tasas de sedimentación son fractales en todas las escalas de tiempo geológico.

Este autor debate el modelo estándar de estratigrafía de secuencias, en el que las secuencias de tercer orden (1-10 millones de años) son limitadas por superficies de exposición, mientras que las parasecuencias de alto orden, están limitadas por superficies de inundación y arguye que se sabe de estudios en carbonatos, que existe una igual abundancia de superficies de inundación y superficies de exposición entre límites de unidades. De esta forma, el análisis fractal sobre las rutas de migración del quiebre de plataforma (*shelf-break migration paths*) debe tomar en cuenta ambos conjuntos de datos (superficies de exposición e inundación). En la metodología de Schlager (2004), la unión entre puntos situados en los quiebres de una sección, son indicativos de la variaciones del nivel del mar (representando regresiones y transgresiones), generándose una línea quebrada, cuya geometría debería ser fractal si las fluctuaciones del nivel del mar y la tasa de sedimentación son fractales. Este análisis se fundamenta en que si las superficies de erosión y las de inundación suceden en la misma proporción dentro de ciclos de entre  $10^3$  y  $10^6$  años, se puede entonces examinar la fractalidad de ese conjunto en su totalidad.

Por otra parte, Malinverno (1997) propone investigar la relación entre la distribución de espesores de capas de areniscas turbidíticas y la distribución de los volúmenes de estas. Para ello utiliza las relaciones:

$N(\eta) \propto \eta^{-B}$  para espesores y  $N(v) \propto v^{-c}$  para volúmenes.

Donde  $\eta$  es el espesor,  $B$  la dimensión fractal de la distribución de espesores,  $v$  el volumen de capas,  $c$  la dimensión fractal de la distribución de volúmenes de capas y  $N$  el número de capas.

Malinverno (1997) plantea que una distribución de volúmenes (3D) puede estar relacionada con las de distribución (1D) de espesores de capa, si el espesor y volumen de capa siguen una distribución descrita por una ley de potencias. Para este trabajo se analizan 1000 volúmenes hipotéticos de capas de areniscas, en los que se variaron los valores del exponente de distribución o dimensión fractal ( $c$ ). En su análisis, este autor explica que cuando  $c=0.5$ , se observa una distribución dominada por los miembros más grandes (volúmenes más potentes dentro del cuerpo), si  $c$  se incrementa, los volúmenes debidos a capas más delgadas

predominan. Así también relaciona el exponente  $c$  con el volumen de la capa más grande  $v_{max}$  y el volumen total  $v_{tot}$  (la suma de los volúmenes de todas las capas) de la secuencia total de  $N$  capas, de tal forma que el valor de  $v_{max}/v_{tot}$  sea el de la capa más grande respecto en el volumen total. Esta proporción ( $v_{max}/v_{tot}$ ) es presentada en términos de una sumatoria que depende del número total de capas analizadas y de la dimensión fractal ( $c$ ).

Este autor nos explica cómo es posible relacionar la distribución de espesor de las capa (dato típicamente medido), con el exponente de distribución de volúmenes, mostrando un caso ideal de capas de turbiditas, en las que se hacen ciertas suposiciones geométricas. Tales como capas con base circular, cuya longitud o diámetro es función de su espesor máximo o depocentro y de un exponente de escala ( $\gamma$ ), el cual controla la longitud de la capa. Luego propone encontrar el espesor en cualquier punto ( $r$ ) de la capa, en función de la longitud de la capa, el depocentro y un exponente ( $\alpha$ ) que modela la forma de la capa de turbidita de tal forma que el diámetro de la capa es proporcional al depocentro. Para este caso, las relaciones propuestas funcionan bien si se conoce el valor del espesor de capa al depocentro ( $h$ ), sin embargo, en la realidad la línea de muestreo vertical no corta los depocentros, sino los espesores de las capas que se encuentran a una distancia determinada del depocentro y estos pueden ser más delgados. Para cuantificar la distribución espacial de los depocentros, Malinverno (1997) asoció otra ecuación en forma de ley de potencias para que el número de depocentros cuya distancia horizontal a la línea de muestreo sea proporcional a alguna potencia de  $r$  y una vez obtenido las relaciones de escala suficientes, le fue posible relacionar los exponentes de distribución de espesor ( $B$ ) y distribución de volumen ( $c$ ). Sin embargo, por las consideraciones geométricas implicadas, esta relación solo es útil si se puede justificar que las turbiditas fueron depositadas en una cuenca confinada con las características supuestas por el autor.

Desde el punto de vista del análisis fractal de registros de pozo, Arizabalo *et al.* (2006) analiza el comportamiento fractal de la porosidad para discriminar entre estratos generadores de estratos reservorio a través de los valores de dimensión fractal y lagunaridad. Al calcular las lagunaridades del total de los registros, se encontró que ( $\Lambda$ ) es función del radio de penetración de la señal de cada registro, de tal forma que registros que tienen mayores lagunaridades son los de mayor alcance dentro de la formación. De acuerdo con su resultado,

en los registros de resistividad, las lagunaridades se ordenaron de la siguiente forma :  $\Lambda$  de MSFL <  $\Lambda$  de LLS <  $\Lambda$  de LLD (la dimensión fractal satisface la misma relación pero a la inversa  $D_f$  de MSFL >  $D_f$  de LLS >  $D_f$  de LLD); la mayor lagunaridad corresponde al registro LLD, puesto es la curva de mayor alcance (más de 1m), la interpretación de este hecho es que el registro LLD tiene la máxima resolución de lagunaridad y consecuentemente diferencia entre detalles petrofísicos y litología. Se le atribuye entonces una proporcionalidad directa a los registros de resistividad con la lagunaridad.

Felleti (2004) menciona ensayos descritos por Scheffler (1980), en los que se compara la variación entre los valores dentro de un grupo de datos con la variación entre los diferentes grupos. El primero es referido como varianza dentro del grupo y es debido a la variación aleatoria presente en cualquier población de datos. El segundo representa la varianza entre grupos y puede ser debida a fuerzas externas. Si la variación entre los grupos es mayor que la variación dentro de cada grupo, la diferencia entre los grupos se considera estadísticamente significativa. Así también, refiere que Clark y Acero (2006) concluyen que el análisis de varianza se puede utilizar para reconocer diferentes poblaciones estadísticas de estratos. Cada población estadística corresponde a un diferente sub-ambiente y a su desarrollo temporal.

Chen y Hiscott (1999, 2004) se inclinaron por la estadística de Hurst (Hurst, 1951) o análisis de Hurst (Feder 1988; Plotnick y Presteggaard, 1995) como una metodología para distinguir los sub-ambientes. Estos autores documentan que 84.2 % (16 de 19 secciones) de las turbiditas analizadas presentan el fenómeno de Hurst, es decir, agrupación irregular a largo plazo de valores altos y bajos de las tres variables medidas. Esta agrupación se relaciona con los cambios estratigráficos de las facies sedimentarias causadas por el desplazamiento lateral de los sub-ambientes sobre una superficie de abanico submarino. No hay evidencia de que la agrupación está controlada por las fluctuaciones del nivel del mar. La fuerza de las agrupaciones, inferidas desde los valores  $K$  de Hurst, son un índice para distinguir sub-ambientes. La interpretación de sus resultados sugiere que los depósitos de canal tienden a tener una fuerte agrupación, depósitos lóbulo interno a medio tienden a mostrar la agrupación moderada, mientras que en el piso de cuenca, los estratos de arena tienden a tener sistemas de agrupación débil. La combinación de las características de facies con resultados estadísticos



puede proporcionar criterios fiables para la identificación de sub-ambientes de abanico submarino. Chen y Hiscott, (2004) refieren que para probar estadísticamente y evaluar la importancia de las tendencias al aumento asimétrico (engrosamiento y adelgazamiento y otros patrones cíclicos en la sucesión de turbiditas), utilizaron 28 secciones con una amplia cobertura en el tiempo geológico, donde se describen y miden la configuración de la cuenca, características tectónicas, facies y ambientes depositacionales. Los 286 paquetes de areniscas seleccionados fueron examinados por tres pruebas de correlación de gran alcance (Kendall, de Spearman, y las pruebas de correlación de Pearson) y cuatro pruebas de aleatoriedad. Sólo 34 (11.9 %) de los paquetes de arenisca pasaron las pruebas diseñadas para identificar la asimetría en el nivel de significación del 10%.

Más tarde, Felletti y Bersezio (2010) utilizan esta metodología con 13 500 espesores y tamaños de grano en un sistema de turbiditas bien conocido. La prueba de Hurst aplicada en áreas del depocentro y marginales a través de la cuenca (paralela y perpendicular a la dirección principal de paleocorrientes), mide el grado de agrupamiento de valores altos y bajos (tendencias asimétricas de engrosamiento y adelgazamiento) de espesores, y de la relación arena / lutita, y es capaz de distinguir entre la configuración del lóbulo proximal y distal (depocentral), y reconocer a lóbulos depositacionales diferentes (por agradación totalmente confinada, progradación, “backstepping”). Finalmente, mediante la interpolación del índice de Hurst, es obtenido un mapa de sub-ambientes de turbiditas que es comparable con el mapa las facies de campo observadas.

### 1.6 Metodología

La secuencia general de actividades para el desarrollo de este trabajo (Fig. 1.1), está dada por el siguiente diagrama de flujo:

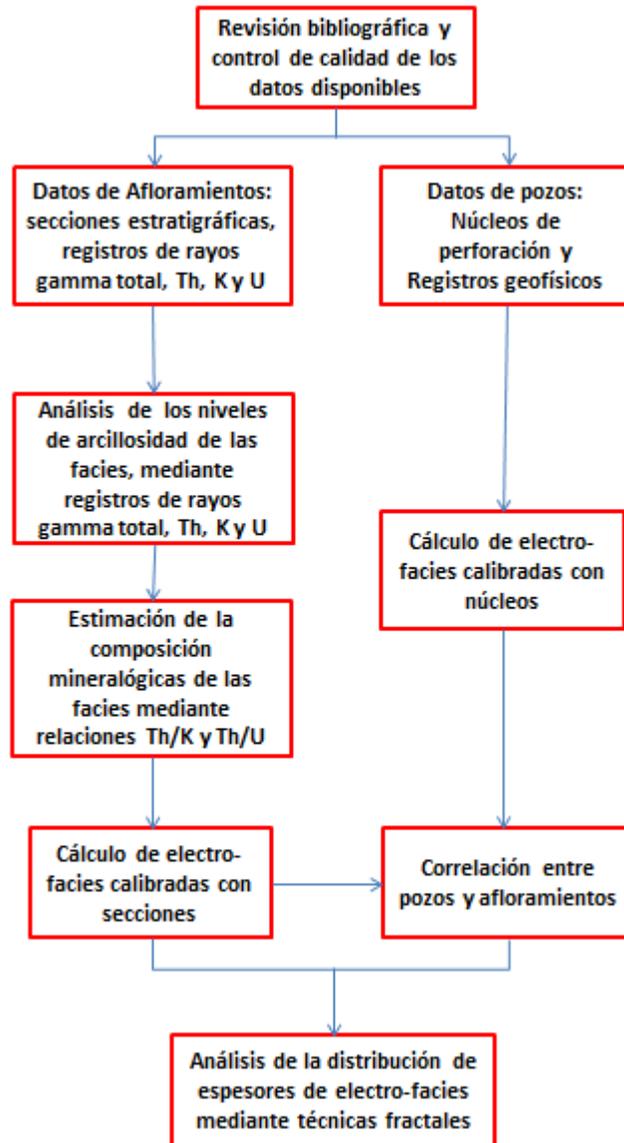


Fig. 1.1 Diagrama de flujo de la metodología seguida en la caracterización de las facies de la Fm. Chicontepec.

A continuación se describen las actividades del diagrama de flujo:

➤ ***Investigación de metodologías aplicables al caso de estudio:*** Como primer punto se realizó una revisión bibliográfica en busca de metodologías fractales aplicables al caso de estudio, así como de las que son recomendadas para el análisis de facies mediante espectrometría de rayos gamma. En la revisión de trabajos dedicados al análisis fractal de las distribuciones de facies turbidíticas, se resolvió trabajar con las técnicas reportadas por Chen y Hiscott (1999), ya que fueron las que mejor se adaptaron a este trabajo. También se revisaron las metodologías reportadas para la caracterización convencional de facies mediante registros de rayos gamma y el conjunto de datos disponibles para este trabajo (datos de pozo y de secciones medidas en afloramientos).

➤ ***Análisis de los niveles de arcillosidad mediante los registros de rayos gamma de las secciones medidas en afloramiento:*** El análisis de datos de radioactividad se realizó con el objetivo de generar un mejor entendimiento de las facies de la Fm. Chicontepec. Se realizaron distintas adquisiciones de datos de radioactividad natural en afloramientos análogos al campo de estudio, en las que se diseñaron tres secciones denominadas CH05, CH03 y CH06. Para el diseño de estas secciones se tomaron datos preliminares en distintas litologías y se probaron distintos tiempos de muestreo del equipo de prospección (RS-230). Los datos recopilados en campo fueron analizados y descritos de acuerdo con las metodologías convencionales de procesamiento de datos de rayos gamma. En esta etapa se determinaron los rangos en los que varían los valores de radioactividad total, Torio, Potasio y Uranio de las tres secciones.

➤ ***Estimación de la composición mineralógica de las secciones medidas en afloramientos:*** Con los valores de Torio, Potasio y Uranio se realizó un análisis de las relaciones Th/K y Th/U para inferir la composición mineralógica y los ambientes de depósito de las facies de las secciones. La relación Th/K se analizó a través de gráficos cruzados (“cross-plots”). Y con el fin de observar la distribución de valores a lo largo de las secciones, se elaboraron gráficas que relacionan los valores de la relación Th/K y Th/U con el espesor medido en cada sección. En estas gráficas se describieron las variaciones de radioactividad que causaban que los puntos ocurrieran en ciertas regiones mineralógicas y si existían intervalos definidos en alguna de

estas regiones. Finalmente, se utilizó la relación Th/U para observar la presencia de intervalos, que se encontraran definidos en ambientes de depósito de oxidación o reducción.

➤ ***Cálculo de electro-facies en pozos y secciones:*** Con los registros de rayos gamma de las secciones y pozos de perforación se calcularon electro-facies, las adquiridas en los pozos de perforación se computaron inicialmente mediante la asignación de rangos del registro de rayos gamma total, apoyados en la interpretación de los registros de densidad (RHOB) y sísmico (DT). Estos rangos fueron calibrados con núcleos del pozo Coyotes 318. Posteriormente se calcularon electro-facies con rangos calibrados en las secciones de afloramientos y finalmente, estos rangos fueron aplicados en los pozos del Campo Coyotes.

➤ ***Correlación entre pozos y secciones:*** La correlación entre ambos conjuntos de datos, se estableció comparando las electro-facies calculadas con los rangos calibrados con núcleos del pozo Coyotes 318 y las calibradas con secciones. Los rangos calibrados en pozo se aplicaron a todos los pozos y a las secciones. Posteriormente, los rangos calibrados con secciones también se aplicaron en pozos y secciones. Finalmente se describieron los niveles de arcillosidad que presentaban las electro-facies resultantes de los tres rangos utilizados.

➤ ***Calculo de parámetros fractales:*** Por otro lado, con las electro-facies obtenidas en los pozos, se calcularon los espesores de areniscas, areniscas arcillosas y lutitas. Estos valores sirvieron de dato de entrada en el análisis fractal, el cual consistió en obtener el índice de Hurst y gráficas “Hurst Test” (datos que permiten observar si la distribución es antipersistente, persistente o aleatoria) descritas en los trabajos de Chen y Hiscott (1999). El cálculo de los parámetros estadísticos y fractales se llevó a cabo a través de a las relaciones descritas en el marco teórico. Dicho análisis sirvió para determinar si la distribución vertical de los estratos tenía un comportamiento aleatorio y si dentro de la secuencias de espesores, se enmascaraba algún tipo de distribución, que pudiera ser observada en varios pozos.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Espectrometría de rayos gamma**

#### **2.1.1 Conceptos generales**

El decaimiento radioactivo de un átomo ocurre cuando el núclido (combinación de protones y electrones en estado excitado) libera cantidades moderadas de energía. Este proceso es un tipo de radioactividad natural en el que son liberadas partículas alpha ( $\alpha$ ), betha ( $\beta$ ) y gamma ( $\gamma$ ), el cuál ocurre cuando el átomo de ciertos isótopos alcanza altos niveles de energía, que al ser liberada se transforman en otros isótopos (Bassiouni, 1994).

Las partículas alpha ( $\alpha$ ), consisten de 2 protones y 2 neutrones, son emitidas en rangos de entre 4 y 5 MeV. Son idénticas al núcleo de un átomo de Helio y tienen bajo potencial de penetración ya que su masa es considerable y su carga es positiva (Bassiouni, 1994).

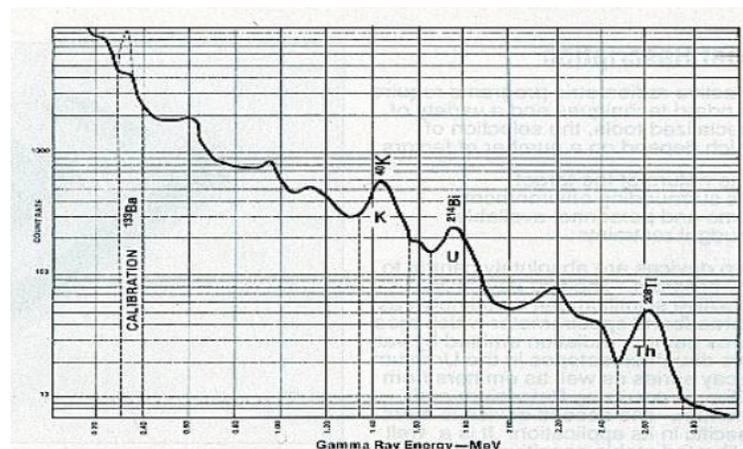
Las partículas betha ( $\beta$ ) son originadas cuando en la transformación del neutrón del átomo, se expulsan un electrón ( $e^-$ ), un protón ( $p^+$ ) y un neutrino ( $\nu$ ) con alta energía; su penetración es mayor que las partículas alpha ( $\alpha$ ) y su energía se encuentra en el rango de 0.016 a 3.65 MeV (Bassiouni, 1994).

Los rayos gamma ( $\gamma$ ) son descritos como paquetes de energía o fotones, se encuentran dentro de las frecuencias altas del espectro electromagnético; su energía es del orden de 0.01 a 10 MeV, tienen alta penetración debido a su corta longitud de onda. Los rayos gamma interactúan con la materia a través de tres procesos: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y producción de pares. El efecto fotoeléctrico se presenta cuando un fotón colisiona con un átomo, esto ocasiona la transmisión de energía hacia los electrones de enlaces con otros átomos y moléculas de la materia, los electrones expulsados conservan parte de su energía y son absorbidos por otros átomos del medio, este efecto predomina en energías bajas de  $<200\text{keV}$ . En el efecto Compton, una parte de la energía es consumida por la expulsión de los electrones y los fotones gamma remanentes de menor energía son esparcidos por los electrones, este proceso depende principalmente de la densidad de los electrones y predomina

en energías intermedias de rayos gamma (100 keV – 2 MeV). En la producción de pares los rayos gamma son eliminados en la producción de un electrón y un positrón, el proceso requiere 1.02 MeV (Sheriff, 1989).

### 2.1.2 Respuesta del registro de rayos gamma

El registro geofísico de rayos gamma (RG), es la representación digital o analógica de la radioactividad natural emitida por los minerales constituyentes de las rocas. Las herramientas de medición responden a la radiación gamma originada por el decaimiento de los elementos Torio (Th), Uranio (U) e isótopos de Potasio (K). En el proceso de decaimiento radioactivo, el Th-232 se vuelve estable pasando por varios niveles de energía (2.45-2.79 MeV) y transformándose en otros isótopos hasta convertirse en Pb-208, lo que se conoce como serie del torio. En la serie del uranio, U-238 se vuelve estable hasta llegar al isótopo Pb-206, emitiendo energías de 1.65 a 1.87 MeV. En lo que respecta al isótopo de Potasio (K 40), el decaimiento se da en un solo nivel de energía, volviéndose estable al pasar al Ar-40 y emitiendo rayos gamma con una energía de 1.46 MeV (**Fig. 2.1**).



*Fig. 2.1. Niveles de energía del Th, U y K.*

Estos niveles de energía son característicos de cada isótopo emisor y aunque no son los únicos picos presentes en el espectro de la radiación gamma natural emitida por las rocas, si son los



más utilizados en los estudios de espectrometría de rayos gamma. La intensidad de radiación total es una medida del número de fotones detectado por el espectrómetro en un segundo (cuentas por segundo, cps), esta energía es dividida en ventanas que procesan e identifican al Uranio, Torio y Potasio por separado (Postma y Ten Veen, 1999).

Estos elementos existen en los minerales que componen principalmente a las rocas arcillosas y sedimentos finos. En promedio las lutitas contienen 3 % de Potasio, 6 ppm de Uranio y 20 ppm de Torio (Bassiouni, 1994). El material radioactivo contenido en las rocas ígneas es distribuido en formaciones sedimentarias durante los procesos de erosión, transporte y depositación, y tiende a concentrarse en minerales arcillosos. El elemento radioactivo más abundante es el Potasio. Para las areniscas y los carbonatos, los ambientes de depósito y la composición química que prevalecen durante la depositación, no favorecen la acumulación de minerales radioactivos, por lo que existen en menores cantidades en este tipo de rocas.

El registro de rayos gamma espectral, se representa con trazas o curvas que se obtienen de las contribuciones de radioactividad individuales de U, Th y K, o bien por la suma de las tres (rayos gamma total). La determinación del contenido de arcillas con el registro de rayos gamma total, asume que todos los minerales radioactivos están asociados con los minerales arcillosos. Sin embargo, esta idea puede llevar a malas interpretaciones, ya que una alta radioactividad no siempre está asociada a esto; puede existir contaminación radioactiva, como por ejemplo la de cenizas volcánicas, lixiviado de granitos o por sales disueltas en el agua de formación de algunas rocas (areniscas con sales de Torio o Uranio). Si esto puede ser identificado, la exclusión de la curva de U permite evaluar con mayor certeza el contenido de arcillas (Bassiouni, 1994).

### ***2.1.3 Errores de Medición***

Existen tres principales tipos de errores que se pueden presentar al momento de medir las emisiones de rayos gamma en las rocas:

#### ***a) Geométricos***

La geometría es un factor importante que debe considerarse. De acuerdo con las características de cada equipo, se detectan rayos gamma dentro de un radio que depende de la sensibilidad del detector. El detector registra un espacio semi-infinito de material uniforme. Así, si las rocas dentro de esta zona son totalmente homogéneas, el resultado del ensayo se aproximará a la de análisis químico. Sin embargo, en el campo es difícil asegurar estas condiciones. Por lo tanto, para mediciones cercanas a los límites de alta y baja radiación, se recibirán una mezcla de los recuentos totales. Por otra parte, también se pueden generar errores si la morfología de la superficie en el punto de medición, no es perfectamente plana o si se toman mediciones cerca de los acantilados, cornisas, trincheras, etc. (Postma y Ten Ven 1999).

#### ***b) Estadísticos***

La radiación es errática por naturaleza, por lo que el flujo de rayos gamma recibido por el detector no es continuo. Para obtener una tasa de conteo confiable, el instrumento de medición registra el número total de emisiones durante un período determinado. Las divergencias en las tasas de conteo entre un periodo y otro, se denominan variaciones estadísticas (Cassidy, 1981). En equipos en los que el periodo de conteo es corto, es necesario tomar varias lecturas y promediarlas omitiendo los valores máximos y mínimos. Postma y Ten Ven (1999), validaron su metodología al duplicar una sección en donde se tomaron 7 lecturas por punto con periodos de conteo de 10 segundos, promediaron 5 valores eliminando los valores máximo y mínimo con buenos resultados. Sin embargo, el desarrollo de nuevos dispositivos de medición permite utilizar diferentes periodos de tiempo, en los que las cuentas se promedian automáticamente, en los periodos más largos el error estadístico se reduce. Para el equipo utilizado en este trabajo, se asumen que si los parámetros de calibración son correctos, entonces la exactitud de una lectura está estrictamente relacionada con el ruido estadístico de las cuentas totales, así que si contamos el tiempo suficiente, podemos llegar a cualquier grado

de precisión y exactitud. Los periodos de tiempo estándares para adaptarse a todas las condiciones de campo, son 300 segundos (5 minutos). Aunque para prospecciones rápidas este período se considera excesivo.

*c) Otros*

Otros errores de medición pueden deberse a la variación en el grado de erosión de la superficie a medir (*e. g.*, en diaclasas o fisuras), a lixiviación de K y U o al contenido de humedad o rocas en desequilibrio secular radiactivo (Levinson y Coetzee, 1978).

#### ***2.1.4 Identificación de minerales arcillosos y ambientes de depósito mediante***

##### ***“cros-plots”***

##### ***2.1.4.1 Relación Th/K***

El análisis de las fuentes de la radiación gamma naturales pueden proporcionar información sobre la composición y la litología de una formación. En particular, las cantidades de Torio (Th, ppm) y Potasio (K, %) son utilizadas para identificar los tipos de arcilla (**Fig. 2.2**). El Torio en rocas sedimentarias se asocia principalmente con los aluminosilicatos, por lo que la curva de registro de Torio es un buen indicador del volumen de minerales de arcilla en las secciones que son medidas (Hassan *et al.*, 1976). Así también, la relación de Torio / Potasio (Th / K) es un índice de la riqueza relativa de Potasio y es utilizada para distinguir entre tipos de minerales radiactivos como un indicador general de facies (Doveton, 2010). En la mayoría de los estudios se ha reportado que una relación de  $Th / K > 12$  se asocian con arcillas caoliníticas y una relación de  $Th / K > 3,5$  (ppm/%) corresponde a illita (arcilla feldespática).

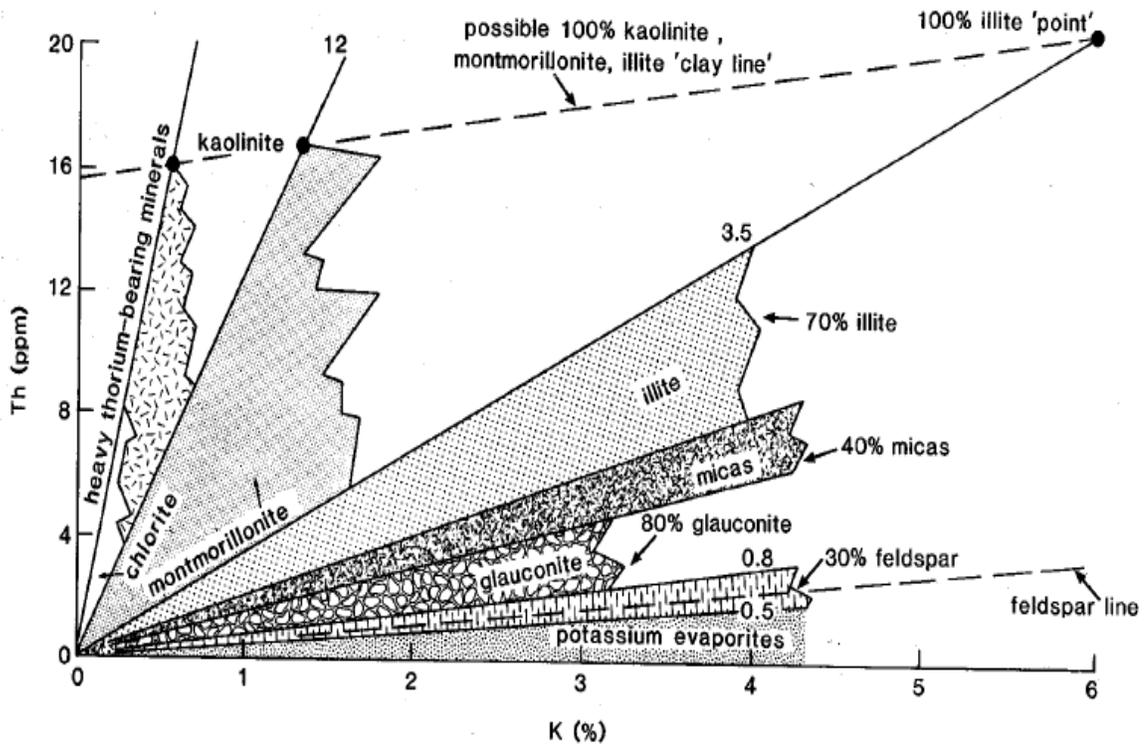


Fig. 2.2 "Cross-plot" Th/K para la identificación de minerales utilizando datos de espectroscopia de rayos gamma

La caolinita es un mineral arcilloso del grupo de aluminosilicatos hidratados. Generalmente es de color blanco, pero también se presenta en colores naranja o rojo, debido a la oxidación del hierro. Se produce por la meteorización química de los feldespatos (químicamente maduro) en los climas tropicales (cálidos húmedos). En los procesos intensos de erosión, el Potasio que es más móvil se desgasta y se lixivias, por lo que los valores de la relación Th/K se vuelven más altos. La caolinización está asociada a la exposición subaérea y la formación de paleosuelos (Ehrenberg, 1991). Estos a su vez se relacionan con las variaciones del nivel medio del mar, y por ende, con los tipos de ambientes de depósito (marino y continental). Las relaciones  $Th/K > 12$  (ppm/%) pueden ser correlacionadas con límites de secuencia. Una secuencia granodecreciente debe seguir el pico de Th/K y debe coincidir con un cambio abrupto en la porosidad y densidad y un decremento en los rayos gamma.

Para la interpretación de zonas caoliníticas (con valores mayores a 12 ppm/%) se debe tener en cuenta los procesos que no implican exposición subaérea y en los que la relación Th/K resultaría en un pico alto. Como en el caso de la lixiviación del Potasio, que puede ocurrir en el subsuelo (< 1km) si el agua subterránea es ácida, o de la caolinización que no sucede por la lixiviación de Potasio, sino por la migración de los hidrocarburos y la liberación de ácidos térmicos del kerógeno. En general, los picos que se atribuyan a caolinitas deben ser por procesos causantes del agotamiento de Potasio en lugar de un aumento del Torio (Ehrenberg, 1991).

Por otra parte, las proporciones entre el Torio y el Potasio pueden ayudar a reconocer lecturas altas que no correspondan a lutitas. El registro de rayos gamma total tomado en areniscas, en ocasiones presenta lecturas altas que pueden confundirse con lutitas. Tal es el caso de areniscas que pueden contener feldespatos potásicos, micas, glauconita, minerales pesados ó minerales de Uranio. En general, las areniscas radiactivas pueden ser de los siguientes tipos (Glover, 2000):

***Areniscas arcillosas:*** Ciertas cantidades de arcilla están presentes en la roca.

***Areniscas arcosas:*** Contienen feldespatos que tienen altos contenidos de Potasio, pero bajos de Torio. La relación Th / K por lo tanto, será bajo (<1 ppm /%).

***Areniscas micáceas:*** Contienen micas con composiciones de Potasio inferiores a los feldespatos, y contenidos de Torio más alto. La relación Th/K es por lo general entre 1.5 y 2.5 (ppm /%).

***Grauvacas:*** Contienen feldespatos y micas, la relación de Th/K oscilan entre el 1 y 2.5 (ppm/%).

***Arenas con glauconita:*** Mineral del grupo de las micas que contiene Hierro, Magnesio y Potasio, la relación Th / K suele variar entre 1 y 1.5 (ppm /%).

***Arenisca con minerales pesados:*** Los minerales pesados a menudo son abundantes, las relaciones de Th /K (alrededor de 25 ppm /%) son altas en areniscas que contienen Potasio asociado feldespatos, micas o glauconita.

#### *2.1.4.2 Relación Th/U*

La aplicación de la relación de Th/U es útil en el reconocimiento de los paleoambientes sedimentarios, tipo de roca, mineralogía, procesos de oxidación e intemperismo y en la ubicación de zonas dentro de la cuenca sedimentaria, donde ocurrió el depósito de las unidades geológicas analizadas (Adams y Weaver, 1958; Selley, 1974).

Su utilidad como indicativo de condiciones oxidantes o reductoras, se ha demostrado en base a análisis de numerosas muestras de roca, donde las relaciones  $< 2$  son altamente indicadoras de enriquecimiento de Uranio, y por ende, de la reducción de las condiciones. En contraste, las relaciones  $> 7$  indican la eliminación preferencial de Uranio. La permanencia del Torio se debe a que este tiene sólo un estado de valencia que es insoluble; el Uranio tiene dos de los cuales el menor es también insoluble, pero cuanto más alto es, también puede ser retirado en la solución. La oxidación es el mecanismo más importante por el que se produce la separación entre valores de Torio y Uranio. Las separaciones marcadas se deben a que el Uranio al ser oxidado se convierte a su forma soluble y es fácilmente lixiviado. Mientras que el Torio no tiene un estado soluble en condiciones de superficie o cercanas a ella (Adams y Weaver, 1958; Glover, 2000). El Uranio y el Torio pueden estar presentes en detritos de minerales pesados como zircón y monazita, en detritos de minerales precipitados en agua marina como la calcita, absorbido en hierro, óxidos e hidróxidos de aluminio, minerales arcillosos o materia orgánica y posiblemente absorbidos sobre las superficies de carbonatos y otros minerales (Glover, 2000).

Las rocas sedimentarias contienen mayores cantidades de Torio y Uranio en comparación con las rocas ígneas. Las rocas sedimentarias antiguas que conservan el Uranio deben estar bien consolidadas, poco erosionadas y no tener grandes cantidades de agua en los poros que pueda disolver el oxígeno. Así, también es posible diferenciar entre rocas volcánicas y plutónicas que han sido convertidas en sedimentos (Th/U alto), de aquellas que nunca han sido oxidadas (Th/U bajo) (Adams y Weaver, 1958).

### ***2.1.5 Presencia de Torio y Uranio en rocas sedimentarias***

La presencia de Torio y Uranio en rocas sedimentarias de acuerdo a los estudios de Adams y Weaver (1958) se atribuye a las siguientes razones:

#### **➤ *Calizas y Dolomitas***

Ya que gran parte de estas rocas son derivadas de material que estuvo en solución de agua marina, el 80 % de Uranio en las calizas ha sido fijado en los ácidos solubles de los minerales del carbonato por oclusión o coprecipitación. El otro 20 % ocurre en los detritos más resistentes a la disolución y la porción de ácidos insolubles. La illita y la montmorolinita son los minerales arcillosos más comunes en las calizas. Los altos valores disueltos de Uranio en la caolinita indican que el Uranio está asociado con hierro y óxidos de aluminio. El contenido de Torio en las calizas se encuentra asociado a los ácidos insolubles y los minerales resistentes (zircón y monazita). Las relaciones de Th/U altas para rocas carbonatadas se encuentran en un rango de 2 a 3. En los detritos de las rocas carbonatadas el Uranio tiene un promedio de 1.8 ppm y la relación de Th/U es de alrededor de 0.1 o menor.

#### **➤ *Lutitas, Lateritas, Arcillas Residuales y Bauxita***

El contenido de Uranio en clastos de grano fino se contempla en los dos tipos de condiciones (reducción y oxidación):

Las rocas generadas en ambientes de oxidación pueden ser bauxitas, lateritas y arcillas residuales. Su contenido de Torio es alto y el de Uranio va de 1 a 10 ppm; su relación Th/U es alrededor de 20.

Las rocas generadas en ambientes de reducción son lutitas marinas negras. Su contenido de Uranio va de 10 a 100 ppm y su relación Th/U es alrededor de 2. El contenido de Torio en estas lutitas es el mismo que en las lutitas comunes grises y verdes. Las lutitas verdes y grises en promedio contienen  $3.7 \pm 0.5$  ppm de Uranio,  $12 \pm 1$  ppm de Torio y su relación Th/U es de  $3.8 \pm 1.1$ .

El material residual arcilloso depositado bajo condiciones marinas tienen altos contenidos de Uranio (alrededor de 9.5 ppm) ya que tienen mayor oportunidad de extraerlo y fijarlo (en hierro y óxidos de aluminio). La relación Th/U es baja, alrededor de 1 ppm.

Las bauxitas son generadas por meteorización de rocas ígneas o carbonatadas y en general de la alteración de los aluminosilicatos que constituyen la mayoría de las rocas y de los sedimentos. Sus relaciones Th/U son 3 o 4 veces más altas que las relaciones de sus rocas originarias.

Las lateritas resultan de la meteorización de rocas graníticas, son frecuentemente generadas en climas tropicales y subtropicales húmedos, donde la meteorización química es intensa. Son ricas en óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, su relación Th/U es baja.

#### ➤ *Areniscas*

Desde el punto de vista de la cantidad de matriz de las areniscas se dividen en grauvacas y ortocuarcitas:

Las grauvacas tienen un elevado porcentaje de matriz y están compuestas por material erosionado y depositado relativamente rápido. Sus relaciones Th/U serán muy cercanas a las de las rocas ígneas de las que fueron erosionadas.

Las ortocuarcitas son producto del intemperismo y transporte, están formadas prácticamente de clastos de cuarzo con escasa matriz. Las relaciones Th/U son cercanas a las de las rocas ígneas con altas concentraciones de Torio (*e. g.*, areniscas de playa).

Los contenidos promedio de Torio en las areniscas son del orden de  $24 \pm 7$  ppm,  $4.5 \pm 1.5$  ppm de Uranio y las relaciones de Th/U estarán alrededor de 6, con un mínimo de 3 y un máximo de 11.5.

#### ➤ *Bentonitas*

Las bentonitas son arcillas de estructura laminar que pertenecen al grupo de los filosilicatos. La montmorillonita es un mineral muy común, también contienen en menores cantidades illita

y cuarzo. Se clasifican en sódicas (expansibles) y cálcicas (poco expansibles). Las bentonitas derivadas de ceniza volcánica contienen altas concentraciones de Torio y Uranio combinado con altos valores de Potasio. El valor promedio de la relación Th/U es de 5.8, el promedio de Uranio es de 24 ppm y el de Torio de 5 ppm. El contenido promedio de Torio es cerca del doble que las lutitas marinas normales o rocas ígneas.

### ***2.1.6 Criterios de determinación de ambientes de depósito mediante relaciones Th/U***

Adams y Weaver (1958), han establecido que los valores de las relaciones Th/U pueden permitir la determinación de tipos de ambientes de depósito y mecanismos de intemperismo en distintos tipos de rocas. Los valores de Th/U menores a 2 se deben a la fijación del Uranio sobre rocas sedimentarias depositadas en agua dulce o marina (*e.g.* lutitas marinas negras). Los valores mayores a 7 ocurren por la remoción y lixiviación del Uranio debido al intemperismo en arcillas continentales, lutitas rojas, arcillas residuales y suelos. Los valores intermedios entre 2 y 7 reflejan poco intemperismo y rápida depositación de detritos de rocas ígneas o capas mezcladas (illitas y montmorillonitas) (Moon y Chaudhuri, 1976). Muchas lutitas grises, verdes y grauvacas suceden en estos valores intermedios.

De acuerdo con Adams y Weaver (1958), algunos valores típicos de las relaciones Th/U son los siguientes:

***Lutitas grises marinas o compuestas de material poco erosionado:*** 13 ppm Th, 4 ppm U, 3.3 Th/U

***Lutitas carbonosas:*** son ligeramente más grises que las marinas, las condiciones de reducción favorecieron la acumulación de materia orgánica, sin embargo, se comportan prácticamente como las lutitas grises (13 ppm Torio, 4.2 ppm Uranio, 3 Th/U).

***Lutita arenosa:*** La relación Th/U es de 3.8, ligeramente más alto respecto a las lutitas carbonosas. Estos valores pueden ser debidos a una mayor cantidad de oxidación, aumento de

arena fina o de minerales pesados (zircón). La preservación de minerales pesados en areniscas se debe a que presentan una alta resistencia a la acción del clima, diagénesis y degradación.

**Caliza:** Las concentraciones de Th/U suelen ser bajas (menores a 0.5) ya que la porción soluble de Uranio fue extraída y fijada de los océanos y solo una pequeña porción insoluble está ligada a cuarzos, feldespatos y caolinita. Las calizas que contienen relaciones Th/U más altas (del orden de 2.5), pueden estar relacionadas con capas mezcladas de caolinita, illita y montmorillonita.

**Rocas ígneas:** Los valores promedios en las rocas ígneas son de  $13.5 \pm 0.5$  ppm de Torio y  $3.5 \pm 0.5$  de Uranio ( $\text{Th/U} = \pm 2.8$ ). El contenido de Torio y Uranio de algunos granitos proviene de los minerales intersticiales y fracturas o de accesorios minerales.

## ***2.2 Análisis de distribuciones de espesores de facies mediante técnica fractales***

### ***2.2.1 Conceptos generales***

El fractal es un objeto de estructura irregular y fragmentada (Mandelbrot, 1983) con propiedades específicas, cuya complejidad se deriva de su textura no homogénea y su importante rugosidad externa (Smith *et al.*, 1996). Este término es utilizado para describir la estructura irregular de algunos fenómenos y objetos naturales que las técnicas convencionales no lo permiten. La descripción de un fractal puede ser determinística o estadística, esta última se utiliza cuando hablamos de fractales aleatorios (Turner *et al.*, 1998). Una de las características de cualquier objeto fractal es su dimensión fractal, la cual mide su grado de irregularidad (Gumiel *et al.*, 1992).

Un conjunto natural reconocido como fractal (Paredes, 1995), tiene la característica principal de conservar las mismas relaciones geométricas o pautas espaciales al cambiar de escala, y existe un rango delimitado de escalas para el cual una parte del conjunto nos revela propiedades geométricas del conjunto total. Este rango de escalas de invariantes está acotado por una escala mínima (“inner-cutoff”) y otra máxima (“outer-cutoff”). Estos límites también

existen para un fractal estadístico (Pérez *et al.*, 2000). Una de las ventajas del análisis fractal aplicado a los sistemas naturales, es la posibilidad de extrapolar las propiedades del objeto conocidas a una escala dada, si su forma o las medidas de su complejidad son auto-similares o auto-afines (Carr, 1997).

### 2.2.2 Auto-similitud

El concepto central de la geometría fractal es el de auto-similitud. Para los fractales determinísticos, tales como la curva de Von Koch, se muestran estructuras repetidas a todas las escalas, de tal forma que una ampliación del objeto revela una estructura más fina y similar al todo. Esta propiedad intrínseca y genérica de los conjuntos fractales, se refiere tanto a una forma geométrica (similitud física), como a una forma estadística (similitud estadística). En esta última, los momentos estadísticos (media y desviación estándar entre otros) son similares e independientes del sub-muestreo o escala (Mandelbrot, 1983; Turner *et al.*, 1998).

Matemáticamente se dice que el conjunto **A** es auto-similar, si **A** es la unión de **N** distintas copias de sí mismo (no traslapadas), cada una de las cuales ha sido escalada con una proporción de  $r < 1$  en todas las coordenadas. Se dice que un objeto o señal es auto-similar, si bajo una transformación de los dos ejes **x**, **y**, la función  $y=s(x)$  que lo define, conserva su forma (Arizabalo *et al.*, 2006). En la construcción de un gráfico auto-similar, el objeto es remplazado por otro, generalmente más complejo pero que refleja perfectamente el original (Gumiel *et al.* 1992).

### 2.2.3 Auto-afinidad

El concepto de auto-afinidad fractal es especialmente útil cuando se analizan superficies rugosas, trazas o perfiles. Para los objetos auto-afines, las diferentes direcciones geométricas se escalan de distinto modo para preservar la forma o los momentos estadísticos (Carr, 1997), es decir, el factor de escala del eje **x** es diferente al del eje **y**. Los registros geofísicos y las

trazas sísmicas son considerados conjuntos auto-afines y pueden ser analizadas mediante técnicas fractales estadísticas (Arizabalo *et al.*, 2006; Hewett, 1986).

El análisis fractal se basa en la comprobación del carácter auto-semejante o auto-afín del conjunto, ya que de ello dependerá la técnica de medida empleada. Un conjunto es auto-semejante si su estructura geométrica en una escala determinada es invariante al cambio de escala, independiente del cambio realizado. La auto-afinidad es la propiedad según la cual, un conjunto bajo una transformación afín (traslación y/o rotación), sus coordenadas permanecen invariantes al cambio de escala con un diferente factor de escalado (Pérez-López *et al.*, 2000).

#### ***2.2.4 Dimensión Fractal***

Felix Hausdorf (1869-1942), define a la dimensión para un conjunto de datos fractal, como una fracción mayor que la dimensión topológica correspondiente (Turner *et al.*, 1998). Una distribución es fractal cuando un número de objetos  $N$ , con una dimensión lineal característica  $r$  (tamaño, espesor, desplazamiento, etc.) satisface la siguiente relación:

$$N(r)=C/r^D \quad (1)$$

donde:  $C$  es una constante de proporcionalidad y  $D$  es la dimensión fractal (Turcotte, 1997). De la ecuación anterior:

$$N(r)=Cr^{-D} \quad (2)$$

por logaritmos:

$$\log N(r)=\log C - D \log r$$

donde:

$$D=(\log N(r)-\log C) / \log (1/r) \quad (3)$$

El comportamiento fractal puede ser determinado por una ley de potencias cuya estructura se refleja en la ecuación 2. La variable  $r$  corresponde a la escala y  $N(r)$  al número de objetos que cumplen esta ecuación para esa escala. En una ley de potencia, una de las cantidades representa la frecuencia de un evento, y la otra el tamaño del evento. En estas relaciones se

observa que las frecuencias de ocurrencia de un evento lineal, disminuyen muy lentamente conforme los tamaños del evento aumentan. Las leyes de potencia reflejan un patrón de organización y cambio que es típico de los sistemas complejos. Su expresión gráfica es diferente de lo que reflejan los métodos de distribución estadística normal o gaussiana. Esto es debido a la interdependencia entre los elementos. Una ley de potencias se representa en un gráfico bilogarítmico, donde se ajusta a una recta a un conjunto de puntos, cuya pendiente es el valor del exponente **D** (Pérez-López *et al.*, 2000; Xu y Burton, 1999).

En sentido genérico, la dimensión fractal **D** es un número que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico, objeto u objetos naturales (Gumiel *et al.* 1992).

### 2.2.5 Exponente de Hurst

El exponente de Hurst (**H**), es un parámetro que refleja la persistencia o interdependencia de datos o flujo de sucesos dentro de una secuencia de tiempo, y también es interpretado como una medida de la rugosidad del fractal (Miranda, 2006). El exponente de Hurst puede ser extraído de la secuencia de variación de cada registro. Una técnica estadística utilizada para encontrar este parámetro es el análisis rango rescalado (**R/S**). El procedimiento envuelve el cálculo del rango (**R**) de un registro de datos sobre un intervalo de tiempo (**T**). Este es entonces escalado mediante la correspondiente desviación estándar (**S**) (Wang *et al.*, 1991):

$$\mathbf{R(T)/S(T)} \propto \mathbf{T^H} \quad (4)$$

A la relación anterior se le conoce como la ley de Hurst, donde el exponente (**H**) puede ser encontrado mediante un gráfico bilogarítmico  $\log(\mathbf{R/S})$  vs  $\log(\mathbf{T})$ . Esta técnica ha sido mostrada en mediciones estadísticas de series de tiempo donde existen fuertes periodicidades (Feder, 1988). El exponente de Hurst se encuentra en el rango de  $0 \leq \mathbf{H} \leq 1$  y para los casos en

que  $H \neq 1/2$ , los objetos son propiamente fraccionales; cuando  $H=1/2$  es el caso especial del Movimiento Browniano.

El análisis de series numéricas han aportado importantes conclusiones: a) para valores de  $H=0.5$ , se trata de una característica de independencia, b) Cuando  $H=1$  existe un proceso estacionario, c) para la mayoría de los casos en procesos físicos reales, los valores de  $H$  se encuentran entre 0.5 y 1, donde  $H$  describe la intensidad de dependencia a largo plazo o auto correlación de las series de tiempo. Del análisis de este parámetro se puede decir que:

- Cuando  $H=1/2$ , no hay correlación entre incrementos anteriores y el futuros, es un proceso aleatorio independiente que cae en el dominio Browniano.
- Si  $1/2 \leq H \leq 1$  la correlación es positiva. En escaso, si existe una tendencia creciente anterior se tendrá una misma tendencia futura. Si al contrario es decreciente en el pasado, será decreciente en el futuro. Se dice entonces que el proceso es persistente.
- Si  $0 \leq H \leq 1/2$  la correlación es negativa. Una tendencia de aumento en el pasado implica una tendencia de disminución el futuro y viceversa. El proceso es antipersistente (Restrepo, *et al.*, 2001).

### ***2.2.6. Discriminación de facies en ambientes turbidíticos mediante índices de Hurst***

La estadística de Hurst ha sido utilizada como herramienta para determinar el grado de agrupamiento de valores altos y bajos en espesores de capas o en tamaños de grano en secciones estratigráficas verticales. El método fue aplicado por primera vez por Chen y Hiscott (1999) y después por Mukhopadhyay *et al.* (2003), Felletti (2004) y Bersezio *et al.* (2005).

Para una sucesión de turbiditas, en donde los patrones de apilamiento y empaquetamiento no siguen una tendencia convencional que las diagnostique, las tendencias no aleatorias de espesores de capas (o tamaño de grano) pueden existir en términos de fluctuaciones

pronunciadas o agrupaciones (“clustering”) de capas gruesas o delgadas. Hurts (1951), derivó la siguiente relación para **K**, como un estimador del exponente de Hurst:

$$\mathbf{K} = \frac{\log (\mathbf{R} / \mathbf{S})}{\log (\mathbf{N} / 2)} \quad (5)$$

Dónde:

**R** es el máximo rango de las diferencias acumuladas desde la media de las **N** observaciones y **S** es la desviación estándar.

Para calcular **K**, de una serie de **N** observaciones, cada medición es despojada de su unidad (cm en el caso de espesores) y remplazada por su logaritmo base 10. La media y la desviación estándar son calculadas desde la transformación logarítmica de los valores. **R** es medida directamente del gráfico del número de capas contra las diferencias acumuladas desde la media (**Fig. 2.3**). Los valores de **N**, **R** y **S** son sustituidos directamente en la ecuación (5) (Felletti y Bersezio, 2010).

**K** es controlado principalmente por la magnitud de **R**. Este valor puede ser grande, si las diferencias acumuladas desde la media primero crecen sobre un largo rango de valores, (*e. g.*, en intervalos donde los espesores de las sucesiones sedimentarias sean mayores que la media) y después declinan sobre un número de datos igual de grande (*e. g.*, en espesores de capas que sean todos menores que la media). Hurst (1951), demostró que una secuencia natural de datos con  $N > 100$  tiene valores de **K** mayores a 0.5, y en contraste los procesos puramente aleatorios tienen valores cercanos a 0.5 (Felletti y Bersezio, 2010). Los espesores de las turbiditas utilizados son la suma de los espesores individuales en los que se encuentra presente la secuencia de Bouma, las secuencias clásicas encontradas en los estratos fueron Ta-e, Tb-e, Tc-e, Td-e. Algunas de las capas no gradan a lutitas, pero tienen contactos erosionales abruptos. Para asignar el tamaño de grano en cada espesor, se utilizaron pesos basados en la escala de phi ( $\phi$ ).

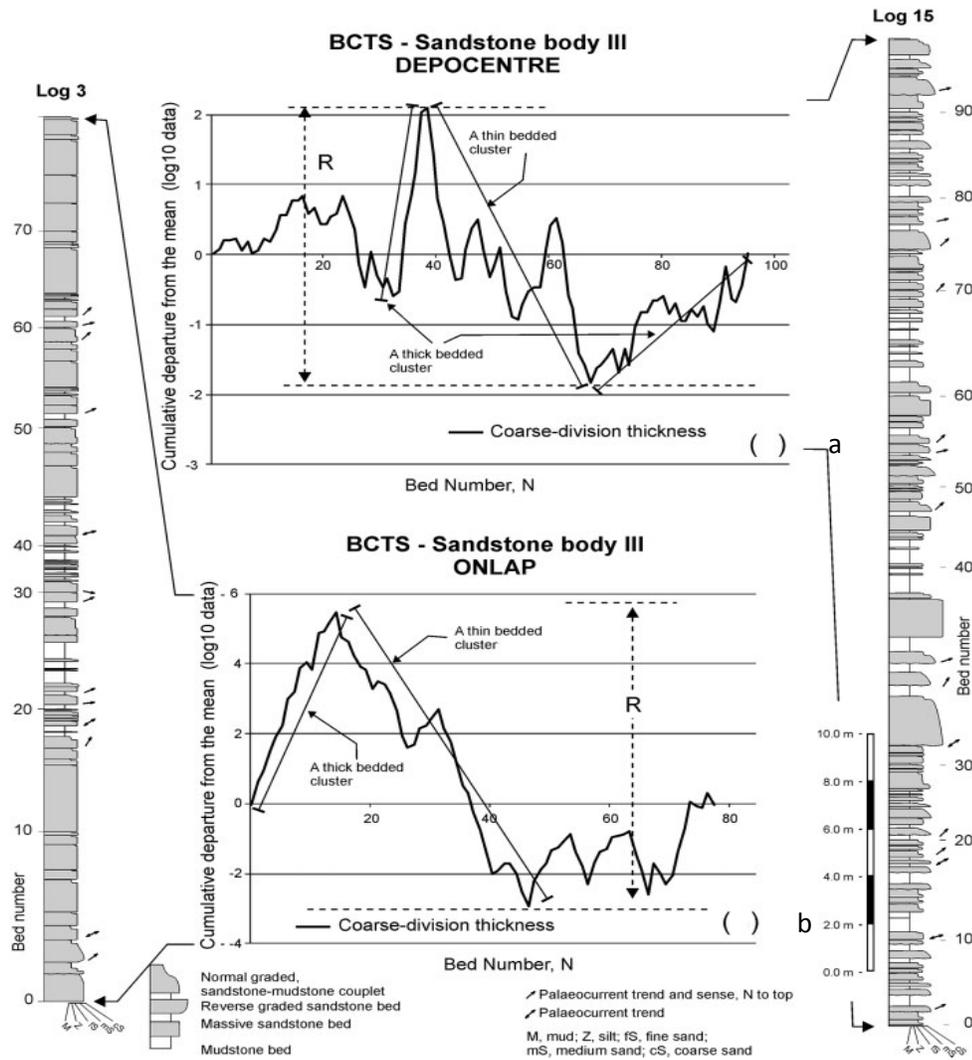
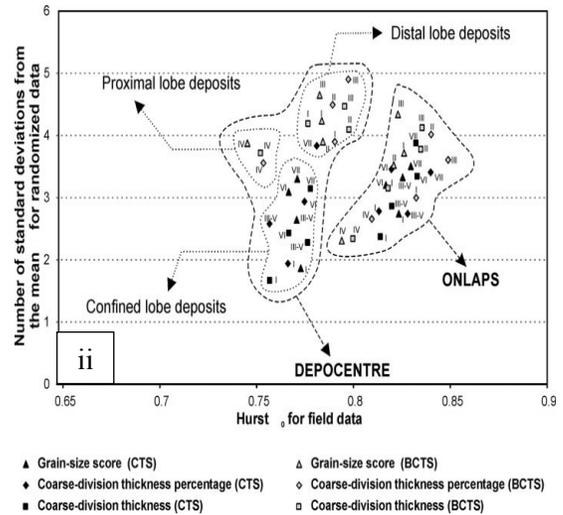
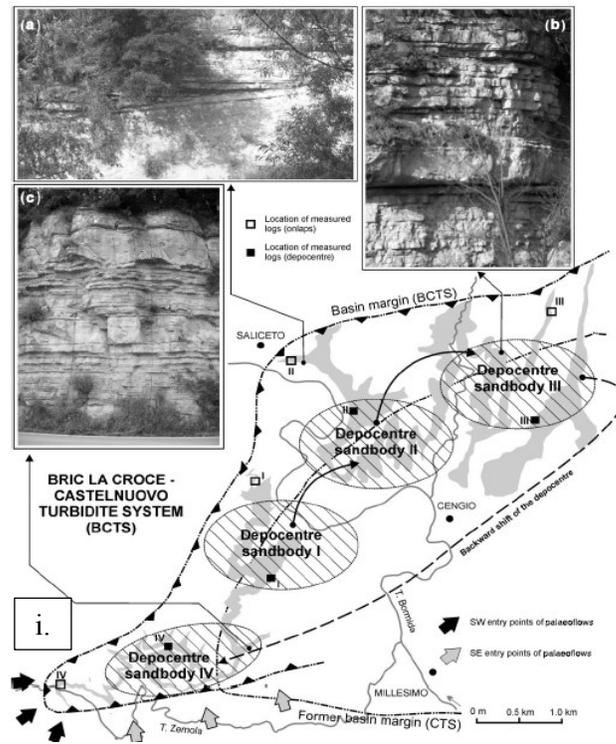


Fig. 2.3. Gráficos del número de espesores de capas  $N$  vs las diferencias acumuladas desde la media ( $\log_{10}$  de los valores, “cumulative departure from the mean”) de dos series de a) 98 y b) 78 espesores (arena y lutita, “coarse división thickness”) de turbiditas. Los espesores medidos en cm fueron usados para calcular las diferencias acumuladas desde la media y la desviación estándar del conjunto de datos. La figura muestra el agrupamiento de valores altos y bajos en un campo en donde están presentes ciclos irregulares. Donde  $R$  es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de las diferencias acumuladas. (Felleti y Bersezio, 2010).

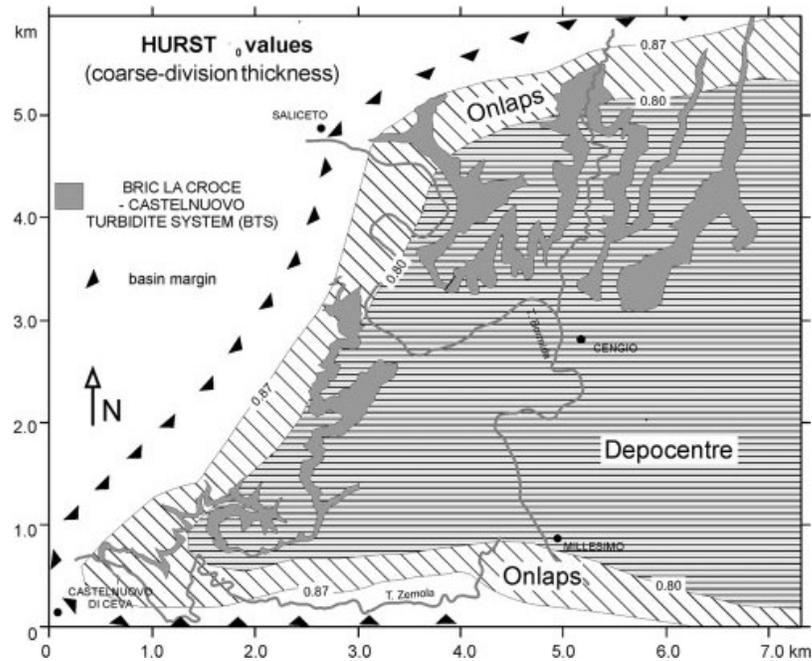
Para la discriminación de los sub-ambientes se graficaron los valores de Hurst contra su desviación estándar, encontrándose grupos que corresponden a distintos sub-ambientes de abanico (depósitos del lóbulo proximal, depósitos confinados, depósitos del lóbulo distal y depósitos de áreas de “onlap”) (Fig. 2.4). Finalmente, los valores de Hurst se interpolaron en

el área de estudio y se generaron mapas en donde se pueden discriminar los distintos sub-ambientes de depositación (**Fig. 2.5**).



ii) Gráfico de Hurts vs  $S$  para las tres variables analizadas. Espesor de turbiditas, tamaño de grano y relación arena/lutita. Las líneas discontinuas agrupan dos diferentes áreas de depositación: área depocentral y zonas marginales (onlaps) de cuerpos de areniscas. Los marcadores rellenos (negro) corresponden a los valores de Hurst en cada sección de la formación CTS, mientras que los no rellenos corresponden a la secciones de la formación BCTS.

**Fig. 2.4.** i) Mapa geológico con la localización de las secciones de la formación BCTS. a) Terminaciones onlap hacia el oeste de margen de cuenca, (b), (c) Dos cuerpos de areniscas (III y IV) de forma lenticular, caracterizadas por la presencia de estratos crecientes de areniscas, frecuentemente amalgamadas o separadas por intervalos delgados de lutitas (Felleti y Bersezio, 2010).



*Fig. 2.5. Interpolación de los valores  $H$  de Hurst de la formación BCT. El valor de corte de 0,8 se utiliza para separar dos diferentes subambientes: depocentro y onlap. Felletti y Bersezio (2010).*

Esta metodología fue probada por Felletti y Bersezio (2010), en una cuenca en donde se conoce bien la geometría, la ubicación del depocentro y las áreas marginales, también se conocen las tendencias de las paleocorrientes, que indican desde donde provienen los flujos. En dicho trabajo se tomaron en cuenta dos sistemas de turbiditas, uno depositado sobre el otro. En los datos analizados, 16 columnas litológicas representaran el centro y margen de cuenca. El número de arenisca y lutitas medidas en cada sección va de 22 a 360. El total de datos es de 13 500 espesores de capa y tamaños de grano.

## ***CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO***

### ***3.1 Introducción***

La cuenca terciaria de Chicontepec, es una provincia paleo sedimentaria considerada económicamente estratégica por su potencial petrolero. La Formación Chicontepec presente dentro de esta cuenca, ha sido descrita por Nájera (1952) y López- Ramos (1979) como una secuencia tipo “flysh” de alrededor de 1500 m de espesor, constituidas principalmente por una alternancia de lutitas interestratificadas con delgadas capas de terrígenos calcáreos provenientes de la Sierra Madre Oriental y capas de areniscas siliciclásticas de grano fino a medio que gradúan estratigráficamente a sedimentos más finos como arcillas y limolitas (Nájera, 1952; Benavides, 1956; Viniegra 1965; Barker y Berggren 1977). Esta unidad se ubica en la parte occidental de la mitad sur de la cuenca Tampico-Misantla, desde Tancanhuitz, S. L. P., hasta cerca de Teziutlán, Pue. Aflora al área del Río Platón Calabozo y parte del área del Río Cazones; asimismo, se reconoce en Coyutla y Sabaneta, Ver.; en la Hacienda Acmuxni, y aproximadamente a dos kilómetros de la margen noroeste del Río Tecotepec (Nájera, 1952).

La paleo cuenca de Chicontepec se originó en el Paleoceno-Eoceno, durante los levantamientos de la Sierra Madre Oriental (Orogenia Laramide) y su límite de secuencia corresponde con una discordancia sintectónica. La sedimentación del Paleógeno se compone de turbiditas de ambiente nerítico externo a batial, complejos de abanicos submarinos y una red de abundantes canales; el relleno sedimentario está constituido por arenas lenticulares con intercalaciones de lutitas. Durante éste período ocurrieron varios eventos de erosión y relleno de sedimentos clásticos, cuyos componentes son en gran medida fragmentos de carbonatos (Arellano y Yussmin, 2004).

La Formación Chicontepec está dividida en tres miembros: Chicontepec inferior y medio del Paleoceno superior y Chicontepec superior del Eoceno inferior. En algunas zonas descansa en forma discordante sobre la Formación Méndez del Cretácico Tardío y está cubierta a su vez por sedimentos arcillosos de las formaciones Aragón o Guayabal del Eoceno; en el sur de

México (Región de Macuspana, Tabasco y en el norte de Chiapas), yace generalmente en discordancia sobre la Caliza Cuayal del Cretácico y está cubierta por la lutita del Chinal. En el subsuelo se le ha identificado al poniente y extremo meridional de la Faja de Oro, y en Poza Rica, Ver., (López-Ramos, 1979).

### 3.2 Antecedentes

La Formación Chicontepec fue inicialmente estudiada por Cuminis (1908) en los alrededores del pueblo de Chicontepec, Ver., de donde toma este nombre. Dumble (1918), Belt (1925), Muir (1936) y Nájera (1952) refieren a esta formación como de edad Eoceno. En 1931, Nuttall la subdivide en los miembros superior, medio e inferior. Gamper (1977), le asigna del Paleoceno superior al Eoceno inferior. López-Ramos (1979) sitúa al miembro inferior en el Paleoceno superior y el medio y superior en el Eoceno inferior. Cantú-Chapa (1985) le asigna desde la parte alta del Paleoceno Inferior hasta el Eoceno Inferior (SGM, 2012).

Los trabajos iniciales consideraban a la Formación Chicontepec como facies de aguas someras equivalentes de la Formación Velasco, ya que la Chicontepec es mucho más arenosa y contiene abundantes fragmentos de plantas, restos maderáceos y fauna de aguas someras (Muir, 1936; Bitter, 1993). Sin embargo, los foraminíferos bentónicos de Chicontepec, indican depósitos en ambientes de aguas profundas, de “nerítico externo a batial superior” indicando que los fósiles de aguas someras fueron probablemente resedimentados dentro de aguas profundas (Busch *et. al.*, 1993). Así también, estos últimos autores describen los rasgos erosionales del paleo cañón de Chicontepec, y lo definen como un área erosionada por corrientes turbidíticas que se originaron en la parte alta de Jalapa y que fluyeron dirección oeste-noroeste durante el Paleoceno Superior o Eoceno Inferior. Carrillo (1980), sugiere que el paleocanal fue originado por flujos de corrientes densas provenientes del oriente, en ríos de la Sierra Madre Oriental; Cantú-Chapa (1985) interpreta que las corrientes submarinas que han erosionado el cañón provienen también del este y son más viejas que la Fm. Chicontepec. En los trabajos de Bitter (1993), la medición de paleocorrientes indica que al menos dos puntos alimentaron a la cuenca con sedimentos. Uno proveniente del noroccidente de la cuenca y el otro cercano al suroriente de la margen de la cuenca. Bitter (1993) sugiere que las

paleocorrientes inversas pudieron ser formadas por otro sistema de abanico. La posición de los afloramientos dentro del área de estudio, indican que las facies de lóbulo interno sobreyacen a las facies de lóbulo medio y externo, indicando una secuencia granocreciente resultado de la progradación hacia el nororiente.

Bitter (1993), propuso una caracterización sedimentológica y petrológica de la Formación Chicontepepec, en base a la descripción litológica de secciones en afloramientos y de muestras en láminas delgadas. Las facies descritas consisten de secuencias alternadas de areniscas de grano fino a medio de espesores desde 1 cm hasta 2.4 m y lutitas, muchos de los espesores descritos de areniscas están normalmente gradados con estructuras que generalmente siguen una progresión sistemática de capas planas cercanas a la base, con rizaduras y laminación cruzada gradando a sedimentos más finos (limos y arcillas) en la cima (secuencia de Bouma).

Este autor subdivide a las facies de la Formación Chicontepepec en cuatro tipos similares a las facies **A**, **C**, **D** y **F** descritas en los trabajos de Mutti y Ricci Lucchi en 1975. La facies **A** son canalizadas, constan de areniscas y conglomerados interpretados como parte del abanico interior o medio; la facies **C** corresponden a depósitos del lóbulo externo del abanico, consisten de areniscas de grano medio a grueso de alrededor de 2.5 m de espesor, intercaladas con capas finas de lutitas; la facies **D** corresponde a depósitos de lóbulo externo a margen del abanico, representados por areniscas de grano muy fino a medio de alrededor de 50 cm de espesor intercaladas con lutitas; la facies **F** corresponden a deslizamientos sindeposicionales y “slumps” de sedimentos similares a la facies **D**. La mayoría de las facies turbidíticas reconocidas en Chicontepepec, corresponden a depósitos no canalizados del lóbulo externo y margen de abanico. La escases de facies de abanico interno y medio en los afloramientos explorados se interpreta como resultado de la erosión durante el levantamiento de la Sierra Madre Oriental en el Paleoceno y Eoceno.

### 3.3 Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza en la localidad de Acatepec, Hgo., en el límite este de la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo dentro de la Cuenca de Chicontepec (**Fig. 3.1**).

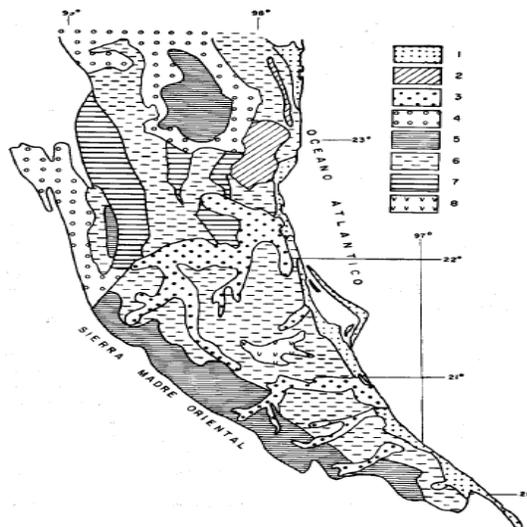
Las cartas topográficas de INEGI en las que se encuentra la zona de estudio son la F1411 (Esc. 1:250000) y F14D53 (Esc. 1:50000).



*Fig. 3.1 Localización del área de estudio. Imagen tomada de Google Earth, dónde se indican los límites de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y parte de la Llanura Costera del Golfo; los recuadros indican la localización de las cartas topográficas de INEGI, F1411 (Esc. 1:250000) y F14D53 (Esc. 1:50000) que cubren la zona de estudio.*

### 3.3.1 Provincias fisiográfica y geológica

La cuenca de Chicontepec, se ubica dentro de la provincia fisiográfica de la Llanura Costera del Golfo (**Fig. 3.2**), abarca parte de los estados de Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Hidalgo y gran parte del norte del estado de Veracruz, desde el límite con Tamaulipas hasta el sur de Papantla, donde se localizan las elevaciones del eje Neovolcánico; el límite occidental de la Llanura Costera del Golfo Norte lo constituye la Sierra Madre Oriental y hacia el oriente el Golfo de México (INEGI, 2011).



**Fig. 3.2.** Planicies de acumulación aluvial y localmente marina (1), 2. Lomeríos volcánicos (Plioceno-Cuaternario), 3. Planicie de acumulación fluvial (4), 4. Superficies de piedemonte (5), 5. Montañas de rocas plegadas mesozoicas, 6. Planicie de lomeríos de rocas plegadas mesozoicas, 7. Planicie estructural (de rocas sedimentarias terciarias), 8. Montañas plegadas y volcánicas de rocas mesozoicas y terciarias, respectivamente.

Entre las litologías que afloran en la Llanura Costera del Golfo se encuentran sedimentos marinos no consolidados (arcillas, arenas y conglomerados), cuya edad aumenta conforme se alejan de la costa (los hay desde Cuaternarios, pasando por Plioceno, Oligoceno y Eoceno del Terciario rocas del Cretácico Superior en las proximidades de la Sierra Madre Oriental) lo cual indica una regresión marina hacia el oriente. Presenta características de una costa emergida originada en el Cenozoico. En la porción nororiental de la provincia predominan lomeríos

alternados con llanuras, en tanto que en el sur, se tienen valles y llanuras de inundación formadas por el río Pánuco (Casados, 2002). Esta provincia corresponde a una gran cuenca marginal al orógeno de la Sierra Madre Oriental, con potentes espesores de rocas sedimentarias del terciario, con inclinación suave hacia el Golfo de México de forma monoclinial. Geológicamente, se definen tres grandes cuencas sedimentarias dentro de esta provincia: Burgos (norte), Tampico-Misantla (centro) y Veracruz-Campeche (sur). La Cuenca de Chicontepec pertenece a la provincia geológica de Tampico-Misantla. Esta provincia es una unidad geológica constituida por rocas del Triásico, Jurásico, Cretácico y Terciario que descansan sobre rocas graníticas de edad Carbonífero – Triásico Temprano. Se encuentra limitada al occidente por la Sierra Madre Oriental, al norte por el Rio Guayalejo, en las poblaciones de Xicotencatl, Tamps., y extremo sur de la Sierra de Tamaulipas, al sur por el Eje Neovolcánico y el Bloque de Teziutlán, al oriente por el Golfo de México (López-Ramos, 1979). La planicie que corresponde a la zona de Tampico-Veracruz se extiende transversalmente hasta la base de la Sierra Madre Oriental, está constituida por lomeríos, ondulaciones y planos ligeramente inclinados al oriente. Hacia el margen de la Sierra Madre Oriental, las rocas de la cuenca Tampico- Misantla se encuentran considerablemente más deformadas que hacia el este donde se localiza la antefosa de Chicontepec. En ella, las capas del Eoceno superior, corresponden a la etapa orogénica principal con depósitos litorales y continentales (López-Ramos, 1979).

### ***3.4 Estratigrafía***

#### ***3.4.1 Miembro Chicontepec Inferior (Paleoceno Superior)***

Consiste principalmente de lutitas suaves, grises, ligeramente arenosa con tonos verdosos y café, con contenidos moderados de bentonita blanca y verde; se presentan intercaladas con areniscas arcillosas grises de grano fino. Contiene impregnaciones de aceite residual (Pérez, 1990; Alemán, 1980). Aflora en la parte norte de la Cuenca de Chicontepec, desde Huejutla hasta el norte del Arroyo Tanlajas, y a lo largo de la carretera México-Poza Rica en los kilómetros 229, 256 y 261 (Contreras, 1979).

Se han estimado en pozos perforados en el centro de la Cuenca de Chicontepec, espesores de hasta 1 500 m. Tiene un amplio contenido faunístico dentro de las que destacan las siguientes especies: *Anomalina velascoensis*, *Morozovella*, *Globorotalia wilcoxensis*, *Nuttalides florealis* y *Spiroplectammina grzybowskii*, entre otras, por lo que se le asigna una edad Paleoceno Superior.

El depósito de esta formación se asocia al continuo levantamiento del occidente y un acelerado hundimiento o basculamiento hacia el oriente. Este episodio está a su vez relacionado con la orogenia Laramide, que da por resultado la Sierra Madre Oriental, que al erosionarse aporta grandes volúmenes de sedimentos a la cuenca y depósitos que ocurrieron de manera irregular en abanicos submarinos. Se le considera roca almacenadora por sus horizontes lenticulares arenosos (Nava *et al.*, 2001).

#### **3.4.2 Miembro Chicontepec Medio (Paleoceno Superior)**

Se compone de una secuencia de lutitas de color gris verdoso, gris y café con contenidos de bentonita, en varias localidades presenta impregnaciones de aceite (Pérez, 1990). En algunas localidades se caracteriza por la presencia de guijarros de caliza formando areniscas conglomeráticas, alternadas con areniscas oscuras de grano fino a medio, compactas y con restos de plantas; el sur de la Cuenca de Chicontepec se compone de lutitas compactas, masivas, color gris, sin estratificación visible y con laminaciones de areniscas calcáreas (Nava *et al.*, 2001).

Esta formación (según Nava *et al.*, 2001), consiste de sedimentos de grano fino y contiene las siguientes especies fósiles: *Chiloquumbelina critina*, *Morozovella Chilestomella sp.*, *Bulimina trihedra*, *Globigerina velascoensis* y *Gümbelina globulosa*; por lo que se le asigna una edad Paleoceno Superior. Su contacto superior es concordante en algunos sitios, o discordante, con el miembro superior y con la formación Aragón; el contacto inferior es también concordante, o discordante, con el miembro inferior. Se considera un ambiente de depósito similar al del miembro inferior (abanicos submarinos). Se le considera roca almacenadora por sus horizontes arenosos los que presentan alta porosidad y permeabilidad (Nava *et al.*, 2001).

### 3.4.3 Miembro Chicontepec Superior (Eoceno Inferior)

En varias localidades donde aflora, está conformada por areniscas calcáreas o ligeramente calcáreas de color gris claro a gris oscuro, de grano fino a medio con ligera impregnación de aceite residual. Así mismo, presenta escasos estratos de lutitas suaves levemente arenosas, de color pardo oscuro, gris verdoso y verde oscuro, también con impregnaciones de aceite residual (Alemán, 1980).

En los afloramientos se han identificado estructuras primarias como: laminación cruzada, canales de corte y relleno, rizaduras de corrientes, huellas de carga y restos de carbón diseminado; el espesor promedio es de 400 m. Se han identificado fósiles del Eoceno inferior tales como: *Globigerina pseudobulloides*, *Trochammina diagonalis*, *Globorotalia rex*, entre otros. Por lo que se infiere que estos sedimentos se depositaron en una plataforma clástica con influencia de flujos turbidíticos distales, en donde proliferaban organismos bentónicos. Esta formación funciona como roca sello en sus horizontes arcillosos, sin embargo, en sus horizontes arenosos se pueden presentar las mejores posibilidades de contener hidrocarburos (Nava *et al.*, 2001; Pérez, 1990).

De acuerdo con la columna geológica de la cuenca Tampico-Misantla, los miembros inferior y medio de la Formación Chicontepec se encuentra datada en el Paleoceno Superior, mientras que el miembro superior de la formación pertenece al Eoceno Inferior (**Fig. 3.3**). En el mapa geológico de la zona de estudio el miembro superior (Eoceno Inferior) de la Formación Chicontepec se encuentra erosionado casi por completo y solo aflora en la región noreste de la carta (**Fig. 3.4**). En la zona de estudio (alrededores de la localidad Acatepec, Hgo.) las lutitas y areniscas del Paleoceno que afloran se encuentran separadas por suelo aluvial del Cuaternario originado por el Río Calabozo. Al NE del mapa geológico se localiza el contacto Eoceno-Paleoceno. Las lutitas y areniscas del Eoceno conforman una planicie con ligeras interrupciones de conos volcánicos (basalto) (**Fig. 3.4**).

SISTEMA	SERIE	PLAY PRODUCTOR	FORMACION	
			NOORTE	SUR
TERCIARIO	OLIGOCEÑO SUPERIOR	●	HORCONES	PALMA REAL SUPERIOR
	OLIGOCEÑO INFERIOR		ALAZAN	PALMA REAL INFERIOR
	EOCENO SUPERIOR		TANTOYUCA	CHAPOPOTE
	EOCENO MEDIO		GUAYABAL	
	EOCENO INFERIOR	●	CHICONTEPEC SUPERIOR	ARAGON
	PALEOCEÑO SUPERIOR	●	CHICONTEPEC MEDIO	
	PALEOCEÑO INFERIOR	●	CHICONTEPEC INFERIOR	
			VELAZCO BASAL	
CRETACICO	SUPERIOR		MENDEZ	CHICONTEPEC CANAL
	MEDIO		SAN FELIPE	
	INFERIOR		AGUA NUEVA	
			TAMAULIPAS SUPERIOR	TAMABRA
			TAMAULIPAS INFERIOR	
JURASICO	SUPERIOR		PIMIENTA	
			TAMAN	SAN ANDRES

Fig. 3.3. Columna geológica cuenca Tampico Misantla, PEMEX (2005).

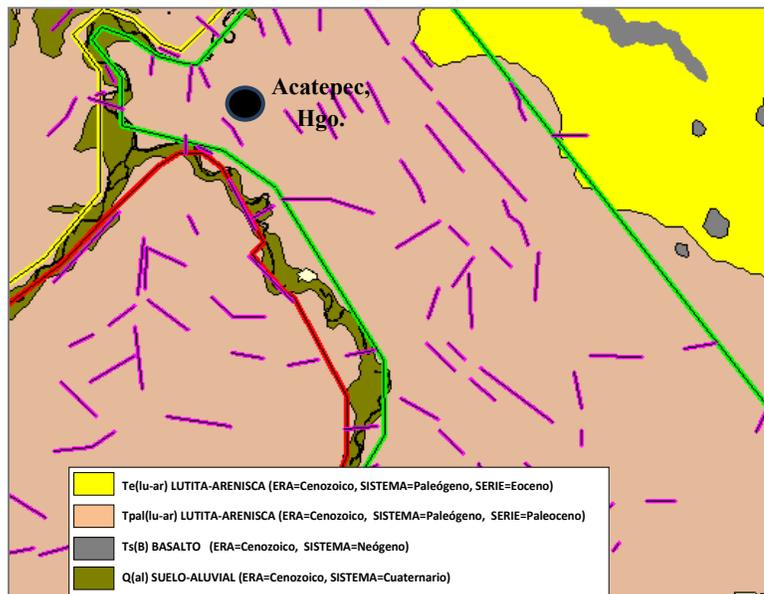


Fig. 3.4. Mapa geológico de la zona de estudio. Carta INEGI F14D53 (Esc. 1:50000).

### ***3.5 Sedimentología***

La Cuenca de Chicontepec corresponde con una cuenca sedimentaria de ante país (“foreland”), con un aporte de múltiples fuentes clásticas. Las facies sedimentarias más comunes corresponden a facies gravitacionales de talud y turbiditas, en segundo orden de frecuencia están los abanicos distales. Las facies de canal y de desborde son menos frecuentes en los afloramientos. La cuenca debe considerarse como un sistema de carga mixta (arena - lodo) para el Eoceno y rico en lodo para el Paleoceno (Bitter, 1993).

La facies de la Formación Chicontepec según Bitter (1993), se subdividen en los tipos A, C, D y F. Las facies de tipo A son canalizadas y se divide en la subfacies A1 y A2. A1 es interpretada como corrientes turbidíticas de alta densidad depositadas por debajo de la línea base de tormentas, correspondientes al abanico interior o medio, consiste de guijarros de arenisca y conglomerados de clastos subredondeados a redondeados de caliza, dolomita, cuarzo y areniscas poco consolidadas. Las areniscas amalgamadas y los lentes son comunes, la gradación es normal y los estratos de lutita son locales, convolutos y plegados. La subfacies A2 es caótica y consiste de guijarros de lutitas, caliza, cuarzo y areniscas soportados por una matriz lodosa, es interpretada como flujos de detritos.

La facies C es escaza y corresponden a depósitos del lóbulo externo del abanico, consiste de areniscas de grano medio a grueso de alrededor de 2.5 m de espesor, intercaladas con capas finas de lutitas en proporciones de 4:1. En algunas areniscas de gran espesor, se encuentran la secuencia completa de Bouma con estructuras de escape de fluidos, erosión y amalgamación. Las subfacies C1 y C2 son similares, excepto por que la subfacies C2 contiene areniscas de grano fino a medio y exhibe menor erosión. Estas facies afloran en el sureste de Poza Rica y en un área entre Tanlajas, Villa Terrazas y Tancanhitz (Bitter, 1993).

La facies D se presenta frecuentemente sin secuencia de Bouma y corresponde a depósitos de lóbulo externo a margen del abanico. Se divide en las subfacies D1 y D2 que se encuentran generalmente intercaladas sugiriendo que son equivalentes laterales. Las areniscas de la subfacies D1 son de alrededor de 50 cm espesor, de grano muy fino a medio, intercaladas con lutitas en proporciones 1:1 o 2:1. La subfacies D2, consta de areniscas de menos de 20 cm de



espesor sin secuencia de Bouma, de grano muy fino a fino, con estratificación cruzada y rizaduras, la relación con intercalaciones de lutitas es menor a uno y contienen algunas capas delgadas de limolitas con contactos gradacionales.

Las facies F corresponden a deslizamientos sindeposicionales y “slumps”, su espesor es de entre 10 y 15 m y en ocasiones se encuentran intercaladas con secuencias no deformadas, la estratificación es similar a la facies D2, capas de areniscas de menos de 6 cm de espesor intercaladas con lutitas con una relación de 1:2 o menor. En estas facies la estructuración posdeposicional no puede ser descartada, estos depósitos pueden representar depósitos de deslizamiento del “levee” asociados a canales; también pueden representar deformación sindeposicional como respuesta al empuje activo y plegamiento a lo largo del margen de cuenca.

#### ***CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE RADIOACTIVIDAD NATURAL DE LA FORMACIÓN CHICONTEPEC***

Con el objetivo de conocer el comportamiento de la radioactividad natural (rayos gamma) emitida por las facies areno-arcillosas de la Fm. Chicontepec, se realizaron mediciones en afloramientos ubicados en zonas aledañas a la localidad de Acatepec, dentro del Municipio de Huautla, Hgo. Adicionalmente a esta adquisición, se realizó un estudio geológico detallado (a cargo de un grupo de geólogos), para el cual se tomaron mediciones de los espesores y la granulometría de los estratos, con el propósito de tener un control geológico sobre las secciones estratigráficas donde se midieron los perfiles de rayos gamma. Los valores de U, Th y K fueron utilizados para analizar la composición mineralógica de las facies de las secciones. Mientras que los valores de rayos gamma total, sirvieron para determinar si estos perfiles podían correlacionarse mediante electro-facies, con los valores de registros de rayos gamma en los pozos de la macropera del campo Coyotes.

##### ***4.1 Descripción del equipo de adquisición de rayos gamma***

Para la adquisición de datos de radioactividad natural, se utilizó un equipo de espectrometría modelo RS-230 BGO Super-Spec, el cual contiene 1024 canales y detecta un rango de energía de 30 keV a 3000 keV. Este equipo utiliza una fuente de centelleo de germanato de bismuto con una sensibilidad de detección 2.5 veces mayor a los cintilómetros de yoduro de sodio (NaI), lo que le permite captar los niveles de radioactividad en un rango de 90 cm diámetro aproximadamente. Sin embargo, en las pruebas de sensibilidad que se realizaron, se observó que el radio de penetración depende del material estudiado. Para rocas más densas y compactas el radio es menor que en rocas más porosas. La exactitud de los datos también depende de la estabilidad del espectrómetro. El sistema de estabilización del equipo RS-230 es automático (toma entre 5 y 10 minutos dependiendo de las condiciones locales). Con equipos de modelos anteriores era necesario realizar pruebas de estabilización, con la finalidad de observar si la fuente alcanzaba los niveles de energía óptimos para obtener

lecturas confiables, se medía la radioactividad al aire libre y en ausencia de una fuente radiactiva específica.

Los periodos de tiempo de muestreo recomendados por el fabricante se presentan en las especificaciones del equipo de la siguiente forma, dependiendo de las necesidades de prospección:

**60 segundos:** En zonas anómalas. Los datos son de baja calidad, sin embargo, proporcionan los niveles de radiación general. Está diseñado para una adquisición rápida y obtener el máximo de datos en un corto tiempo.

**120 segundos:** En zonas anómalas permite obtener el máximo de datos de mediana calidad en corto tiempo.

**180 segundos:** Para obtener datos de buena calidad en zonas regularmente anómalas.

**240 segundos:** Cuando se requieren datos de alta calidad.

**300 segundos:** Si se requieren datos de máxima calidad.

Con el fin de determinar el tiempo de muestreo de los datos y analizar la sensibilidad del equipo al cambio de litologías, se realizaron mediciones en rocas terrígenas, carbonatadas e ígneas en los alrededores de la localidad de Filomeno Mata y Coyutla, Ver. Las pruebas para determinar el tiempo de muestreo se llevaron a cabo en 2 transectos consecutivos de 1.7 y 1.5 m perpendiculares a la estratificación (**Fig. 4.1**), en una secuencia areno-arcillosa. Los datos de radioactividad natural fueron tomados a intervalos de 10 cm con periodos de tiempo de 2 y 4 minutos (**Tabla 4.1**):

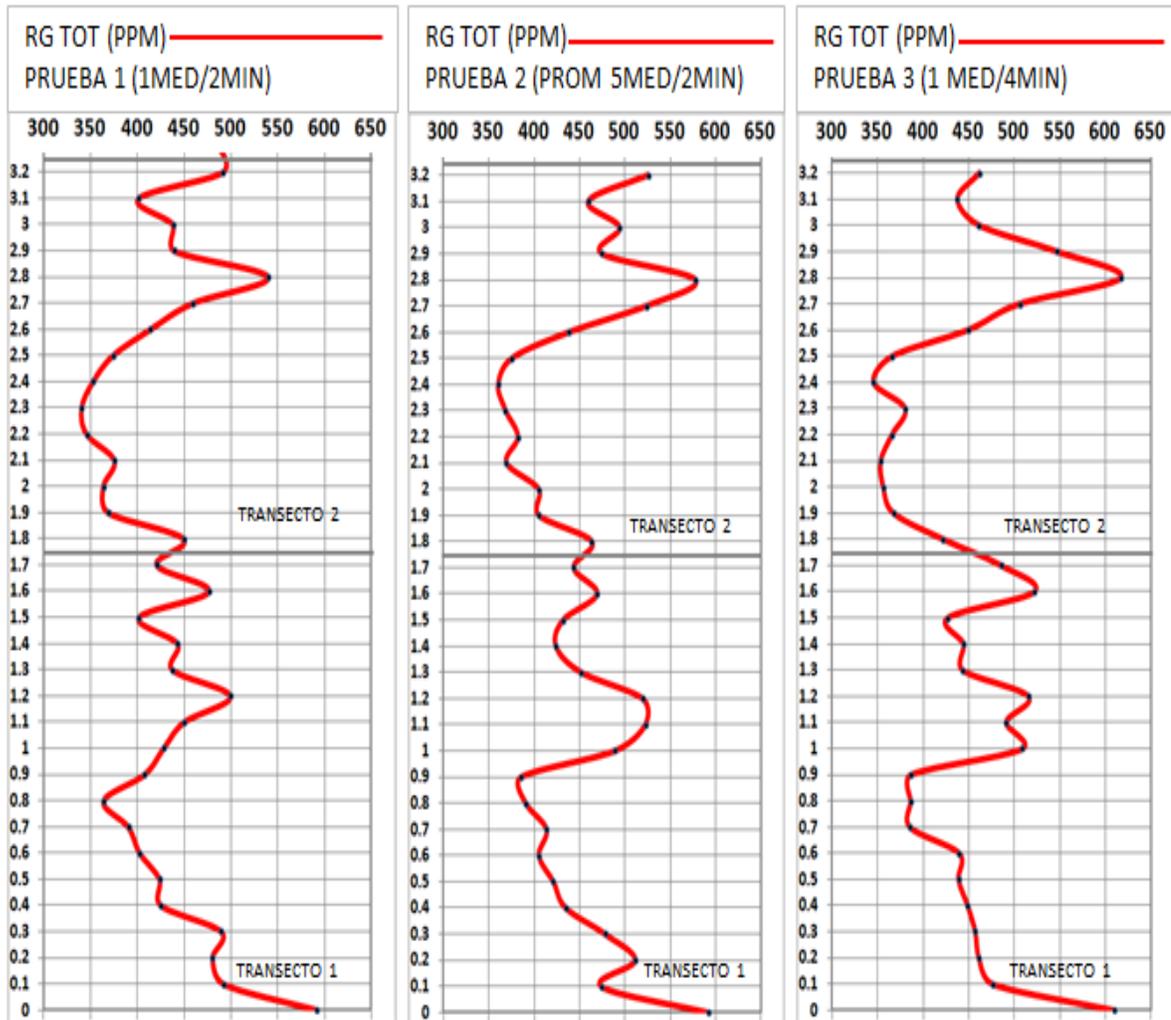
NO. DE PRUEBA	TIEMPO DE MUESTREO EN CADA PUNTO (SEG)	INTERVALO DE MUESTREO SOBRE EL TRANSECTO (CM)	NO. DE MEDICIONES EN UN MISMO PUNTO
1	120	10	1
2	120	10	5
3	240	10	1

*Tabla 4.1. Tiempos de muestreo y distancia entre puntos de las pruebas de sensibilidad en una secuencia areno-arcillosa.*

En la primera prueba se tomo una lectura por cada punto con un tiempo corto de 120 segundos, recomendado para prospecciones rápidas. En la segunda prueba se tomaron 5 mediciones de 120 segundos en cada punto y se promediaron los tres valores más representativos (eliminando el mínimo y el máximo). En la tercera prueba se eligió un periodo de muestreo de 240 segundos recomendado para adquisiciones de alta calidad. Las tres curvas registradas fueron comparadas entre sí, y con la descripción litológica para determinar cuál de estas curvas representaba mejor la secuencia estudiada (**Fig. 4.2**). Comparando los datos registrados y graficados no se observaron diferencias significativas, sin embargo, las pruebas 2 y 3 delimitaron mejor los espesores de la litología reportada por los geólogos. Por lo que se eligió el periodo de 240 segundos en las secciones donde se requería más precisión y el de 120 segundos en las prospecciones rápidas.



*4.1. Transectos 1 y 2 de 1.7 y 1.5 m respectivamente medidos perpendicularmente a la estratificación, en intercalaciones de areniscas y lutitas, Filomeno Mata, Ver.*



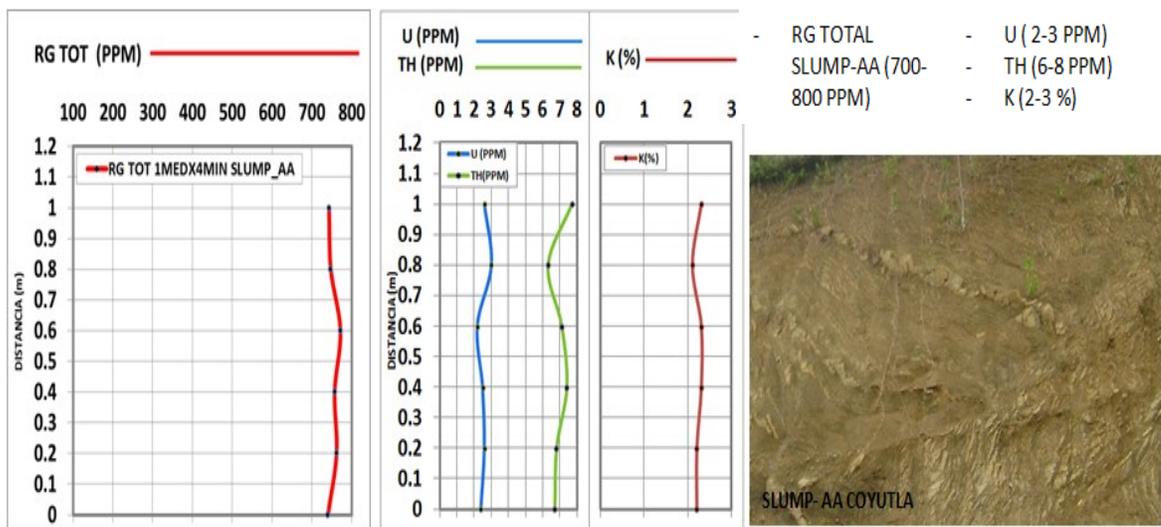
*Fig. 4.2. Curvas de rayos gamma total tomadas en dos transectos de una secuencia areno-arcillosa (Filomeno Mata, Ver.), para determinar los periodos de tiempo más óptimos en la adquisición. Escala vertical en metros, la base del transecto 1 comienza en 0 y la base del transecto 2 comienza en 1.75 m. Prueba 1 (superior izq.) tomada con un periodo de 2 minutos por punto. Prueba 2 (superior central) graficada considerando el promedio de 3 de 5 mediciones con 2 minutos de registro por punto. Prueba 3 (superior der.) tomada con un periodo de medición de 4 minutos por punto.*

Con el propósito de conocer la sensibilidad del equipo al cambio de litologías, se realizaron mediciones en un “slump” areno-arcilloso, en un basalto y una caliza (de 1 m de espesor), con periodos de muestreo de 240 segundos por punto y espaciamento entre puntos de 10 cm (Tabla 4.2):

NO. DE PRUEBA	TIEMPO DE MUESTREO EN CADA PUNTO (SEG)	INTERVALO DE MUESTREO SOBRE EL TRANSECTO (CM)	NO. DE MEDICIONES EN UN MISMO PUNTO
1 (slump areno-arcilloso)	240	10	1
2 (basaltos)	240	10	1
3 (calizas)	240	10	1

*Tabla 4.2. Tiempos de muestreo y distancia entre puntos de las pruebas tomadas en un “slump” areno-arcilloso, basalto y caliza, para determinar la sensibilidad del equipo al cambio de litologías*

El espesor del “slump” areno-arcilloso muestra intercalaciones rítmicas de estratos delgados (alrededor de 2 cm) de areniscas de grano fino y lutitas, los valores de radioactividad total oscilan entre 750 y 780 ppm, con valores de Uranio entre 2 y 3 ppm, Torio entre 6 y 8 ppm y Potasio entre 2 y 2.5 % (Fig. 4.3). En el espesor de basalto, los datos se comportan constantes probablemente debido a una distribución homogénea de los minerales. Los valores de radioactividad total fluctúan entre 100 y 200 ppm, con valores de Uranio de 0 a 1 ppm, de Torio entre 1 y 2 ppm y Potasio alrededor de 0.5 % (Fig. 4.4). Finalmente los valores tomados en una caliza sin materia orgánica, compacta y masiva son más bajos respecto a los registrados en el basalto, la radioactividad total se encuentra entre 100 y 150 ppm, el Uranio y el Torio entre 0 y 1 ppm y el Potasio es menor de 0.5 % (Fig. 4.5).



*Fig. 4.3. Pruebas de radioactividad tomadas en 1m de espesor de un “slump” areno-arcilloso (Coyutla, Ver.)*

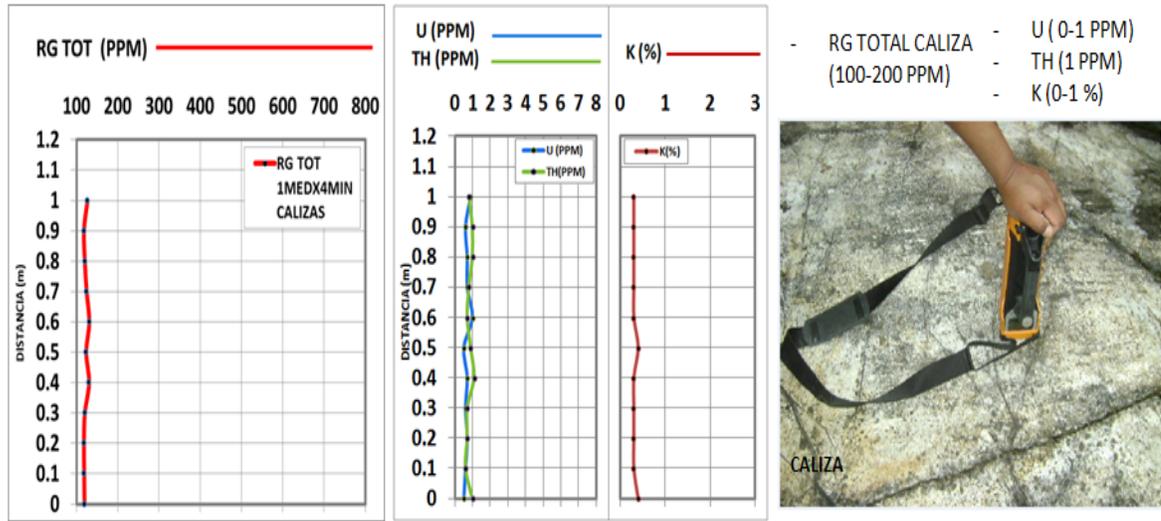


Fig. 4.4. Pruebas de radioactividad tomadas en 1m de espesor de basalto (Coyutla, Ver.)

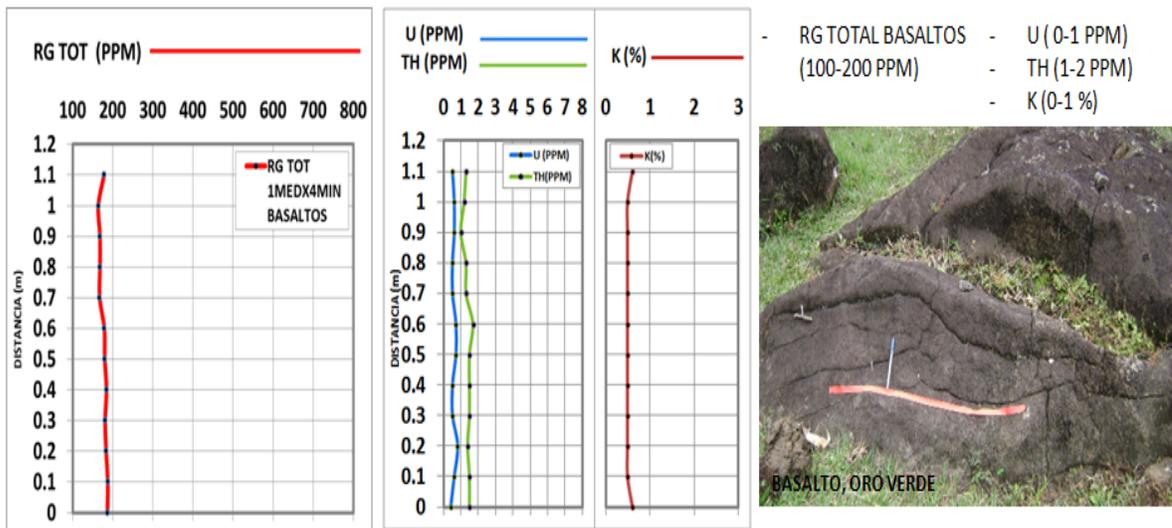


Fig. 4.5. Pruebas de radioactividad tomadas en 1m de espesor de caliza (Coyutla, Ver.)

El tiempo de muestreo seleccionado se consideró adecuado para trabajar con las secciones que se midieron en el estudio de análogos de yacimientos en afloramientos. Por otra parte, las pruebas en distintas litologías mostraron que la sensibilidad del equipo permitiría caracterizar a las facies estudiadas.

#### ***4.2 Metodología de adquisición y procesado***

La adquisición de datos de radioactividad en facies de la Fm. Chicontepec, se llevó a cabo en tres secciones distintas denominadas CH03, CH05 y CH06, localizadas en los alrededores de la localidad de Acatepec, en el Municipio de Huautla, Hgo (**Fig. 3.1**). Las secciones CH05 y CH03 se muestrearon a intervalos de 120 segundos, mientras que la sección CH06 se muestreó a 240 segundos.

En la sección CH05, aflora una secuencia sedimentaria de intercalaciones rítmicas de arenisca color beige-grisáceo de grano muy fino, fino y medio (de entre 2 y 4 cm de espesor), con capas delgadas de lutita de color gris. Esta sección tiene una longitud de 25 m de espesor, está dividida en 16 transectos desde la base a la cima y consta de 172 puntos de muestreo espaciados a cada 15 cm.

La sección CH03 presenta intercalaciones rítmicas de estratos delgados a medios (de 2.5 a 43 cm) de arenisca muy fina y fina de color grisáceo con capas delgadas (5 cm) de limos calcáreos de color gris. Esta sección que mide 10 m de espesor, se dividió en 8 transectos desde la base a la cima y contiene 66 puntos de muestreo espaciados a cada 15 cm.

Finalmente, en la sección CH06 se midieron 73 m de espesor con 475 puntos de muestreo espaciados a cada 15 cm (esta sección no se dividió en transectos, el control de la distancia se realizó a través de fotografías de los puntos de medición enumerados), se forma de intercalaciones de estratos delgados a gruesos (de 1cm a 3 m) de areniscas finas, muy finas, medias, gruesas y muy gruesas con conglomerados y lutitas.

Los datos de radioactividad natural registrados en los afloramientos de la Fm. Chicontepec, fueron extraídos del equipo de adquisición y almacenados en una base de datos. Los valores de radioactividad total registrados, U (ppm), Th (ppm) y K (%), se graficaron en Excel para la obtención sus curvas, estas se compararon con sus respectivas columnas estratigráficas y se

identificaron los rangos de valores de radioactividad en que varían los perfiles de cada sección, para analizar e interpretar su comportamiento en términos del aporte de U, Th y K.

Adicionalmente, los valores de U (ppm), Th (ppm), K (%) fueron utilizados para inferir el tipo de arcillas contenidas en las rocas de las secciones estudiadas. Para esto, se consideró la metodología reportada por Adams y Weaver (1958), por lo que se graficaron las proporciones de Torio con respecto al Potasio (Th/K, ppm/%) en gráficos cruzados (“cross plots”) y en perfiles verticales que abarcan el espesor medido de la sección, en los que se asocia el valor de la relación Th/K con su posición vertical respecto de la base de la sección, esto con el fin de analizar la distribución de los valores registrados en los diferentes transectos y/o secciones.

Otra de las finalidades de este estudio en afloramientos, fue estimar la viabilidad de comparar los valores de radioactividad medidos en diferentes secciones con los valores de registros de rayos gamma en pozos de la macro pera del campo Coyotes. Esto nos permitió aportar más elementos para caracterizar las facies en los pozos. Para establecer la comparación, fue necesario transformar las unidades de radioactividad de las secciones (ppm) a unidades API (registro de pozo), los valores de U (ppm), Th (ppm) y K (%) fueron sumados para obtener la curva de rayos gamma total en unidades API de acuerdo con la metodología descrita en Barson *et al.* (2005). Los valores en estas unidades fueron importados en el software Petrel® para el cálculo de las electro-facies. Dichas electro-facies se calcularon a través de rangos de valores de radioactividad que fueron calibrados con núcleos del pozo Coyotes 318. Mediante estos rangos se propusieron cuatro facies para ser caracterizadas con el registro de rayos gamma: arenisca, arenisca arcillosa, lutita arenosa y lutita. Los rangos fueron aplicados tanto a los registros de rayos gamma de los pozos de la macro pera Coyotes 331 como a las secciones.

Posteriormente, las electro-facies resultantes de las secciones estudiadas en afloramientos, se compararon con sus respectivas columnas estratigráficas para observar si estas representaban bien a la litología de los afloramientos. Finalmente, se identificaron rangos de valores con los que las electro-facies se ajustaran mejor a las descripciones geológicas de las secciones.

### 4.3 Descripción de la radioactividad natural registrada

Los perfiles de radioactividad obtenidos de las secciones estudiadas fueron comparados con sus respectivas columnas estratigráficas, observándose que las deflexiones de las curvas de rayos gamma total reflejan congruentemente los cambios de la litología. Los espesores de areniscas limpias y masivas arrojaron valores bajos de U, Th y K, mientras que las curvas con valores altos de rayos gamma total se localizaban en los estratos con minerales arcillosos que probablemente estén asociados al Torio y al Potasio, como lo reportan para este tipo de litologías Postma y Ten Veen (1999).

En la sección CH05 predominan los estratos delgados de lutita que se intercalan con areniscas de grano muy fino a medio, con valores de radioactividad total, Torio y Potasio mayores que los registrados en la sección CH03; los valores de Uranio fluctúan alrededor de 2 ppm y no parece haber diferencias significativas entre estas dos secciones (**Figs. 4.6, 4.7 y 4.8**). La sección CH06 presenta espesores más potentes de arenisca de grano medio y grueso intercalados con estratos de lutita, los niveles de radioactividad en los intervalos arcillosos son más altos que en la sección CH05.

En resumen, las curvas de radioactividad obtenidas en las secciones estudiadas fluctúan dentro de los siguientes rangos:

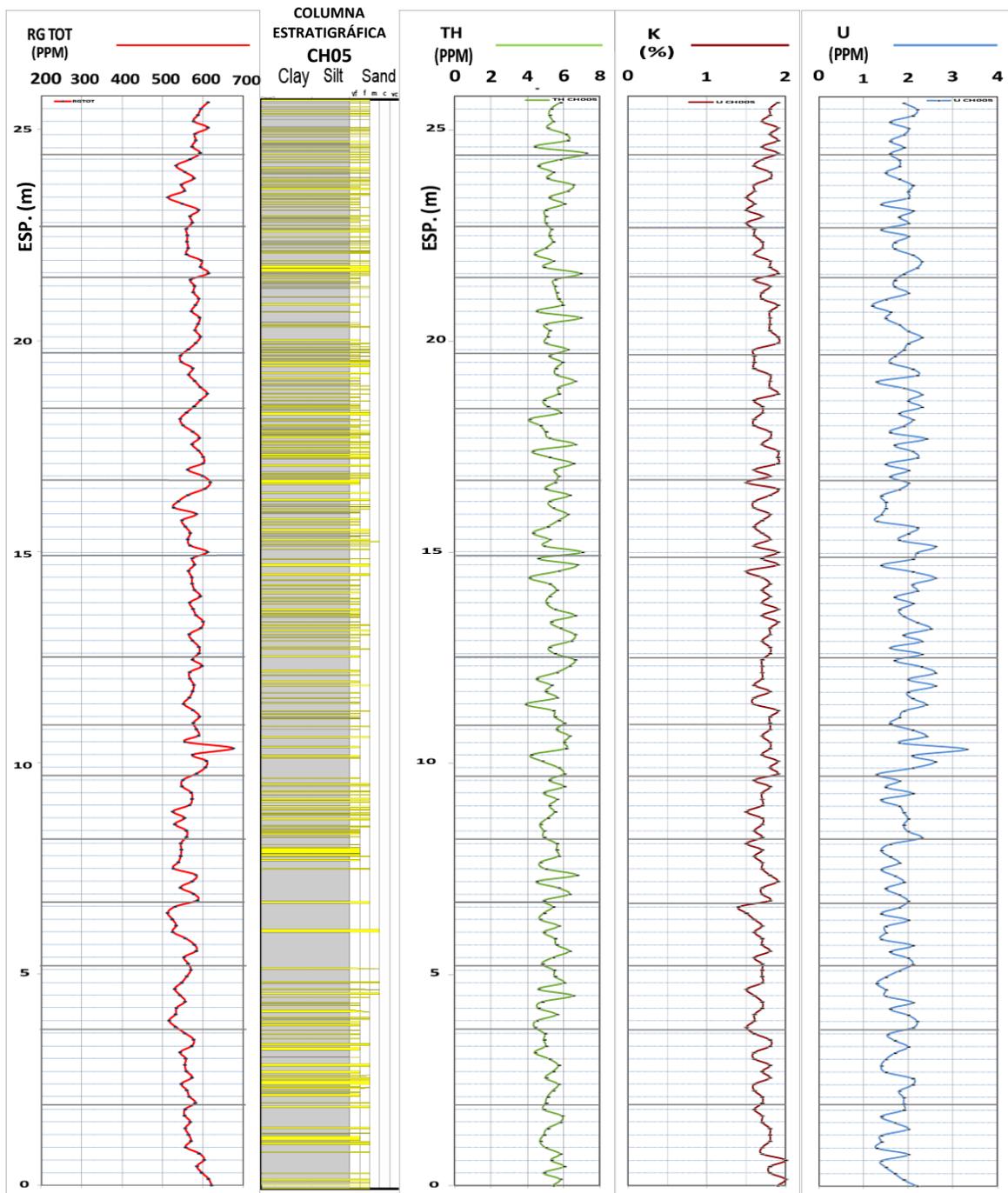
- **Rayos gamma total:** La sección CH05 varía en un rango de 500 a 700 ppm (**Fig. 4.6**), la sección CH03 oscila en un rango de 300 a 600 ppm (**Fig. 4.7**), mientras que CH06 fluctúa entre 200 y 1000 ppm (**Fig. 4.8**). Los valores en areniscas y en lutitas de la sección CH06, son los más bajos y altos respectivamente, de las tres secciones muestreadas.
- **K:** En la sección CH05 presenta valores entre 1.5 y 2 % (**Fig. 4.6**), la sección CH03 varía entre 0.8 y 1.8 % (**Fig. 4.7**) y la CH06 oscila generalmente alrededor de 1 %, aunque los valores mínimos y máximos son de 0.4 y 2.5 % respectivamente (**Fig. 4.8**). Los valores de Potasio en areniscas de la sección CH06 son los más bajos de las tres secciones mientras que en lutitas son los más altos.

- **Th:** La sección CH05 varía entre 4 y 7 ppm (**Fig. 4.6**), la sección CH03 fluctúa entre 3 y 5 ppm (**Fig. 4.7**) mientras que la sección CH06 presenta valores mínimos y máximos de 1.4 a 14.6 ppm respectivamente (**Fig. 4.8**), los valores de Torio alcanzados en esta sección son más bajos y altos de las tres secciones.
- **U:** Para la sección CH05 oscila entre 1.3 ppm y 3.3 ppm (**Fig. 4.6**), de 1.2 a 3.3 ppm (**Fig. 4.7**) en la sección CH03 y entre 1.1 y 4.2 ppm (**Fig. 4.8**) para la CH06. En esta última sección los valores de Uranio mínimos y máximos son los más bajos y altos respectivamente que se registraron de las tres secciones.

El registros de rayos gamma obtenido en la sección CH05 (**Fig. 4.6**), no permitió distinguir los estratos delgados, ya que el instrumento de medición abarca varios espesores de areniscas intercaladas con lutitas y promedia sus contribuciones. Sin embargo, en la curva de rayos gamma total se observa que los valores son altos y oscilan dentro de un rango estrecho de radioactividad (500 a 600 ppm) y que se deben a las contribuciones altas de Potasio (valores muy cercanos a 2 %). Los valores de la curva de Potasio de la sección CH06 (**Fig. 4.8**) se encuentran generalmente por debajo de 1 %, excepto en aquellos horizontes de limos y arcillas bien delimitados y en espesores de conglomerados lodo-soportados donde los valores van de 1.5 a 2 ppm. Los valores de Potasio de la sección CH03 (**Fig. 4.7**) son cercanos a 1 % en las areniscas y 2 % en las lutitas.

Los valores de la curva de Torio en las tres secciones varían entre 2 y 4 ppm en areniscas de grano medio a grueso. Sin embargo, en las secciones CH03 y CH05 se registraron valores de 4 a 6 ppm tanto para areniscas de grano fino como para las lutitas; mientras que las lutitas de la sección CH06 presentan valores entre 6 y 14 ppm.

Los valores de Uranio en las secciones CH03 y CH05 se encuentran entre 1.5 y 2 ppm, mientras que en la sección CH06 van de 2 a 4.2 ppm donde se tienen algunos intervalos con materia orgánica. Estos valores ocurren indistintamente en estratos de areniscas y lutitas, probablemente porque ambos pueden contener materia orgánica.



*Fig. 4.6. Sección CH05 (25 m de espesor). De izquierda a derecha se muestra el registro de rayos gamma total, la columna estratigráfica, y las curvas de Torio, Potasio y Uranio. Las líneas gris claro horizontales están espaciadas a cada 30 cm, las líneas oscuras separan a los transectos en la sección y varían entre 1.2 y 1.9 m. Los puntos de muestreo de las curvas de rayos gamma se encuentran espaciados a cada 15 cm. La columna estratigráfica representa a los estratos de limos y arcillas en gris, y los de areniscas en amarillo. Escala vertical en metros.*

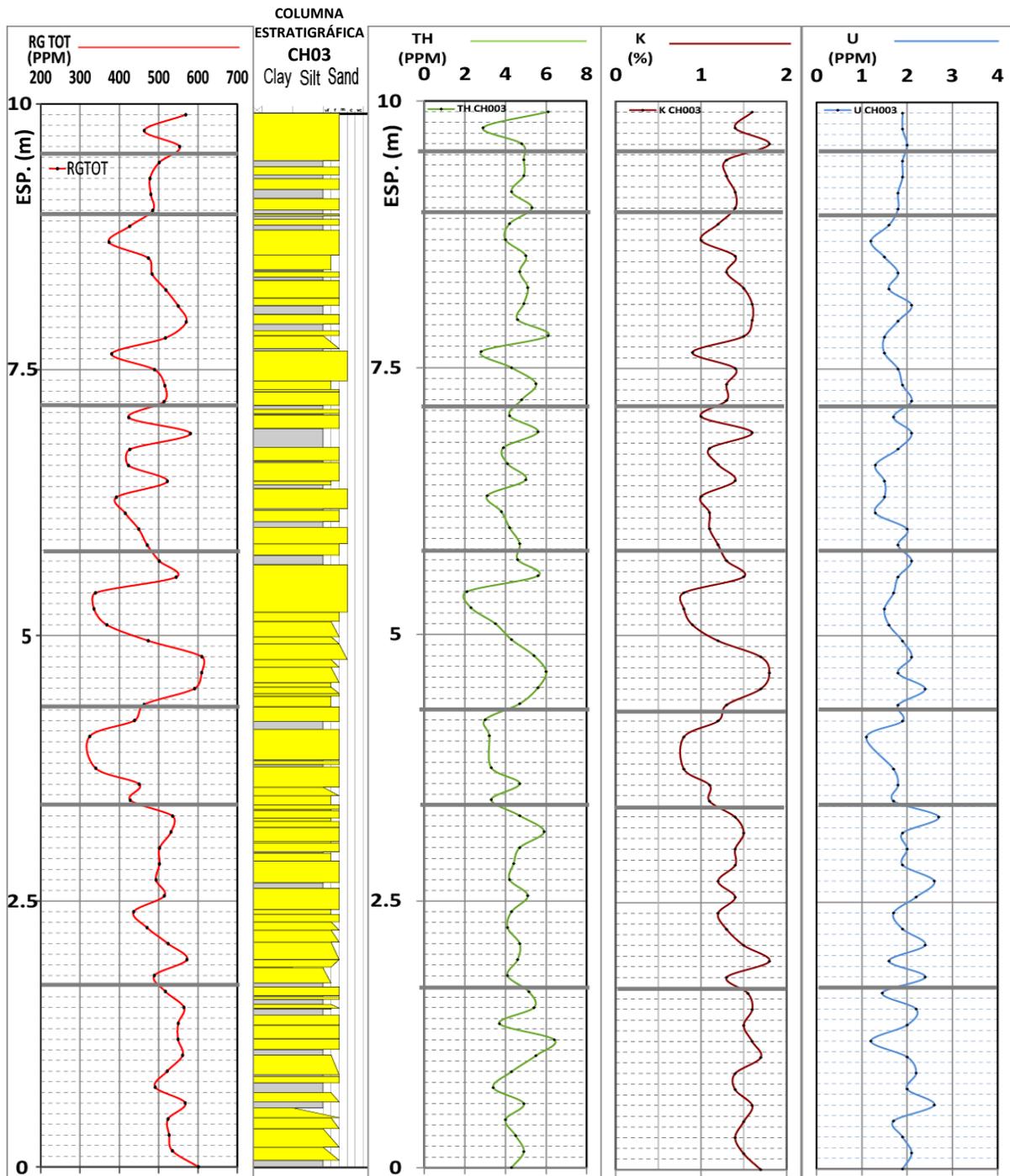


Fig. 4.7. Sección CH03 (10 m de espesor). De izquierda a derecha se presenta el registro de rayos gamma total, la columna estratigráfica y las curvas de Torio, Potasio y Uranio. Las líneas gris claro horizontales están espaciadas a cada 10 cm, las líneas oscuras separan a los transectos en la sección y varían entre 0.3 y 1.8 m. Los puntos de muestreo de las curvas de rayos gamma se encuentran espaciados a cada 15 cm. La columna estratigráfica representa a los estratos de limos y arcillas en gris, y los de areniscas en amarillo. Escala vertical en metros.

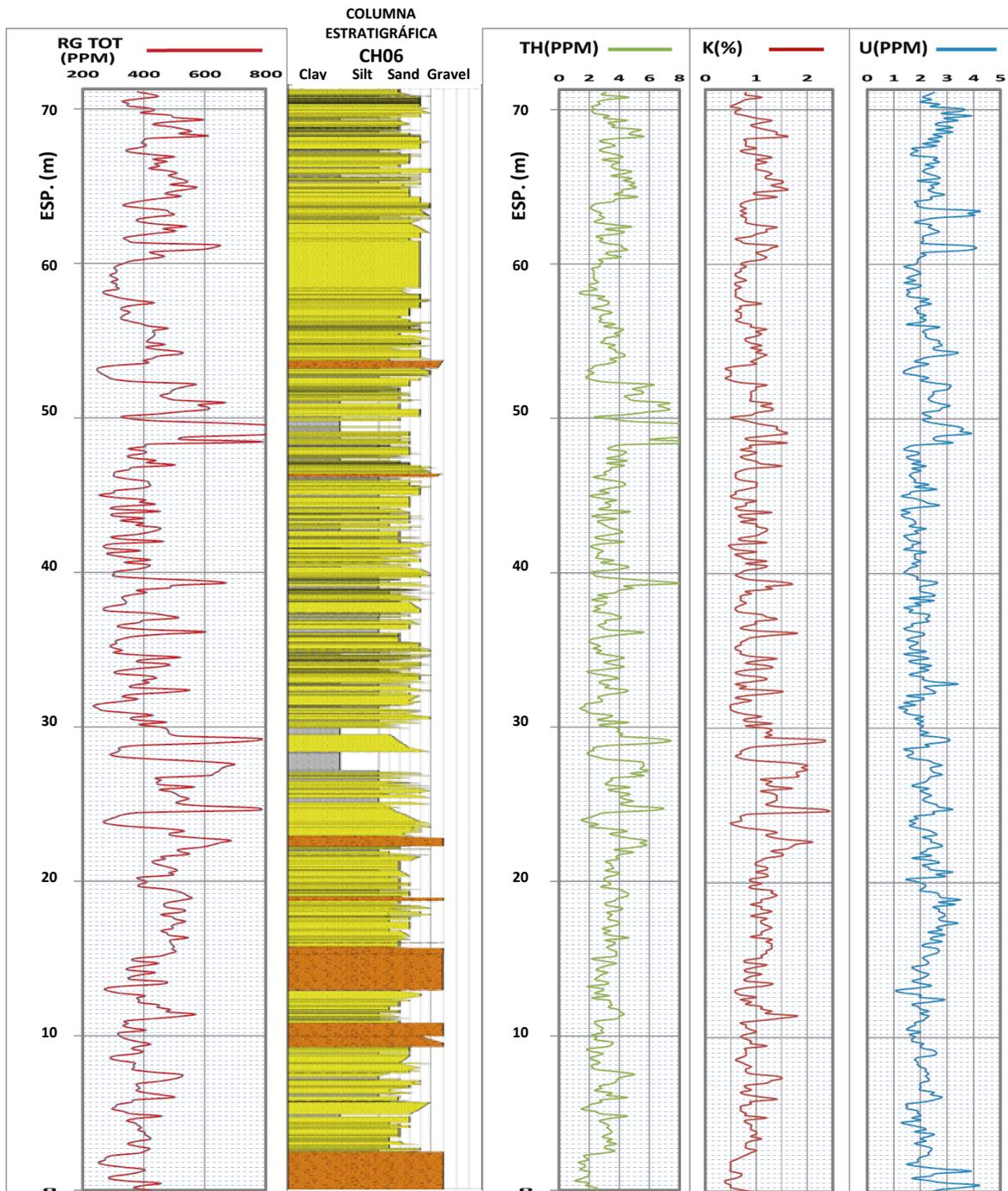


Fig. 4.8. Sección CH06 (73 m de espesor). De izquierda a derecha se observa el registro de rayos gamma total, la columna estratigráfica, y las curvas de Torio, Potasio y Uranio. Las líneas grises horizontales están espaciadas a cada 10 m (esta sección no se separó en transectos). Los puntos de muestreo de las curvas de rayos gamma se encuentran espaciados a cada 15 cm. La columna estratigráfica representa a los estratos de limos y arcillas en gris, los de areniscas en amarillo y conglomerados en naranja. Escala vertical en metros.

#### 4.4 Proporciones Torio- Potasio ( $Th/K$ , ppm/%) y Torio-Uranio ( $Th/U$ , ppm/ppm) en las facies de la Fm. Chicontepec

Con el fin de identificar los de minerales arcillosos contenidos en las facies y poder contar con más elementos para establecer los ambientes de depósito, se realizó un análisis de las proporciones  $Th/K$  y  $Th/U$  de las tres secciones. Las relaciones  $Th/K$  (ppm/%) fueron graficadas en “cross plots” (**Fig. 4.9**) de acuerdo con las metodologías reportadas por Adams y Weaver (1958). Estos gráficos permiten separar 8 regiones mineralógicas (minerales pesados con Torio, clorita/caolinita, montmorillonita (esmectitas), illita, micas, glauconita, feldespatos potásicos y evaporitas), los valores cercanos al origen dentro de una región mineralógica, corresponden a proporciones bajas de radioactividad, mientras que los valores alejados del origen corresponden a proporciones altas (mayores cantidades de elementos radioactivos). Las regiones mineralógicas que ocupan las secciones muestreadas en este trabajo corresponden a illitas y a montmorillonitas (donde la relación  $Th/K$  va de 2 a 3.5 ppm/% para illitas y de 3.5 a 12 ppm/% en montmorillonitas).

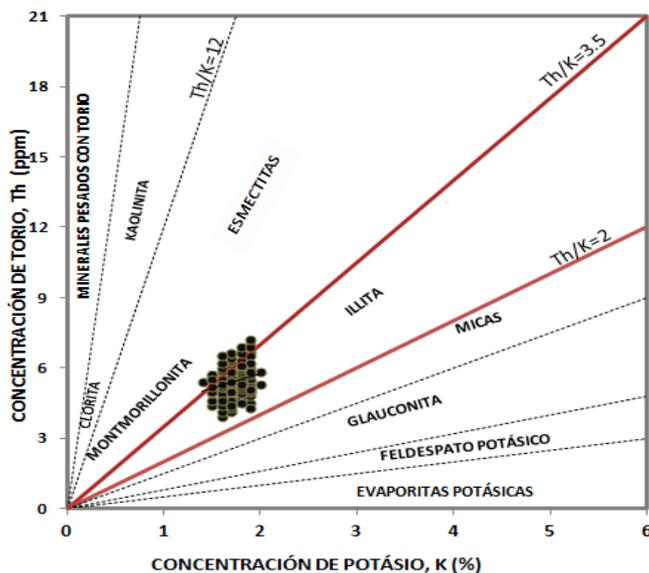


Fig. 4.9 Relación Torio-Potasio (izquierda) de las facies de la sección CH05 (foto de la derecha).

En el “cross-plot” de la sección CH05 se graficaron 172 valores (**Fig. 4.9**). El gráfico muestra que la mayor parte de los puntos se encuentran en la región mineralógica de la illita ( $Th/K$

entre 2 y 3.5 ppm/%), y algunos puntos se ubican en montmorillonitas (Th/K mayor a 3.5 ppm/%). Note que la nube de puntos es compacta, es decir, no presenta mucha dispersión, esto puede deberse a que los valores de Potasio tienen poca fluctuación a lo largo de toda la sección (entre 1.5 y 2 %), al igual que el Torio que varía entre 4 y 6 ppm, con algunos valores entre 6 y 7 ppm.

La gráfica de la relación Th/K en función de la longitud total de la sección CH05, representa la distribución de los puntos en el espesor medido (**Fig. 4.12**), en esta gráfica se observa que las variaciones de la relación Th/K se encuentran regidas por las fluctuaciones del Torio y que los puntos se distribuyen homogéneamente por debajo de 3.5 (ppm/%), sin intervalos definidos en la región de montmorillonita. Los valores que se encuentran por arriba de 3.5 (ppm/%), son puntos aislados debidos a los picos de Torio que se encuentran por arriba de 6 ppm y son los que corresponden a montmorillonitas, mientras que los puntos que caen en la región mineralógica de la illita están asociadas a los valores altos y constantes del Potasio sin picos de Torio.

Para construir el “cross plot” de la relación Th/K de la sección CH03, se graficaron 66 valores (**Fig. 4.10**). En esta gráfica se puede observar que la nube de puntos se encuentra más dispersa en la región de la illita y montmorillonita, debido a que los valores fluctúan en rangos más amplios y existen probablemente de bajas a medias cantidades de estos elementos radioactivos en las facies de esta sección. En el perfil de la relación Th/K, la distribución de los valores a lo largo del espesor de la sección CH03 (**Fig. 4.13**) oscila alrededor de 3.5 (ppm/%), en esta sección existe mayor cantidad de espesores (de 2.5 a 43 cm) de areniscas que en la sección CH05, lo cual se traduce en valores de Potasio menores a 1.5 %; en el perfil la curva de esta relación se muestra más cercana a la línea que separa a la illita de la montmorillonita (Th/K igual a 3.5 ppm/%) respecto a la sección CH05.

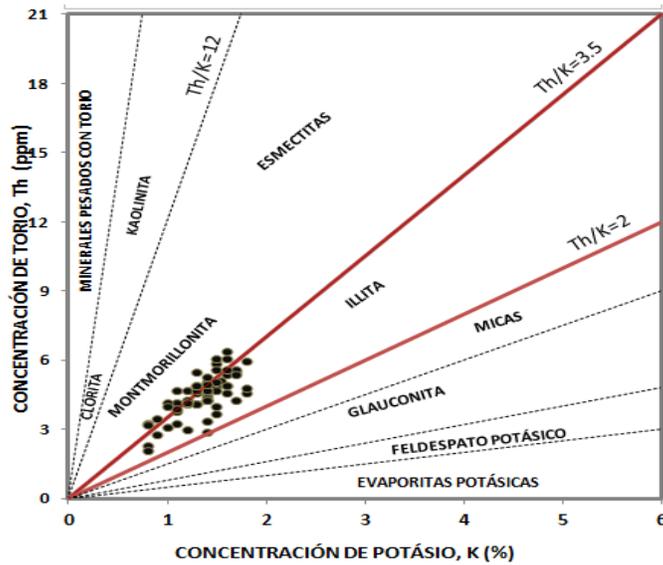


Fig. 4.10 Relación Torio-Potasio (izquierda) de las facies de la sección CH03 (foto de la derecha).

El “cross-plot” de la relación Th/K de la sección CH06 contiene 475 puntos (Fig. 4.11), que se encuentran distribuidos tanto en la región de la illita como en la montmorillonita, con algunos puntos aislados en la región de las esmectitas, los cuales se deben al contenido alto de Torio en un intervalo intemperizado (entre los 48 y 54 m respecto de la base de la sección) y con presencia de caliche.

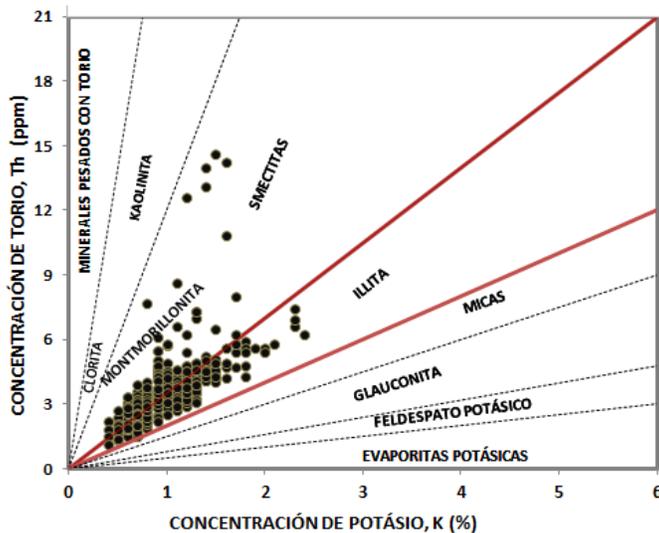


Fig. 4.11 Relación Torio-Potasio (izquierda) de las facies de la sección CH06 (foto de la derecha).

La distribución vertical de los puntos (Fig. 4.14) muestra una oscilación rítmica entre valores cercanos a 3.5 (ppm/%) y una deflexión de la curva hacia valores altos en la región intemperizada con caliche.

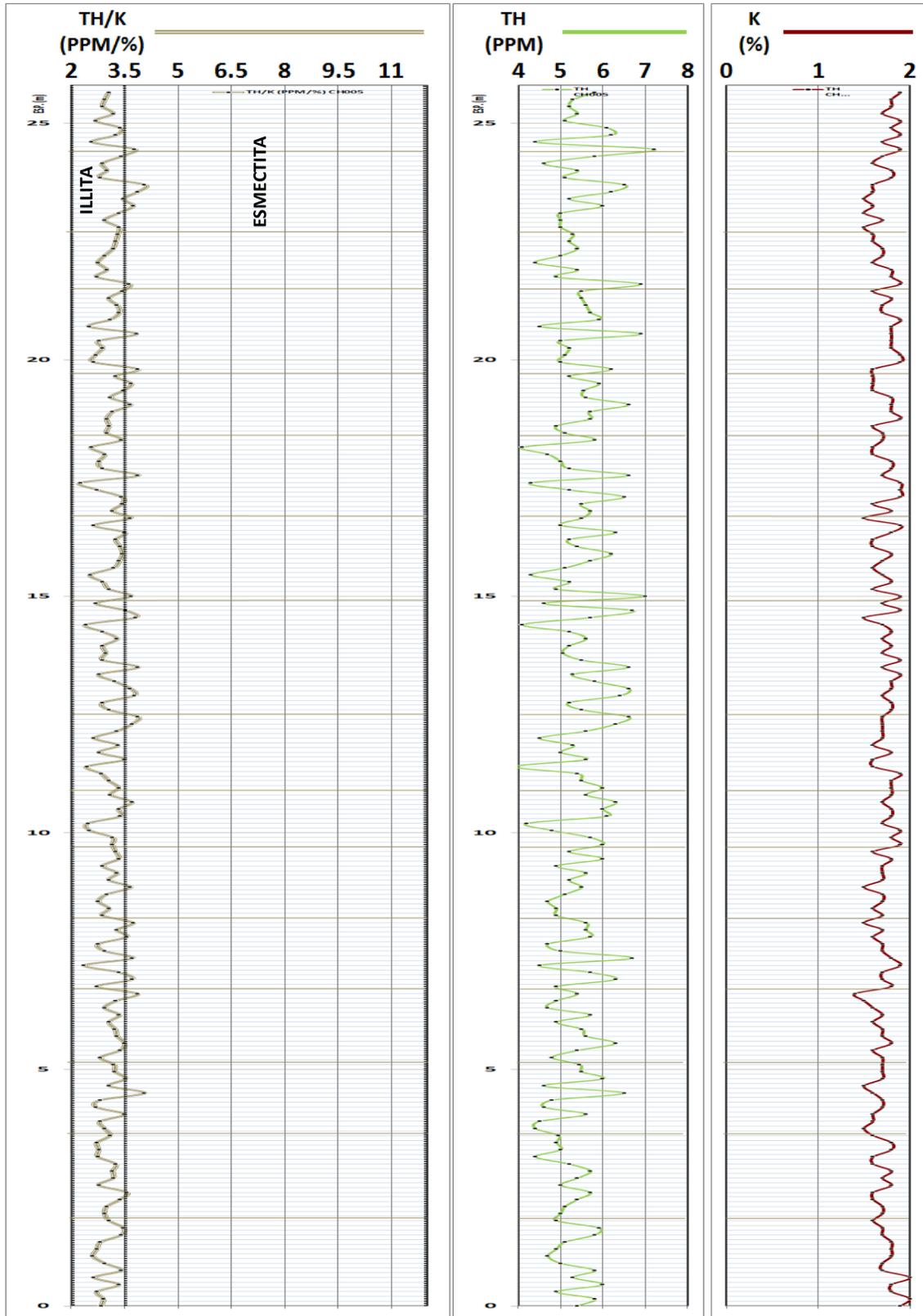


Fig. 4.12. Relación Torio-Potasio a lo largo del espesor de la sección CH05. Escala vertical en metros.

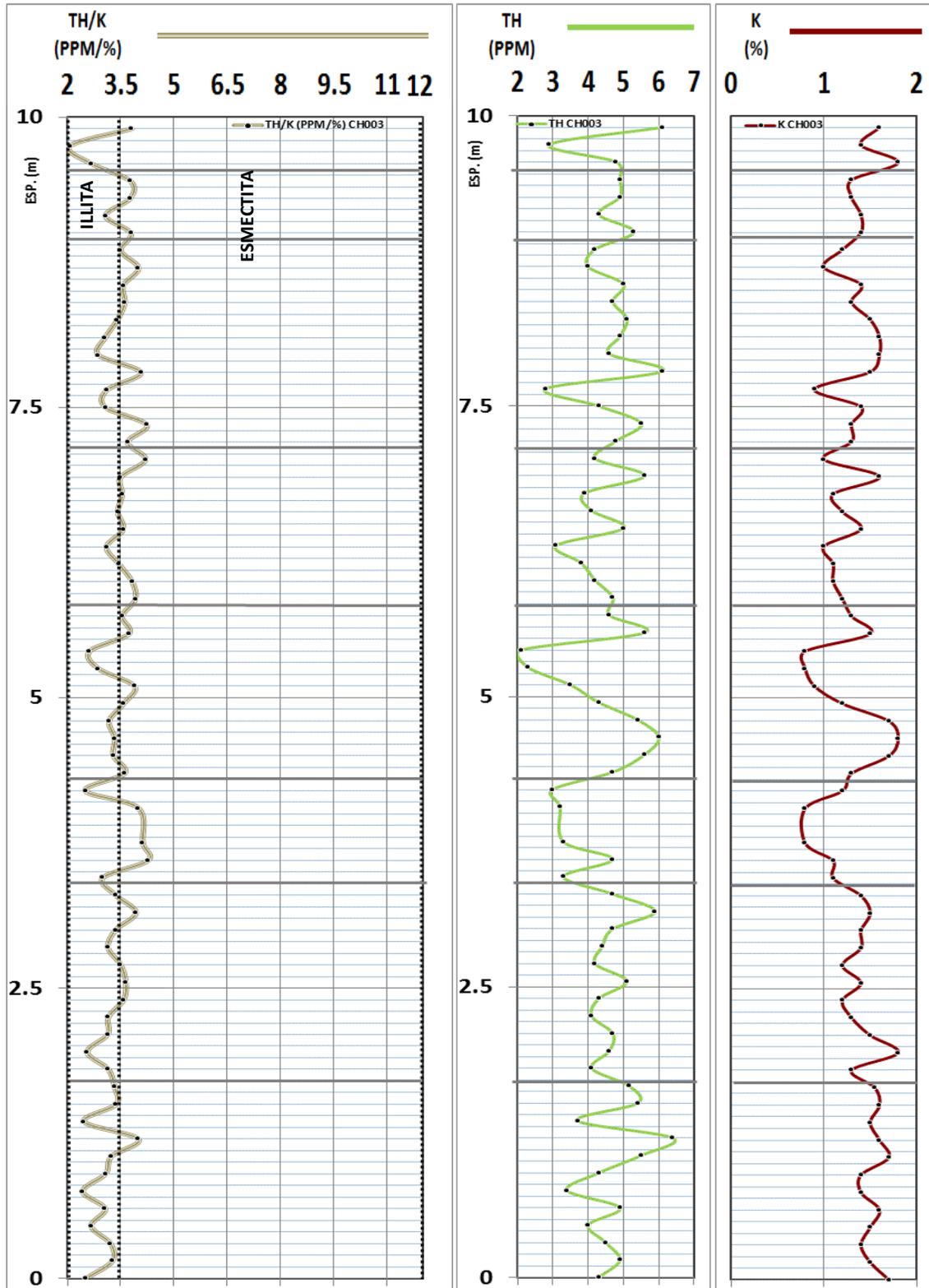


Fig. 4.13. Relación Torio-Potasio a lo largo del espesor de la sección CH03. Escala vertical en metros.

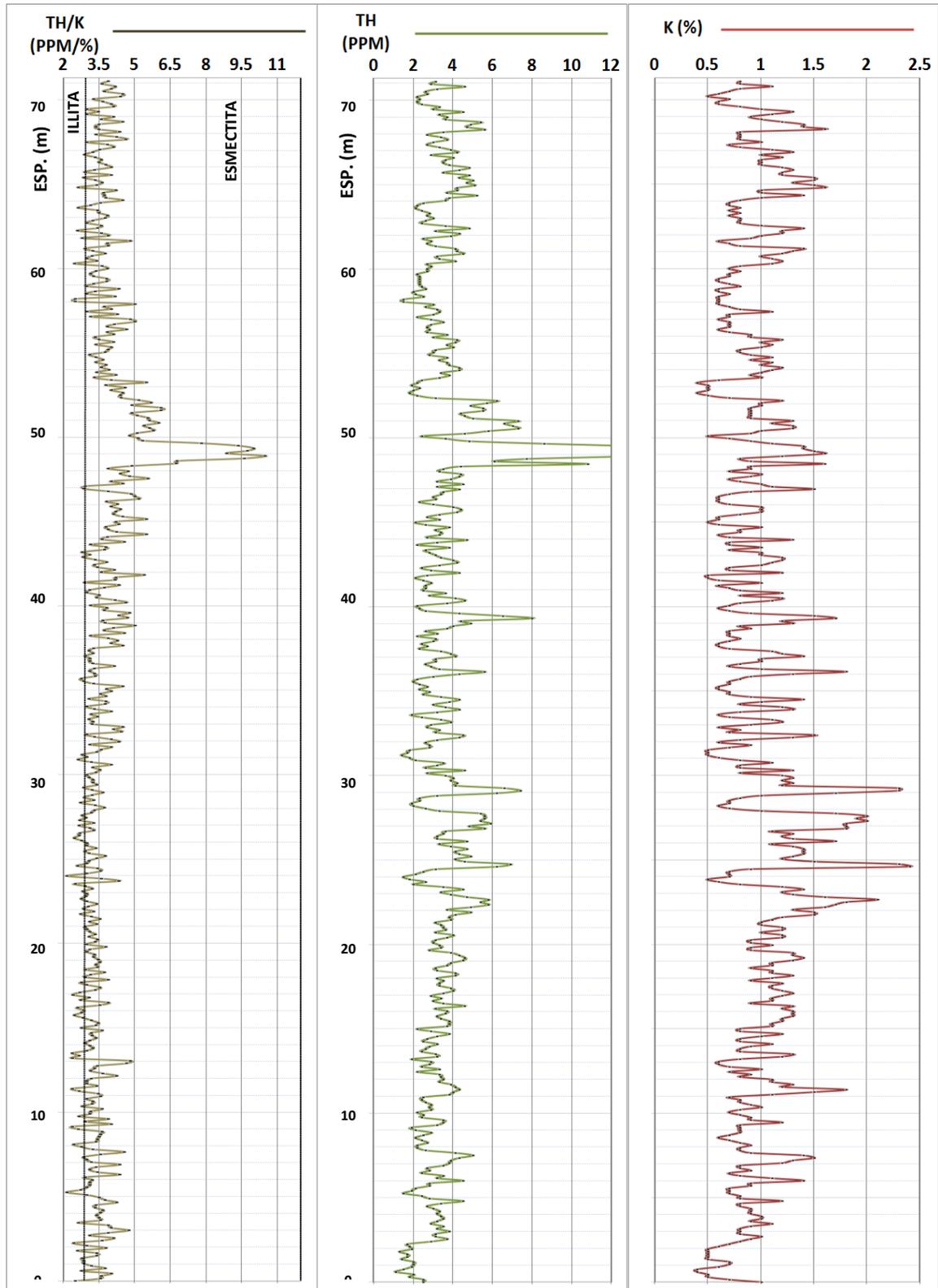


Fig. 4.14. Relación Torio-Potasio a lo largo del espesor de la sección CH06. Escala vertical en metros.

La relación Th/K a lo largo de la sección CH06 está dominada por la curva de Torio, la curva de Potasio se encuentra generalmente por debajo de 1.5 ppm (**Fig. 4.14**). Los valores se encuentran distribuidos en la región de la illita en el intervalo de 0 a 30 m (desde la base de la sección), en el intervalo de 30 a 60 m los valores se encuentran preferentemente en la región de montmorillonitas, mientras que en la parte superior de la sección, se encuentran distribuidos indistintamente en estas dos regiones mineralógicas.

El análisis de las relaciones Th/U de las secciones, se llevó a cabo con el fin de averiguar si existían intervalos en los que se pudieran evidenciar tipos de ambientes depositacionales marinos de oxidación y reducción, siendo indicativos de ambientes de reducción los intervalos en los que existe enriquecimiento de Uranio con valores en la relación Th/U entre 0 y 2, e indicativos de ambientes de oxidación los intervalos en donde se depleta el Uranio y los valores de la relación son mayores a 7. Los valores intermedios entre 2 y 7 indican poco intemperismo y rápida depositación de detritos de rocas ígneas o acumulación de mezclas de materiales (Adams y Weaver, 1958).

En las gráficas de la relación Th/U a lo largo de la sección CH05 (**Fig. 4.15**), se observa que los valores oscilan entre 2 y 5; la curva de Uranio no muestra variaciones importantes, varía constantemente alrededor de 2 ppm. Sin embargo, los picos de la relación Th/U, se encuentran asociados a las tendencias en que sucede un aumento de Torio y una disminución de Uranio simultáneamente. Estos valores intermedios entre 2 y 7 corresponden a lo reportado en la literatura como capas mezcladas (Moon and Chaudhuri, 1976). La tendencia de la relación Th/U es más cercana a la zona que limita a los ambientes de reducción ( $<2$ ), sin embargo, solo pocos puntos aislados se encuentran por debajo de 2. Puesto que la curva de Uranio no muestra deflexiones significativas hacia valores bajos, no se observa ninguna depleción de este elemento que esté asociado a algún evento de oxidación.

En la relación Th/U de la sección CH03 (**Fig. 4.16**), se observa que la curva fluctúa preferentemente entre 2 y 3.5, con algunos valores mayores a 3.5, estos picos altos se deben a la disminución del Uranio junto con un simultáneo aumento de Torio. Los valores de la

relación Th/U de esta sección corresponden a capas mezcladas. La tendencia general de la curva se aproxima a la región que caracteriza al ambiente marino de reducción, sin embargo no existe un intervalo definido por estas condiciones, los valores por debajo de 2 se deben a areniscas en donde el contenido de Torio es bajo.

Los valores de la relación Th/U de la sección CH06, se encuentran por debajo de 2 (ambiente de reducción; **Fig. 4.17**), esto se debe a que los valores de Uranio (asociados al contenido de materia orgánica) son más altos (entre 2 y 4 ppm) respecto a las secciones CH05 y CH03, los valores bajos de Torio que se registraron en esta sección se deben principalmente a los espesores de areniscas. En esta sección el contenido de materia orgánica ocurre indistintamente en estratos de areniscas, lutitas y conglomerados. Cuando la materia orgánica ocurre en areniscas el Torio es bajo y el Uranio alto, lo que se traduce en valores de la relación Th/U menores a 2; cuando ocurre en lutitas e intervalos arcillosos, tanto el Torio como el Uranio son altos y la relación Th/U oscila entre 2 y 4.

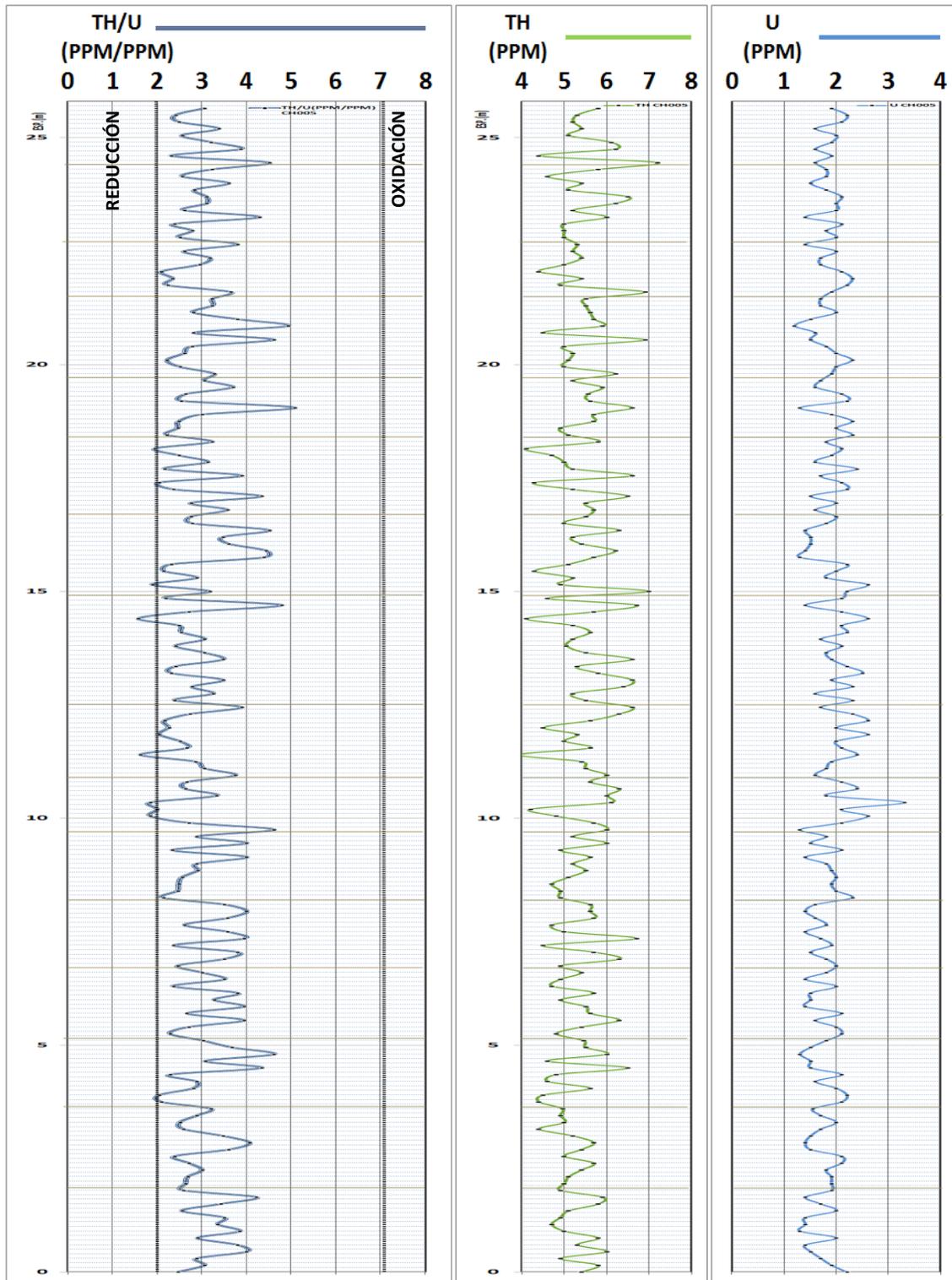


Fig. 4.15 Relación Th/U a lo largo del espesor de la sección CH05. Escala vertical en metros.

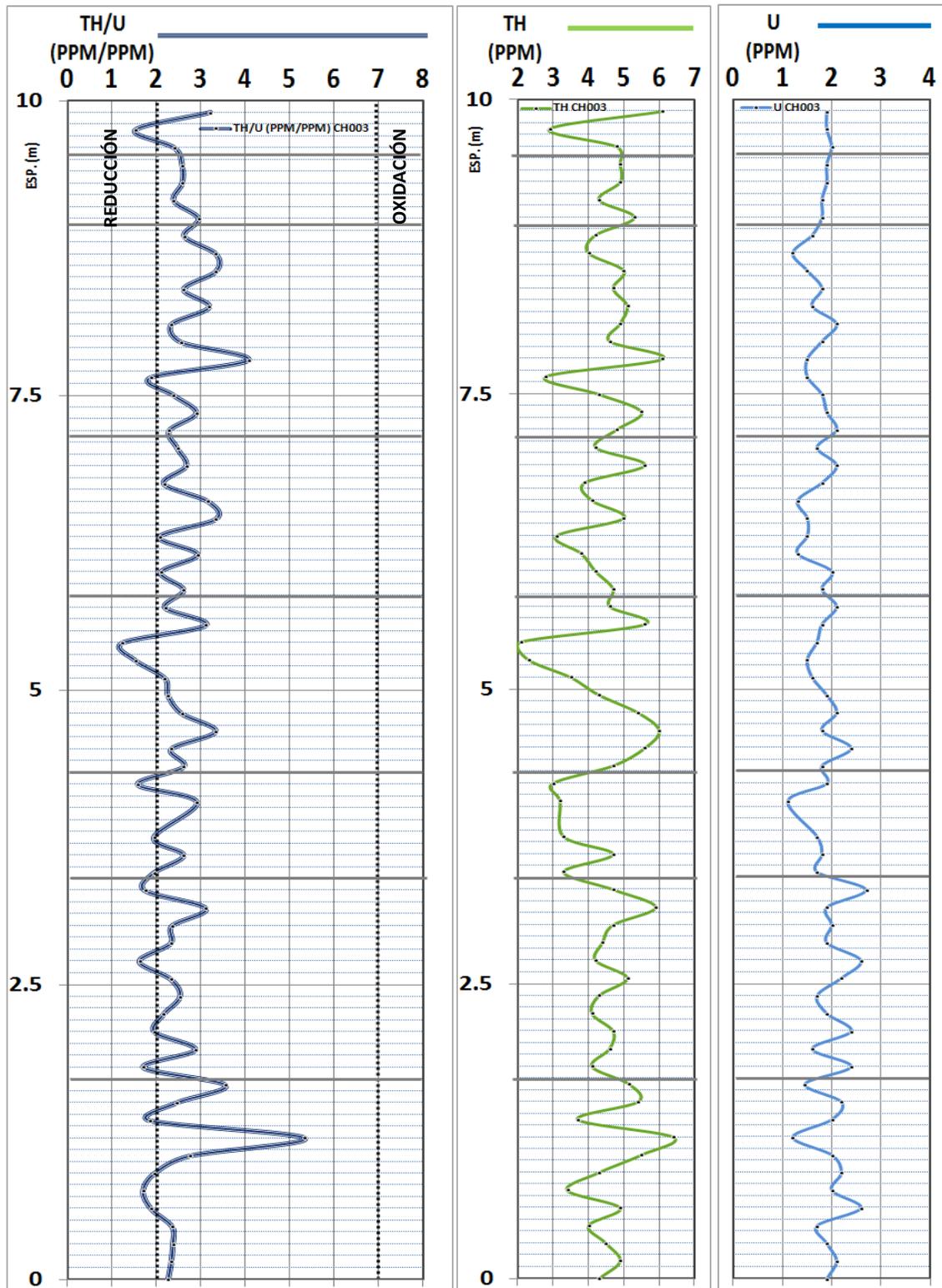


Fig. 4.16 Relación Th/U a lo largo del espesor de la sección CH03.

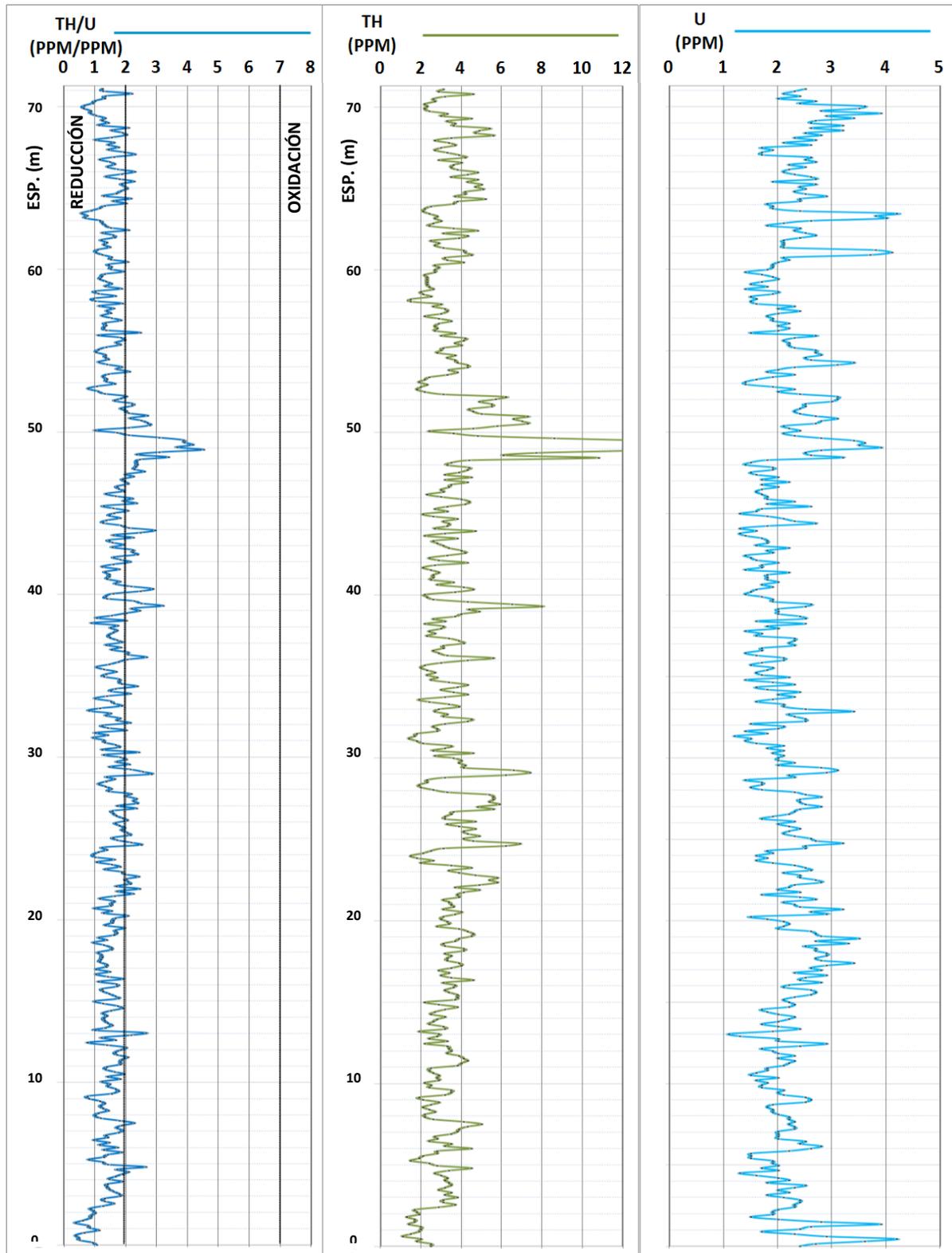


Fig. 4.17 Relación Th/U a lo largo del espesor de la sección CH06. Escala vertical en metros.

#### ***4.5 Obtención de electro-facies a partir de rangos de valores de radioactividad total***

Con el objetivo de generar una mejor comprensión de las facies de la Fm. Chicontepec, se investigó la correlación (mediante el cálculo de electro-facies) de los valores de rayos gamma registrados en los afloramientos con los valores de los registros de rayos gamma de los pozos de la macro pera del campo Coyotes. Para establecer una comparación entre ambos conjuntos de datos, fue necesario homogeneizar las unidades de radioactividad total, por lo cual, los valores de las secciones fueron convertidos a unidades API, mismas en que se miden los registros de rayos gamma de los pozos de perforación. De acuerdo con las equivalencias descritas en Barson *et al.* (2005), la radioactividad total en unidades API, se obtiene mediante de la siguiente relación:

$$\mathbf{RG\ TOT}_{(API)} = \mathbf{16\ K\ (\%)} + \mathbf{8\ U\ (ppm)} + \mathbf{4\ Th\ (ppm)}$$

Una vez conseguido igualar las unidades entre los pozos y las secciones medidas en afloramientos, se definieron 4 facies que cubrieran el rango de 0 a 100 % del volumen de arcilla: areniscas, areniscas arcillosas, lutitas arenosas y lutitas, donde los rangos de valores extremos de radioactividad bajos y altos, representan a las areniscas y las lutitas respectivamente, y los rangos intermedios a areniscas arcillosas y lutitas arenosas.

Los 4 rangos de radioactividad que representan a las facies de la formación y sus niveles de arcillosidad, fueron utilizados para discriminar intervalos en los registros de rayos gamma de las secciones de afloramientos y en los de pozos, de tal forma que se separaron por colores a las respuestas diagráficas que diferencian a un estrato de otro (electro-facies). Distinguidas mediante estos rangos, las electro-facies generadas corresponden a: areniscas limpias (amarillo), areniscas arcillosas (naranja), lutitas arenosas (café) y lutitas (gris) (**Figs. 4.18, 4.19 y 4.20**).

Para definir a los rangos de valores que pueden representar a estas facies, inicialmente fueron utilizados únicamente los registros de los pozos del campo Coyotes. Esta primera aproximación se basó en la observación de los valores mínimos, máximos e intermedios del registro de rayos gamma y en su correlación con otros registros como el de densidad y el

sónico (Rangos R1; **Tabla 4.3**). Posteriormente, estos rangos fueron calibrados con la descripción litológica que realizó el grupo de geología en los núcleos del pozo Coyotes 318 y en cada una de las secciones (Rangos R2 y R3; **Tabla 4.3**).

Los rangos calibrados con los núcleos del pozo Coyotes 318, se aplicaron a los registros de rayos gamma de las secciones medidas en afloramientos y a los registros de rayos gamma de los pozos, observándose que las electro-facies resultantes en la sección CH06 representaban apropiadamente a los cambios litológicos de esta sección. Posteriormente, los rangos se calibraron nuevamente con las descripciones geológicas de las secciones y se aplicaron en los registros de rayos gamma de las secciones y de los pozos. Los rangos utilizados para el cálculo de las electro-facies se muestran en la siguiente tabla (**Tabla 4.3**):

RANGO:	DESCRIPCIÓN
<45 ARENISCA 45-60 ARENISCA ARCILLOSA 60-75 LUTITA ARENOSA >75 ARENOSA	DELIMITADOS MEDIANTE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE REGISTROS DE POZO: RAYOS GAMMA, SÓNICO Y DENSIDAD
20- 42 ARENISCA 42-48 ARENISCA ARCILLOSA 48-55 LUTITA ARENOSA 55-95 LUTITA	DELIMITADOS MEDIANTE CALIBRACIÓN CON NÚCLEOS DEL POZO COYOTES-318
<43 ARENISCA 43-55 ARENISCA ARCILLOSA 55-69 LUTITA ARENOSA >69 LUTITA	DELIMITADOS MEDIANTE CALIBRACIÓN CON LAS SECCIONES MEDIDAS EN AFLORAMIENTOS

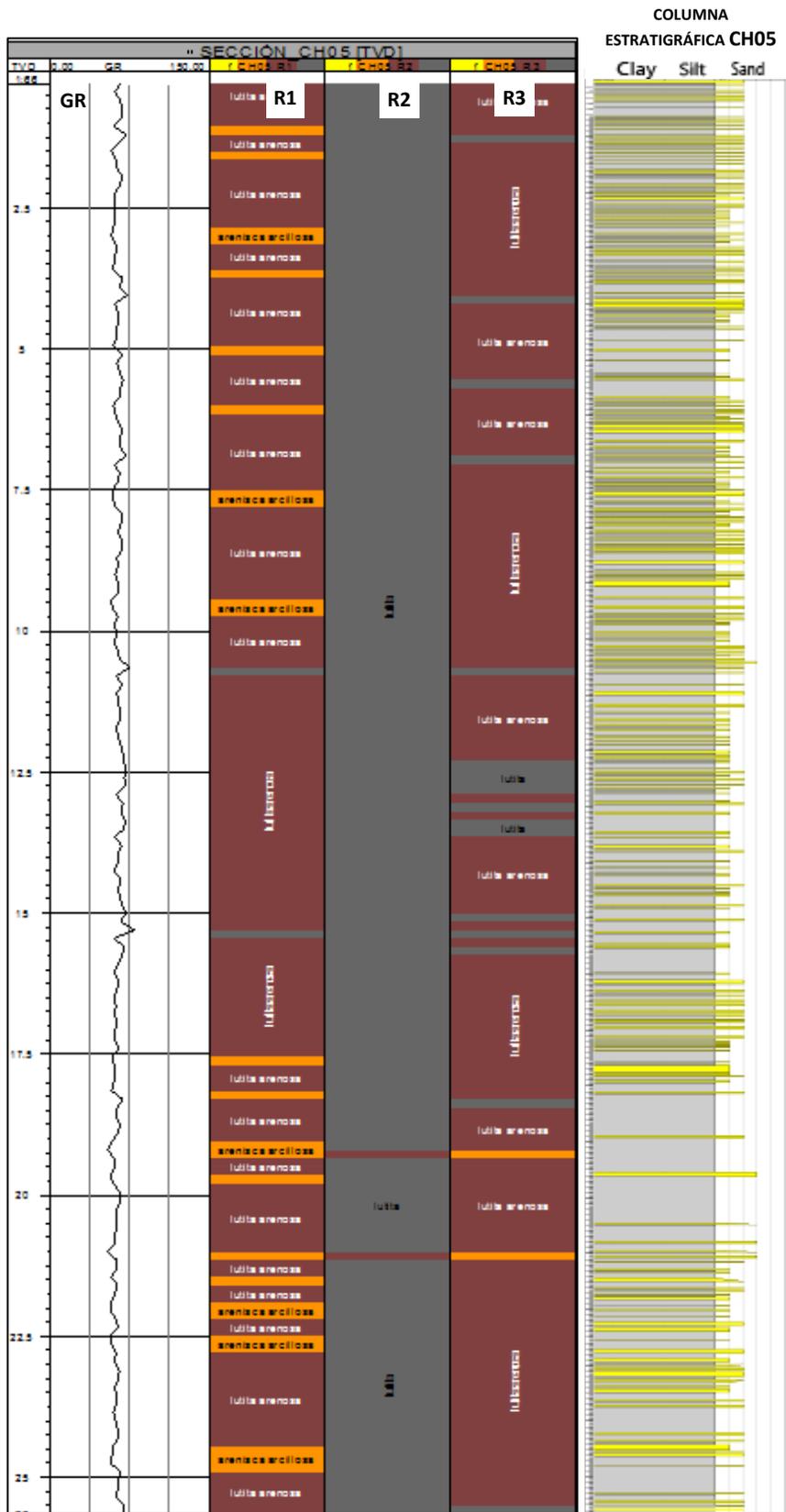
*Tabla 4.3. Rangos de valores de radioactividad total utilizados en el cálculo de electro-facies de la Fm. Chicontepec.*

De la comparación de las electro-facies de las secciones con sus respectivas columnas estratigráficas, se observó que los niveles de arcillosidad altos y bajos son correspondientes con las facies de lutitas y areniscas respectivamente descritas en campo. Sin embargo, las electro-facies no representaron a las intercalaciones de areniscas y lutitas de la sección CH05. La columna estratigráfica de la sección CH05, muestra frecuentes intercalaciones de estratos delgados (menores a 15 cm) de lutitas con areniscas de grano muy fino y fino y pocas intercalaciones de estratos de areniscas de grano medio (**Fig. 4.18**), los tres rangos utilizados son más grandes que los límites de radioactividad en los que varía esta sección, por lo que las

electro-facies resultantes se colorean principalmente de lutitas o lutitas arenosas con muy escasas intercalaciones. En comparación con las otras dos secciones es la más arcillosa, la sección CH03 es intermedia y la CH06 es la más arenosa de todas.

Las electro-facies de la sección CH05 (**Fig. 4.18**) obtenidas con el primer rango, muestran grandes espesores (entre .5 y 5 m) de lutitas arenosas (café) con pocas intercalaciones delgadas de areniscas arcillosas; con el segundo rango, la electro-facies de lutita (gris) colorea casi por completo a todo el espesor de la sección; mientras que el tercer rango muestra electro-facies de grandes espesores de lutitas arenosas (café) con pocas intercalaciones delgadas de lutitas (gris). Con ninguno de los rangos se identifican las intercalaciones rítmicas y frecuentes de los estratos delgados de areniscas (de grano muy fino y fino) descritos en campo, sino que se observan paquetes que agrupan a esta facies principalmente en la electro-facies de lutitas arenosas (café) y lutitas (gris) (**Fig. 4.18**). Esto se debe a que el equipo de medición abarca varios estratos y promedia sus contribuciones radioactivas, produciendo que la curva de rayos gamma total oscile en un rango de valores alto y estrecho (entre 60 y 70 API). La superficie del equipo que se pone en contacto con la roca es de 10 cm, por lo que estratos menores no pueden ser delimitados mediante esta técnica.

En la sección CH03 (**Fig. 4.19**), las intercalaciones frecuentes de estratos delgados a medios (de 2.5 a 43 cm) de arenisca muy fina y fina de color grisáceo con capas delgadas (5 cm) de limos, se agrupan en la electro-facies del primer rango como areniscas arcillosas (naranja) con intercalaciones de lutitas arenosas (café) y algunos estratos de areniscas (amarillo); el segundo rango las electro-facies tienen mayor cantidad de espesores de lutitas (gris) con intercalaciones de lutita arenosa (café) seguida de arenisca arcillosa (naranja) y arenisca (amarillo) en menor cantidad; el tercer rango colorea mayor cantidad de lutitas arenosas (café) con intercalaciones de areniscas arcillosas (naranja) seguidas de areniscas (amarillo). En las electro-facies resultantes de los registros de rayos gamma total de esta sección, no se observa una correlación directa entre los espesores de areniscas y lutitas con los espesores de la columna estratigráfica, esto se debe a que el levantamiento de la sección estratigráfica y la adquisición de rayos gamma no se llevaron a cabo simultáneamente.



*Figura 4.18. Registro de rayos gamma total de la sección CH05 en unidades API y electro-facies calculadas a partir de los 3 rangos de radioactividad (R1 calibrado con registros DT y RHOB; R2 calibrado con núcleos del pozo Coyotes 318; R3 calibrado con secciones medidas en afloramientos). Columna estratigráfica y facies de la sección CH05.*

Es decir, el control de la distancia es diferente en los dos levantamientos, por lo que algunos intervalos se encuentran elongados o comprimidos respecto a la columna estratigráfica, las distancias de las electro-facies y las de la columna se encuentran ligeramente desplazadas. Sin embargo, los espesores de arenisca de las electro-facies (obtenidas con los tres rangos) corresponden a espesores de arenisca fina y a los escasos espesores de arenisca media de la sección estratigráfica, mientras que la electro-facies de areniscas arcillosas, lutitas arenosas y lutitas corresponden a los espesores de areniscas finas y muy finas que dominan en la columna de esta sección (**Fig. 4.19**).

Las facies de la sección CH06 (**Fig. 4.20**) son más arenosas que las otras dos secciones (estratos delgados, medios y gruesos, desde 1cm a 3 m de espesor de areniscas finas, muy finas, medias, gruesas y muy gruesas con conglomerados y lutitas), sus correspondientes electro-facies en el rango uno se presenta predominantemente como espesores de arenisca (amarillo) con intercalaciones de areniscas arcillosas (naranja) y pocas lutitas arenosas (café); las electro-facies del segundo rango delimitan bien a los espesores mayores a 10 cm de areniscas y lutitas de la columna estratigráfica, sin embargo, en intervalos donde ocurren intercalaciones frecuentes de estratos delgados de la facies de areniscas con pocas lutitas, la electro-facies se presenta como intercalaciones de lutitas arenosas (café) y lutitas (gris); las electro-facies del tercer rango también delimitan bien a los espesores mayores a 10 cm de las facies de areniscas y lutitas, a diferencia del segundo rango, en donde ocurren intercalaciones de estratos menores a 10 cm de la facies de arenisca y lutitas, se colorean intercalaciones de areniscas arcillosas (naranja) y lutitas arenosas (café). Sin embargo, se debe considerar que la variedad de facies que se tienen en esta sección no se encuentra totalmente representada por la columna estratigráfica. Por ejemplo, todos los intervalos marcados en la columna como conglomerados son de color naranja, y esta representación no contempla su composición matricial. La mayoría de los conglomerados están soportados por una matriz areno-arcillosa con contenido de materia orgánica variable, pero existen otros que corresponden a conglomerados lodo soportados, su matriz está compuesta por sedimentos muy finos y arcillosos. Las electro-facies de los conglomerados lodo soportados responden al contenido de arcillas presente en la matriz y no a los clastos, presentándose como lutitas arenosas y lutitas.





Los rangos aplicados al cálculo de electro-facies de los pozos del campo Coyotes, producen el mismo efecto que en las secciones medidas en afloramientos, las calculadas con el primer rango (R1) son las más arenosas, le siguen la del tercer rango (R3) y las más arcillosas son las del segundo rango (R2), las electro-facies calculadas con el primer rango, colorean al pozo con más espesores arenosos (amarillo); las resultantes del segundo rango lo representan con mayores cantidades de lutitas (gris); mientras que las del tercer rango son intermedias. Se compararon las electro-facies en el pozo Coyotes 318, ya que fue el utilizado para calibrar el segundo rango con sus núcleos (**Fig. 4.21**), en él se observa que los cuellos arcillosos delimitados por las electro-facies del segundo rango, como lutitas (gris), se transforman en electro-facies del tercer rango, en intervalos de areniscas arcillosas (café). Así también, los espesores de lutita (gris) en la parte superior del pozo (entre 550 y 900 m de profundidad) en la electro-facies del segundo rango, se convierten en espesores de lutitas arenosas (café) en la electro-facies del tercer rango. También aparecen más espesores de areniscas (amarillo) y areniscas arcillosas (café) con los rangos 1 y 3, mientras que con el segundo rango se observa más arcillosos (gris). Los cuellos arcillosos en electro-facies del segundo se encuentran bien correlacionados con los valores bajos del registro de densidad (RHOB) y altos del sónico (DT), excepto en la parte superior e inferior del pozo (de 550 a 900 m y 1300 a 1400 m de profundidad respectivamente), donde espesores potentes de lutita, tienen densidades altas (**Fig. 4.21**).

La obtención de las electro-facies en secciones de afloramientos y en los pozos del campo Coyotes, permitió establecer una comparación y un mejor conocimiento del comportamiento de los registros de rayos gamma de los pozos en las facies de la Fm Chicontepec. Del análisis de electro-facies de afloramientos se observó que algunas areniscas se encuentran cementadas y no tienen porosidad, tales areniscas probablemente se encuentren presentes en los pozos del campo Coyotes, ya que se observan asociados a estos intervalos, valores bajos en el tiempo de tránsito medido con el registro DT y altas densidades en el registro RHOB (**Fig. 4.21**).

Otro aspecto que se puede observar es que, no existen en ninguna de las secciones medidas, intervalos de lutitas de más de 1 m de espesor, por lo que las electro-facies de los pozos que

presentan potentes espesores de lutitas probablemente se deben a intercalaciones de estratos delgados de areniscas y lutitas como los encontrados en la sección CH05.

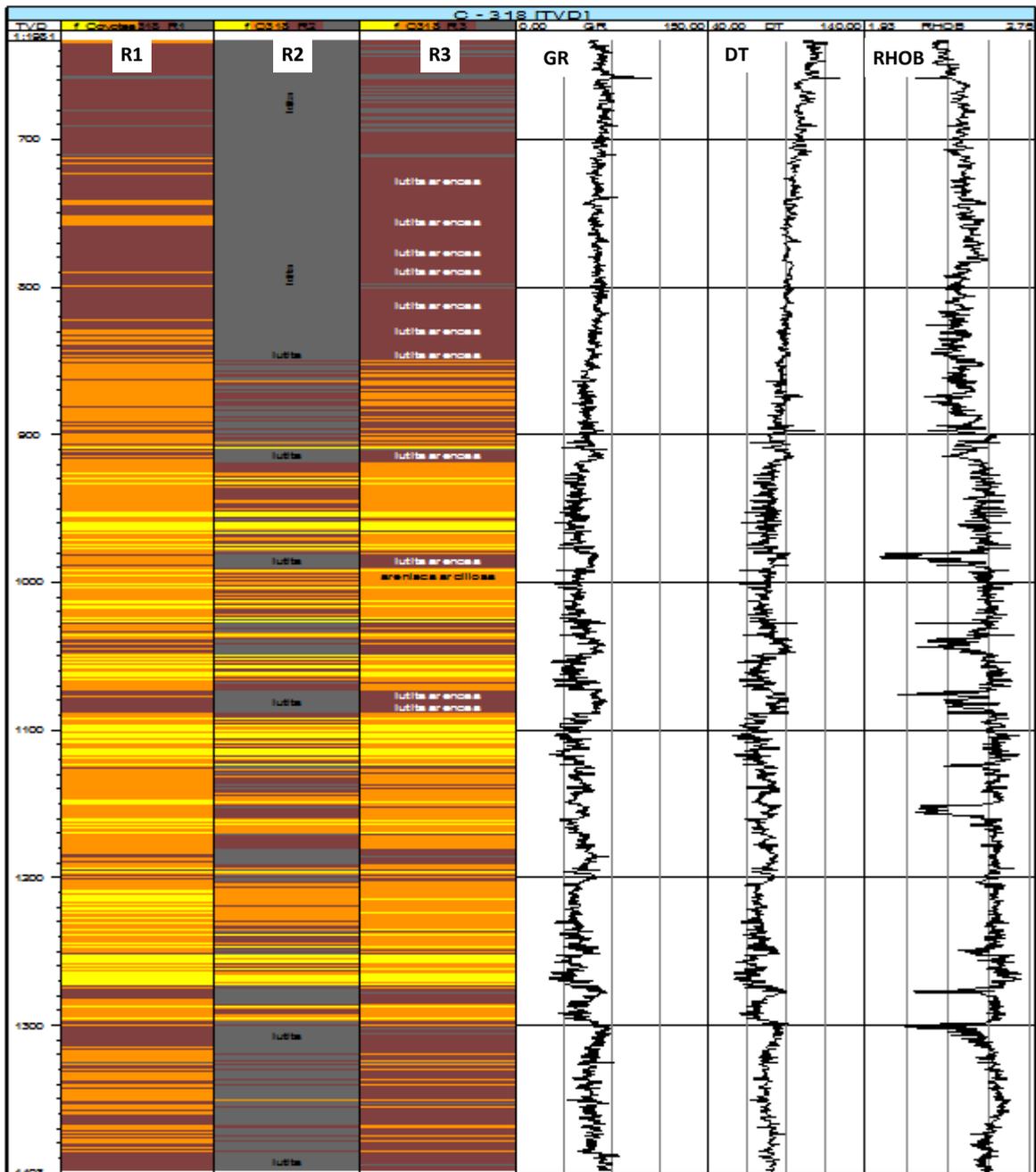
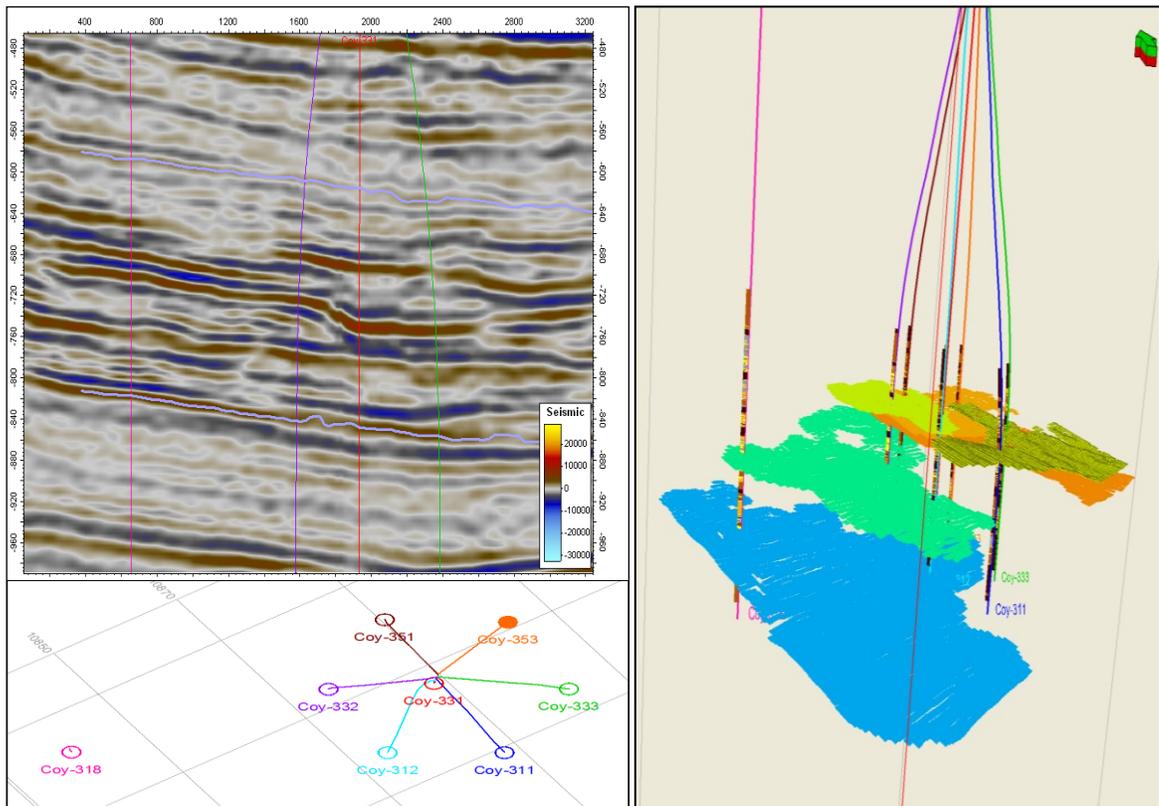


Figura 4.21. Comparación de electro-facies del pozo Coyotes 318 calculadas a partir de los tres rangos de radioactividad (R1, R2 y R3). Registros de rayos gamma total, DT y RHOB (derecha).

## ***CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE ESPESORES DE ELECTRO-FACIES DE LA FORMACIÓN CHICONTEPEC***

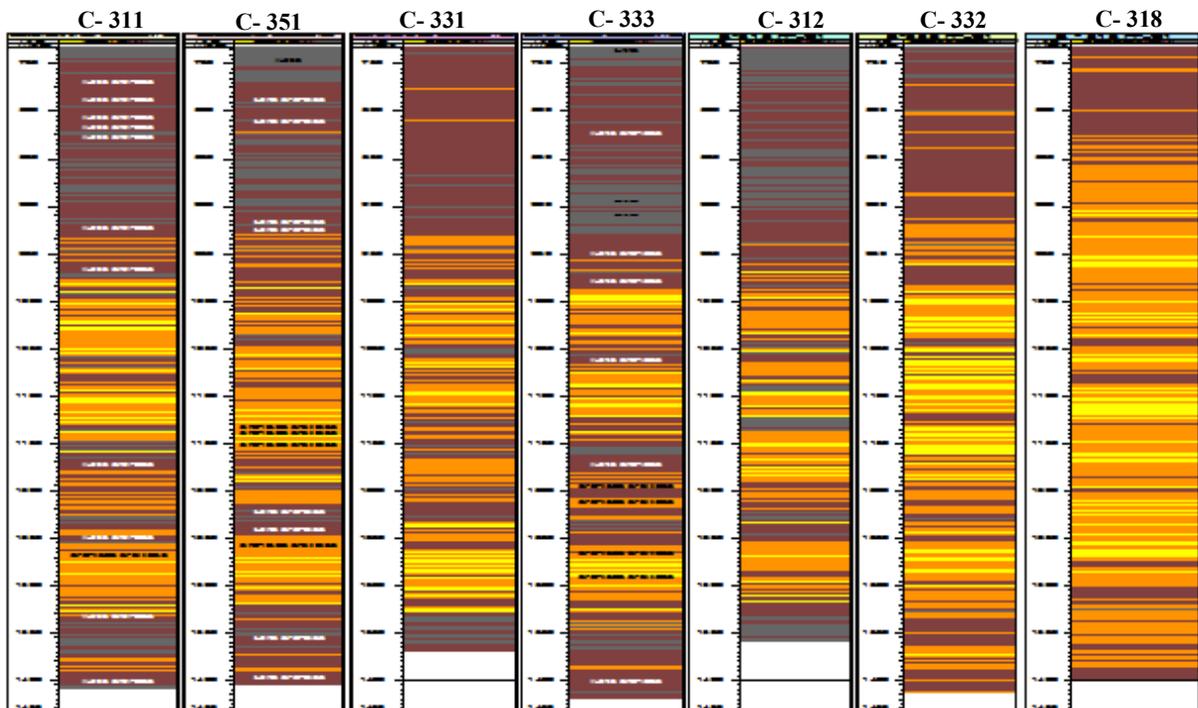
Las facies de la formación Chicontepec, se caracterizan por presentar una distribución lateral y vertical heterogénea (**Fig. 5.1, izda.**). En el análisis e interpretación del cubo sísmico que contiene a la macro pera del pozo Coyotes 331, se observó que existe poca continuidad lateral entre los horizontes sísmicos a esta escala (**Fig. 5.1, dcha.**). Esta heterogeneidad en el yacimiento, complica la correlación entre pozos, por lo que se propuso analizarla en términos de las distribuciones de los espesores de electro-facies en los pozos.



***Fig. 5.1. Sección sísmica que atraviesa los pozos Coyotes 318, 331,332 y 333 (izquierda). Horizontes sísmicos interpretados (derecha). La señal sísmica que representa al subsuelo es heterogénea y los horizontes no tienen continuidad en todos los pozos.***

En este análisis se utilizaron los 6 pozos de la macro pera Coyotes 331 (pozos Coyotes 331 (central), 311, 312, 332, 333, 351) y el pozo Coyotes 318 (fuera de la macro pera), con cuyos registros de rayos gamma total, se calcularon las electro-facies de: areniscas (amarillo), areniscas arcillosas (naranja), lutitas arenosas (café) y lutitas (gris) (**Fig. 5.2**).

Los rangos de radioactividad utilizados en el cálculo de éstas electro-facies, fueron los calibrados con los registros sísmico (DT) y de densidad (RHOB) de los pozos (0 a 45 API: areniscas; 45 a 60 API: areniscas arcillosas; 60 a 75 API: lutitas arenosas; mayores a 75 API: lutitas) (**Fig. 5.2**). Los espesores de estas electro-facies, fueron obtenidos en hojas de cálculo (Excel), como la diferencia entre la cima y la base de los valores de profundidad verdadera (TVD) en que ocurría cada facies y fueron asociados a la profundidad a la mitad de cada espesor.



*Fig. 5.2. Electro-facies de los pozos Coyotes 311, 351, 331, 333, 312, 332 y 318 respectivamente, calculadas a partir del registro de rayos gamma total de los pozos, rango R1.*

La distribución de estos espesores, se contempló desde el punto de vista de los fractales determinísticos (mediante leyes de potencia y gráficos log-log) y desde fractales estadísticos (mediante el índice de Hurst y gráficos “Hurst Test”).

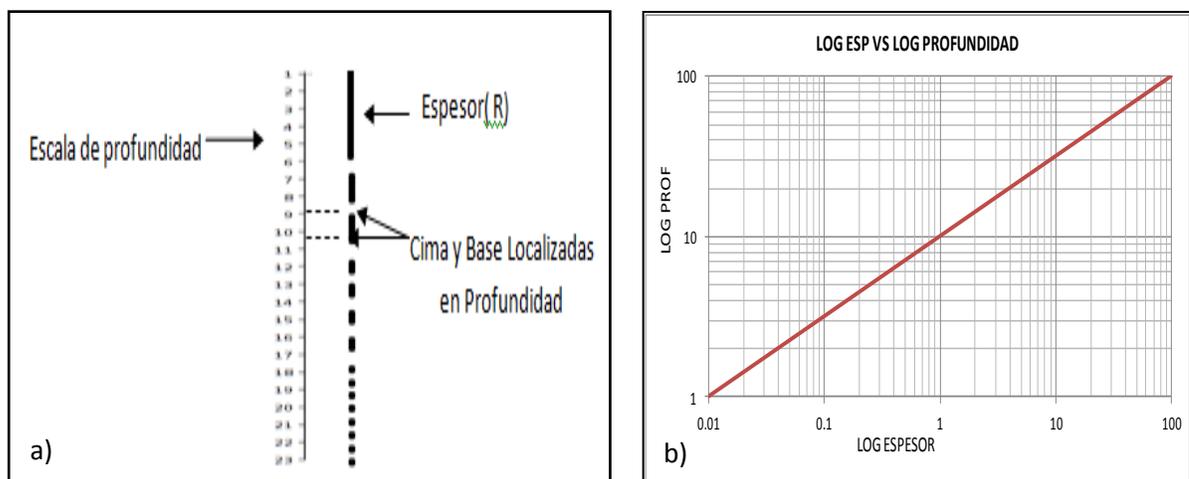
### 5.1 Análisis de la distribución de espesores de electro-facies en pozos del campo Coyotes mediante leyes de potencia

El análisis de la distribución de los espesores contempló inicialmente una analogía de la distribución del Conjunto de Cantor, ya que se ha reportado en la literatura (Hlebszevitsch y Breda, 2001), como un modelo apropiado para describir distribuciones de espesores de turbiditas desde el punto de vista fractal. En el conjunto de Cantor, una serie de subintervalos sigue una distribución en forma de ley de potencias del tipo:

$$N=R^D, \text{ dónde:}$$

$N$  es el número de subintervalos en los que se divide un segmento igual a la unidad,  $R$  es la magnitud o valor de los subintervalos y  $D$  es un exponente de escala.

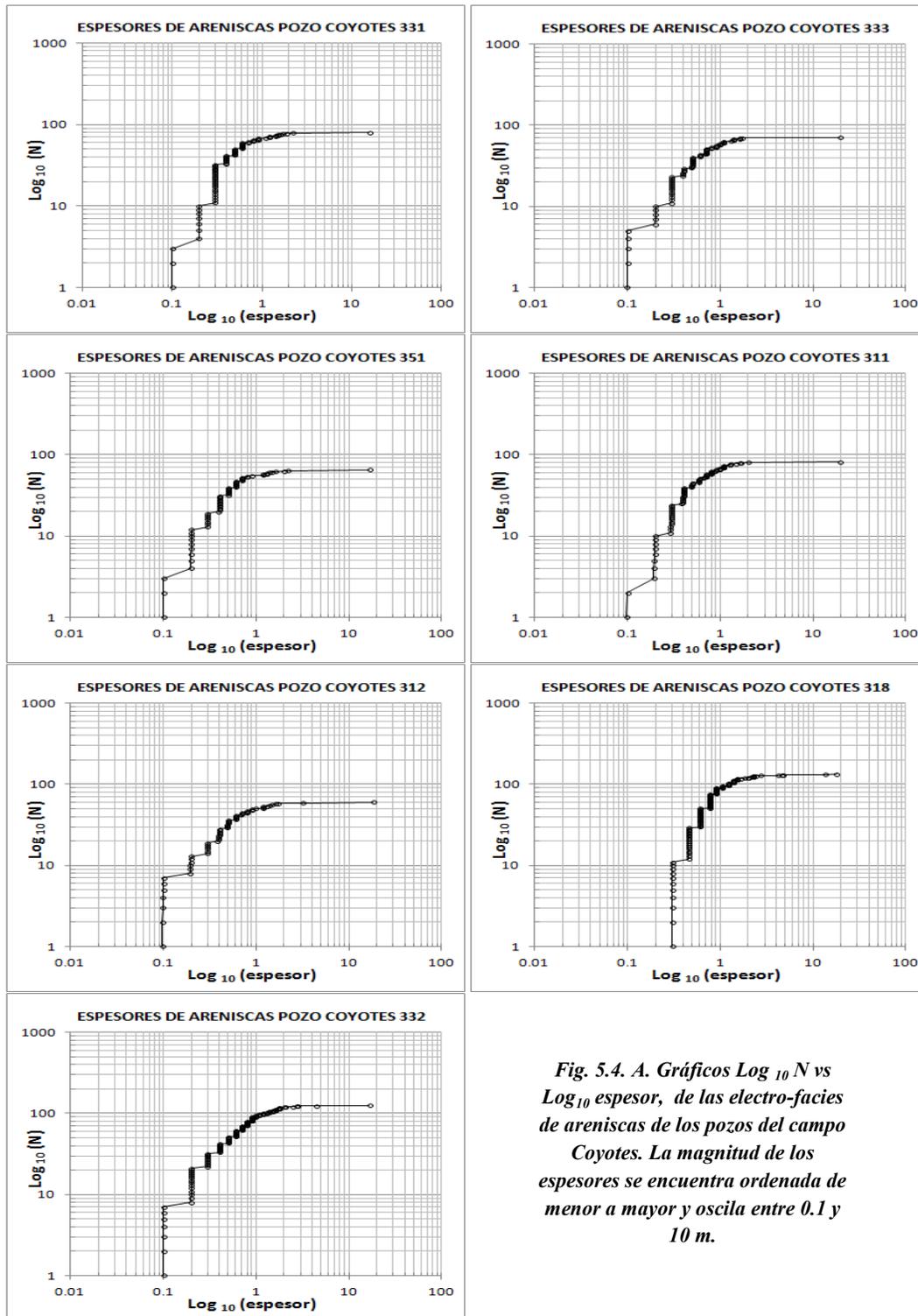
Este método se aplicó a la distribución de los espesores de electro-facies en el subsuelo, donde  $N$  es la profundidad en el punto medio del espesor y  $R$  es la magnitud del espesor. De tal forma que la distribución lineal entre estas dos variables, en gráficos bilogarithmicos, indica un aumento o disminución exponencial en la magnitud de los segmentos (espesores de electro-facies) (**Fig. 5.3**).



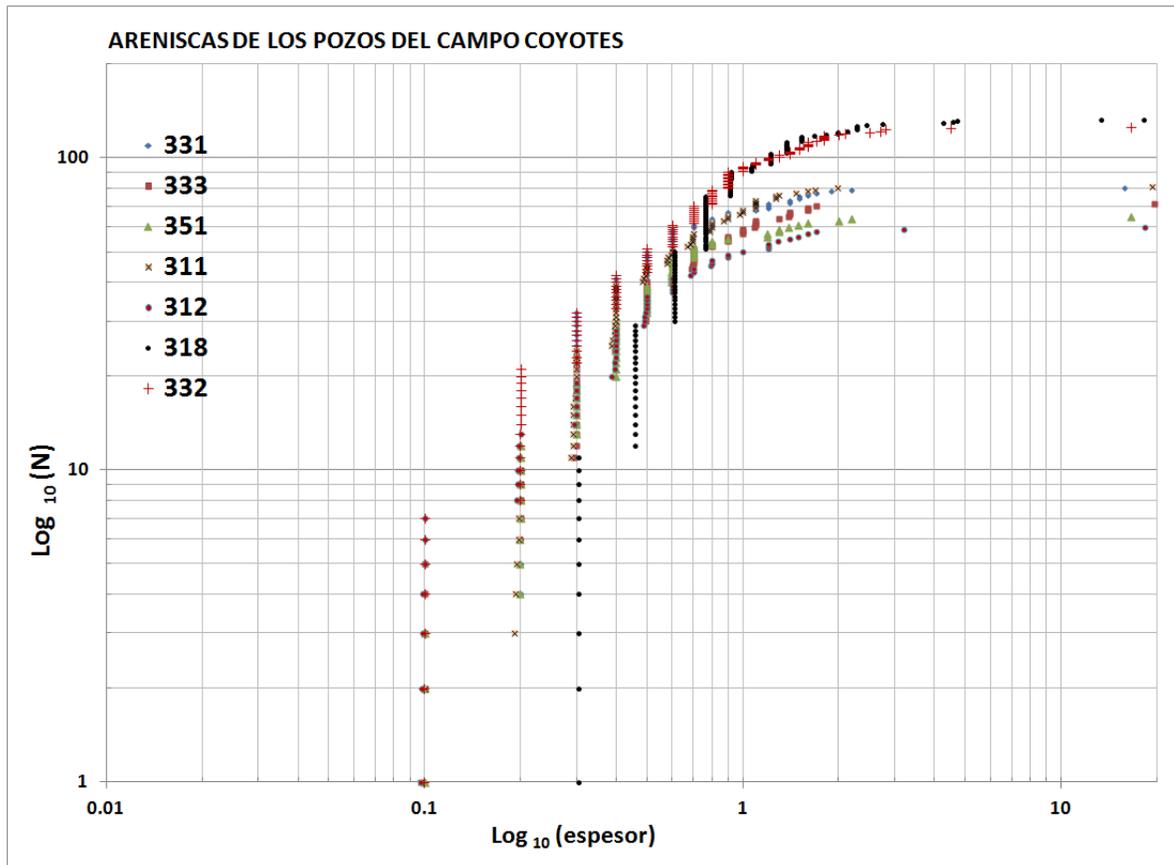
**Fig. 5.3. a) Distribución vertical ideal de segmentos (espesores) que se ajusta a una ley de potencias. b) su correspondiente expresión en gráficos bilogarithmicos (log espesor vs log profundidad), en donde  $N$  es la profundidad localizada a la mitad del espesor,  $R$  es la magnitud de los espesores y  $D$  es un exponente de escala.**

La ley de potencias que resulta de estas distribuciones es parte del análisis determinístico fractal, es decir, un comportamiento ideal de los espesores daría como resultado un ajuste lineal de la ley de potencias. Sin embargo, en la realidad los espesores no tienen tal comportamiento y para evidenciar alguna tendencia en los patrones de apilamiento de los estratos, se ha recurrido a las técnicas de los fractales estadísticos.

El análisis fractal se inició utilizando la metodología sugerida por Rothman y Grotzinger (1995), la cual consiste en identificar en gráficos bilogarítmicos ( $\text{Log}_{10} N$  vs  $\text{Log}_{10}$  espesor) a los exponentes de escala mediante regresión lineal, que diferencian a dos grupos de espesores (estos autores encontraron que los espesores de flujos de detritos tienen un ajuste lineal diferente que los espesores de turbiditas). De acuerdo con esto, los espesores de las electro-facies de areniscas fueron graficados en escalas bilogarítmicas del espesor contra el número de capa ( $\text{Log}_{10} N$  vs  $\text{Log}_{10}$  espesor) (**Fig. 5.4. A.**), estos gráficos se utilizaron para observar si existían tendencias en las que se pudiera aplicar el método de regresión lineal para encontrar el exponente de escala, **D** (dimensión fractal). Los espesores de la electro-facies de areniscas se encuentran en un rango aproximado de 0.01 a 20 m, la cantidad de espesores utilizados es de alrededor de 100 valores para esta litología en todos los pozos. En estas gráficas bilogarítmicas, los espesores se encuentran ordenados de menor a mayor magnitud y la profundidad no es un parámetro incluido. Todos estos gráficos tienen comportamientos similares, sin embargo, varían en diferentes magnitudes de espesores. Al comparar todos los pozos en un solo gráfico bilogarítmico (**Fig. 5.4. B.**), se encontraron coincidencias entre los pozos 318 y 312, estos pozos tienen una tendencia lineal diferente al resto de los pozos, en espesores mayores a 1 m, esto probablemente se deba a que las distribuciones podrían ser parecidas por la cercanía entre estos pozos. También se observó que no se puede ajustar una única línea de tendencia para todos los datos y, puesto que los espesores se encuentran ordenados, no nos dan información acerca de su posición en el subsuelo, por lo que se decidió asociar a la profundidad a lo largo del pozo, en la que se localizaban los espesores.

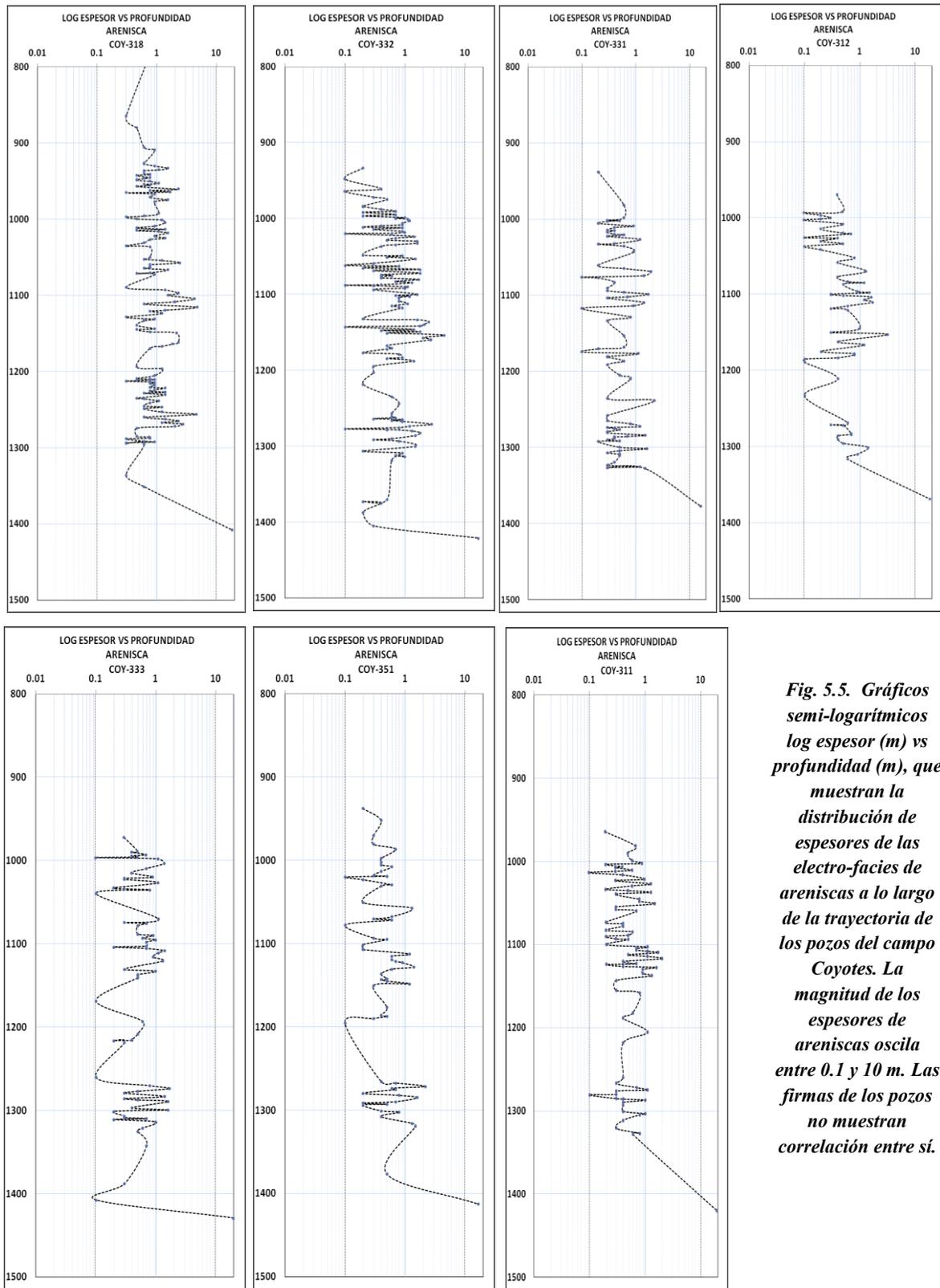


*Fig. 5.4. A. Gráficos  $\text{Log}_{10} N$  vs  $\text{Log}_{10}$  espesor, de las electro-facies de arenas de los pozos del campo Coyotes. La magnitud de los espesores se encuentra ordenada de menor a mayor y oscila entre 0.1 y 10 m.*



*Fig. 5.4. B. Gráfico  $\text{Log}_{10} N$  vs  $\text{Log}_{10}$  espesor de las electro-facies de areniscas de los pozos del campo Coyotes. La magnitud de los espesores se encuentra ordenada de menor a mayor. Se observa que para los espesores mayores a 1 m, los pozos 312 y 318 se alinean diferente que el resto de los pozos.*

Para visualizar la distribución de los espesores de esta electro-facies, contemplando su profundidad, se graficó de forma semi-logarítmica la magnitud del espesor contra la profundidad localizada a la mitad del espesor ( $\text{Log}_{10}$  espesor vs profundidad) (Fig. 5.5). En estos gráficos semi-logarítmicos, las deflexiones hacia valores bajos, indican adelgazamiento de los espesores mientras que deflexiones hacia valores altos indican engrosamiento. Estas curvas no presentan firmas similares en ninguno de los pozos, por lo que no se puede establecer una correlación entre ellas.



*Fig. 5.5. Gráficos semi-logarítmicos log espesor (m) vs profundidad (m), que muestran la distribución de espesores de las electro-facies de areniscas a lo largo de la trayectoria de los pozos del campo Coyotes. La magnitud de los espesores de areniscas oscila entre 0.1 y 10 m. Las firmas de los pozos no muestran correlación entre sí.*

### ***5.2 Análisis de la distribución de espesores de las electro-facies mediante el índice de Hurst***

Con el objetivo de caracterizar desde el punto de vista fractal estadístico a las electro-facies de los pozos del campo Coyotes, se aplicó el método de Rango-Reescalado (R/S) descrito (en el marco teórico) por Chen y Hiscott (1999). Dicha metodología, se resume en calcular la media y la desviación estándar (**S**) de los logaritmos de los espesores y generar gráficas de las diferencias acumuladas desde la media contra el número de espesores **N** (“Hurst Test”), con las que se calcula el rango (**R**). Posteriormente, los valores son utilizados para el cálculo del índice de Hurst (**K**), donde:

$$K = \text{Log} (R/S) / \text{Log} (N/2)$$

El análisis estadístico de Hurst, aplicado a los espesores del campo Coyotes, consistió en primera instancia en determinar si el conjunto de datos era adecuado y cumplía con los requisitos básicos para ser tratado con esta metodología. El primer objetivo fue probar que el conjunto de datos no seguía una tendencia normal o gaussiana que impidiera el tratamiento de los datos desde el punto de vista fractal. Los datos utilizados fueron los espesores de las electro-facies de arenisca, arenisca arcillosas y lutitas arenosas de los pozos del campo Coyotes; para determinar el tipo de distribución de los espesores de estas electro-facies, se graficó dicho espesor contra su frecuencia de ocurrencia en histogramas (**Figs. 5.6 y 5.7**) y se calcularon los principales descriptores estadísticos que se contemplan en los Análisis Exploratorios de Datos (A.E.D.)

Los descriptores estadísticos de la localización de la tendencia central calculados fueron: la media, la mediana, la moda, y la media recortada. Si los datos provienen de una distribución normal, la media, mediana, moda y media recortada son todas iguales. Si la media y la mediana son muy diferentes, lo más probable es que haya valores fuera del comportamiento de los datos o la distribución es asimétrica. En este caso, la mediana es posiblemente la mejor medida de localización. La media es muy sensible a los valores extremos o puede contaminarse seriamente con una sola observación.

Las medidas de dispersión que se analizaron fueron la varianza y la desviación estándar. Estas cuantifican que tan cerca caen los datos alrededor del centro. Hay mediciones numerosas de

variabilidad: rango, varianza, desviación estándar, rango intercuartil, y otros. En algún grado, los valores fuera de comportamiento afectan a todas estas mediciones de dispersión, pero algunas tienen un desempeño mucho mejor que otras. La desviación estándar es una de las medidas más básicas de dispersión. Sin embargo, está influida en gran manera por las observaciones fuera de rango y la forma general de la distribución.

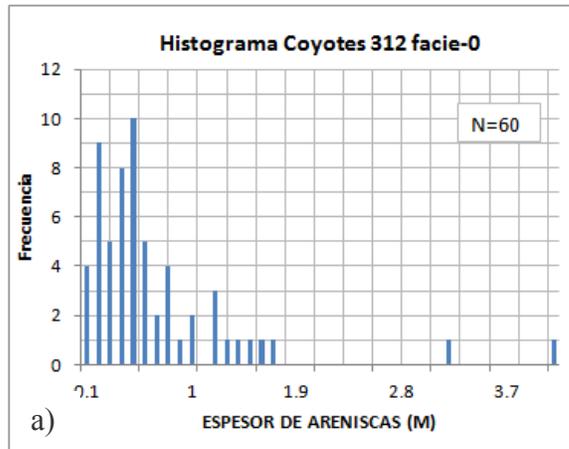
La forma de la distribución que describe el patrón de valores a lo largo de la recta numérica se analizó mediante, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis. Estos parámetros son indicativos valores únicos que ocurren una y otra vez o de la continuidad. La asimetría mide la dirección y ausencia de simetría, los valores positivos indican que la cola es más larga hacia la derecha, mientras que los negativos indican una cola izquierda más larga. La curtosis mide el peso de estas colas:

➤ ***Coficiente de asimetría ( $g1$ ):*** Se define como el cociente entre el tercer momento y el cubo de la desviación típica, mide la asimetría de la distribución, es decir, si existen o no observaciones muy extremas en algún sentido con frecuencias razonablemente altas. Si la asimetría es negativa, la variable toma valores muy bajos con mayor frecuencia que valores muy altos y se dice que tiene una cola izquierda pesada o que es asimétrica hacia la izquierda. Si la asimetría es positiva, la variable toma valores muy altos con mayor frecuencia que valores muy bajos y se dice que tiene una cola derecha pesada o que es asimétrica hacia la derecha. Si la asimetría es cero, los valores bajos y altos de la variable tienen probabilidades iguales (distribución normal).

➤ ***Coficiente de curtosis ( $g2$ ):*** Se define como el cociente entre el cuarto momento y el cuadrado de la varianza, al que se le resta 3 unidades (que es la curtosis de la distribución normal y mide la forma de la distribución de probabilidad. Al representar gráficamente variables con curtosis pequeña, platicúrticas, se observan curvas o histogramas con colas cortas y aspecto aplanado o en meseta; si la variable tiene curtosis grande, es decir, si es leptocúrtica, su gráfica es alta y estilizada, con colas largas y pesadas. Un valor de curtosis menor que cero indica que las colas son menos pesadas que en una distribución normal;

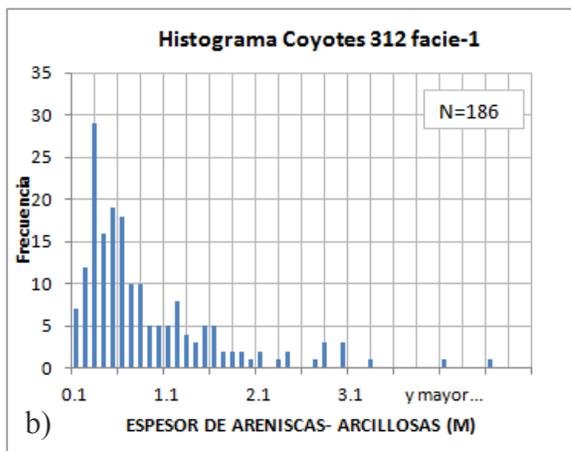
valores de curtosis mayores que cero indican colas más pesadas que las de la distribución normal (si  $g_2 = 0$ , la distribución es mesocúrtica, al igual que en la asimetría es bastante difícil encontrar un coeficiente de curtosis de cero (0), por lo que se suelen aceptar los valores cercanos a  $\pm 0.5$  aprox.; si  $g_2 > 0$ , la distribución es leptocúrtica; si  $g_2 < 0$  la distribución es platicúrtica).

Los descriptores estadísticos se calcularon en todo el conjunto de datos de cada pozo, no se omitieron los puntos aparentemente fuera del comportamiento de la distribución (espesores muy grandes generalmente aislados y localizados en los extremos de las colas), esto con el fin de probar su resultado en todo el conjunto de datos.

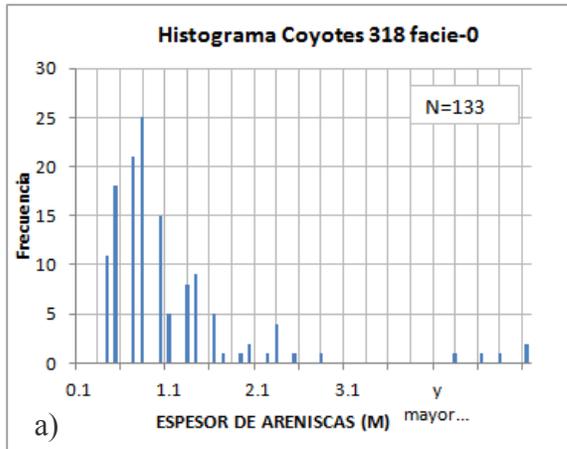


media	mediana	moda	med recortada
0.97	0.59	0.3	0.80
varianza	desv. estandar	Asimetria	Curtosis
1.53	1.24	4.49	27.32

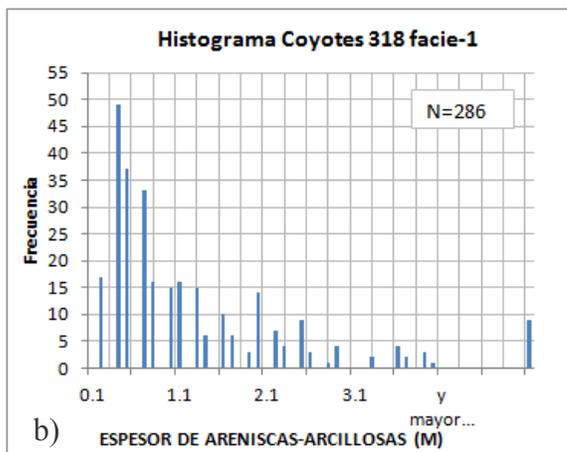
**Fig. 5.6. Histogramas (izquierda) y descriptores estadísticos (derecha) de las electro-facies de arenisca y areniscas arcillosas del pozo Coyotes 312. a) La distribución de 60 espesores de arenisca es asimétrica positiva de forma leptocúrtica (el número de espesores en esta facie es insuficiente para el análisis de Hurst,  $N > 100$ ). b) La distribución de 186 espesores de arenisca arcillosa es asimétrica positiva de forma leptocúrtica. Se encuentran espesores aislados mayores de 4 m al extremo de las colas.**



media	mediana	moda	med recortada
0.61	0.49	0.5	0.56
varianza	desv. estandar	Asimetria	Curtosis
0.28	0.53	2.47	9.12



media	mediana	moda	med recortada
			(0.2)
1.21	0.76	0.8	0.87
varianza	desv. estandar	Asimetria	Curtosis
3.89	1.97	6.78	51.73



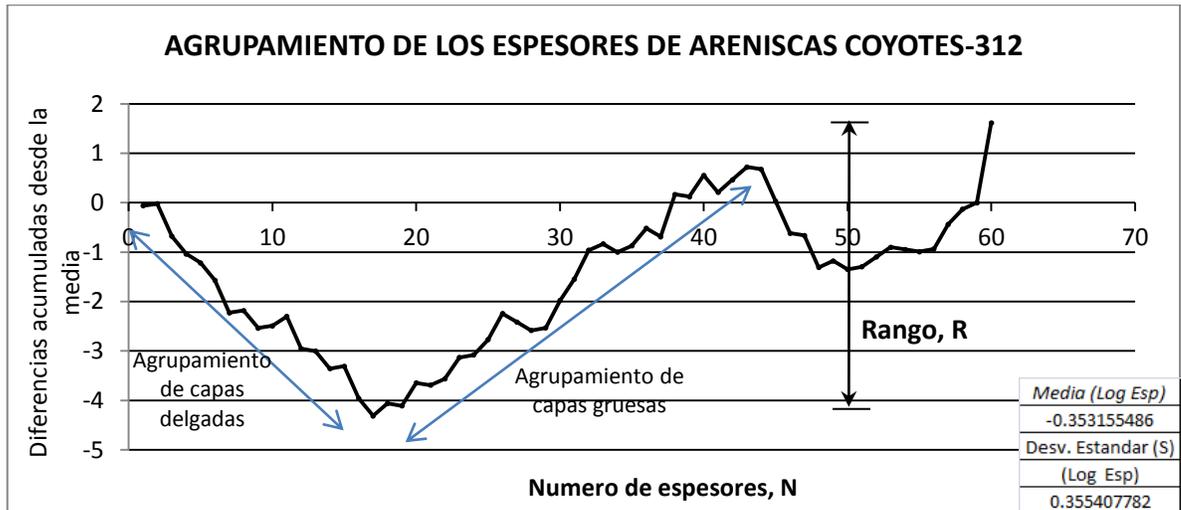
media	mediana	moda	med recortada
			(0.2)
1.27	0.76	0.4	0.98
varianza	desv. estandar	Asimetria	Curtosis
2.21	1.49	3.24	13.27

**Fig. 5.7. Histogramas (izquierda) y descriptores estadísticos (derecha) de las electro-facies de arenisca y areniscas arcillosas del pozo Coyotes 318. a) La distribución de 133 espesores de arenisca es asimétrica positiva de forma leptocurtica. Se encuentran espesores aislados mayores de 4 m en la cola de la distribución. b) La distribución de 286 espesores de arenisca arcillosa es asimétrica positiva de forma leptocurtica. Se encuentra un conjunto de 8 espesores mayores de 5 m aparentemente alejados de la cola de la distribución.**

Todos los histogramas mostraron distribuciones leptocurticas ( $g_2 < 0$ ), e. g., las electro-facies cero (areniscas) y uno (areniscas arcillosas) de los pozos Coyotes 312 y 318 (Figs. 5.6 y 5.7), muestran una distribución sesgada (asimétrica positiva), con colas cayendo hacia la derecha. Los descriptores estadísticos resultaron diferentes en todos los pozos, pero demostraron que los datos a analizar no son conjuntos con distribución normal o gaussiana, ni tampoco son aleatorios, por lo que cumplen con los requisitos para ser tratados con las metodologías

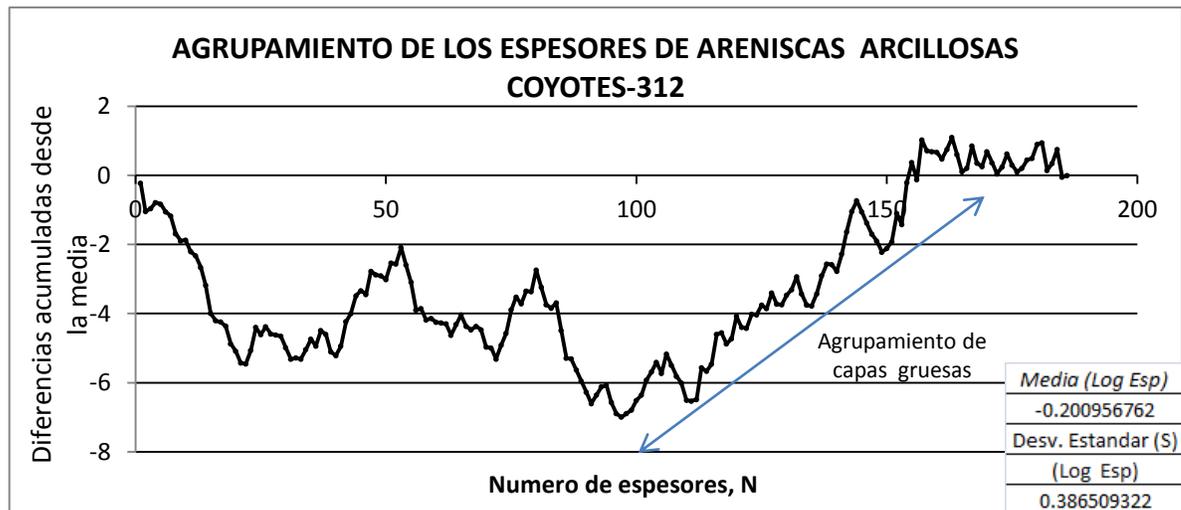
propuestas. Una vez observadas las características de los parámetros estadísticos se aplicó la metodología descrita por Chen y Hiscott (1999), las figuras 5.8 y 5.9, muestran las diferencias acumuladas desde la media, graficadas contra el número de capas ( $N$ ). El rango ( $R$ ) se calculó como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de las diferencias acumuladas. La cantidad de valores para la facies de areniscas de algunos pozos como el Coyotes 312 (solo cuenta con 60 datos), no es suficiente para realizar un análisis confiable. Sin embargo, se observan tendencias de agrupamiento de capas delgadas y gruesas (pendientes negativas y positivas respectivamente).

Con los valores de rango ( $R$ ) y desviación estándar ( $S$ ) obtenidos de este análisis, se calculó el parámetro  $K$  mediante el método de Rango Reescalado ( $R/S$ ), el cual refleja la persistencia o interdependencia de datos; este también puede ser interpretado como una medida de la rugosidad del fractal (Miranda, 2006). Los procesos completamente aleatorios tienen un valor  $K=0.5$  (es el caso especial del Movimiento Browniano). Para valores mayores de 0.5 se considera un proceso de correlación positiva o persistente, es decir, si existe una tendencia creciente anterior se tendrá una misma tendencia futura. Si al contrario es decreciente en el pasado, será decreciente en el futuro. Para valores  $K < 0.5$ , se considera un proceso antipersistente o de correlación negativa. En este caso, una tendencia de aumento en el pasado implica una tendencia de disminución el futuro y viceversa (Restrepo, *et al.*, 2001). Los valores de  $K$  encontrados en todos los pozos son mayores a 0.5 (Tabla 5.1), indicando un proceso persistente. Se observó que las diferencias en las distribuciones, genera valores de  $K$  poco correlacionables entre los dos pozos. Si las distribuciones son similares, los valores de  $K$  deben ser muy cercanos, es de esperar que para los intervalos en que se distribuyan similarmente,  $K$  pueda ser correlacionada. La comprobación de esta correlación entre intervalos, debe darse mediante otros métodos ya que al seccionar el intervalo analizado, el número de espesores no cumplirá con la condición de cantidad suficiente. Chen y Hiscott (1999), sugieren la simulación de Montecarlo para  $N < 100$ .



A)

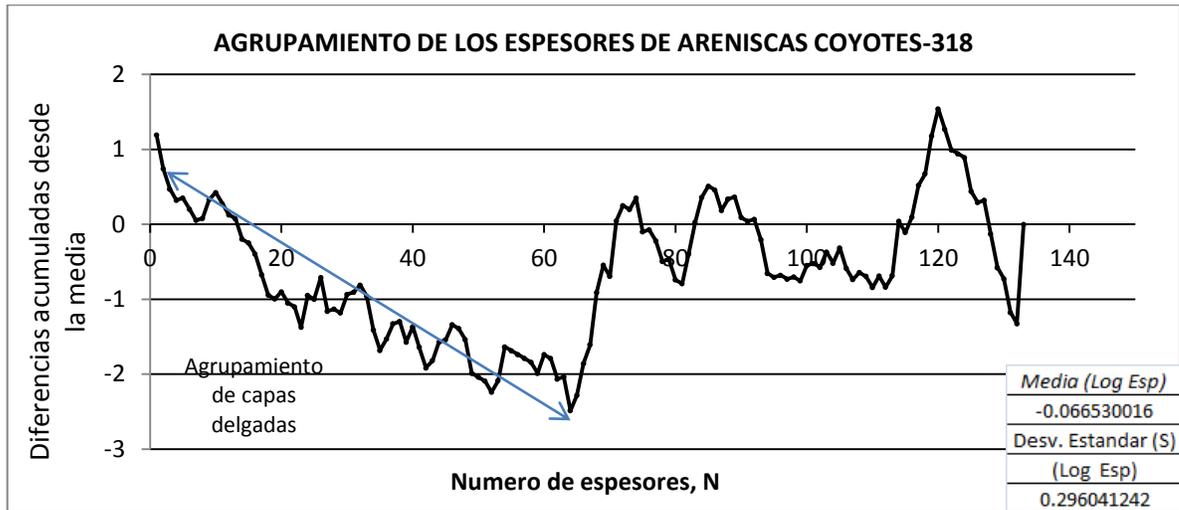
Rango calculado	K
R	$(\text{Log } (R/S) / \text{Log } (N/2))$
5.034170059	0.7793544



B)

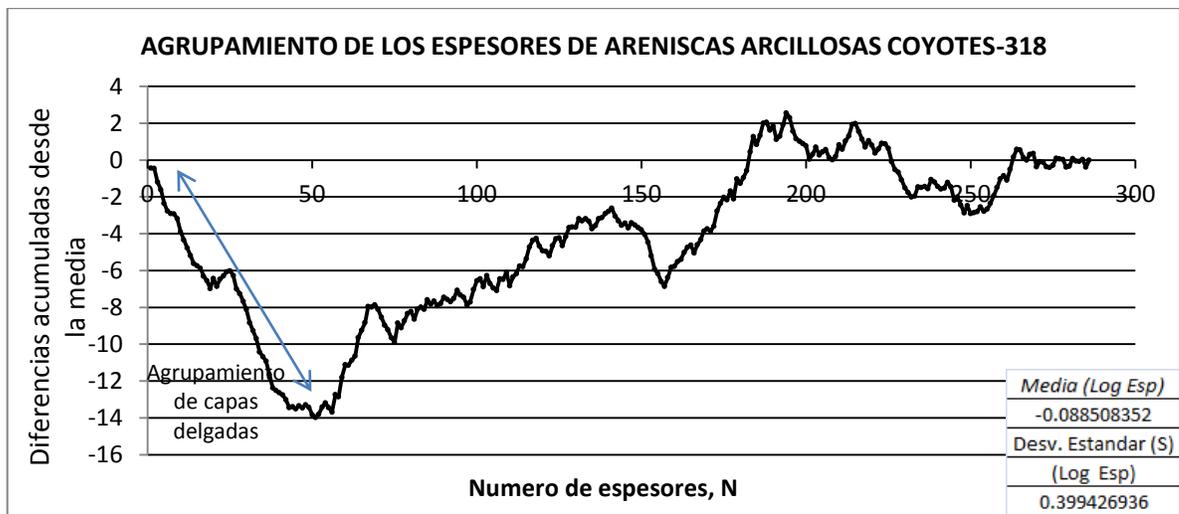
Rango calculado	K
R	$(\text{Log } (R/S) / \text{Log } (N/2))$
8.098036105	0.671186782

**Fig. 5.8.** A) Gráfico de las diferencias acumuladas desde la media vs el número (N) de los espesores de electro-facies areniscas del pozo 312, rango (R) e índice de Hurst (K). El rango fue calculado como el valor máximo menos el mínimo de las diferencias acumuladas. El número de valores para ésta facies (N=60) no es insuficiente para la interpretación de los resultados, sin embargo, se observan tendencias de agrupamiento. B) Diferencias acumuladas desde la media vs el número (N) de los espesores de arenas arcillosas del pozo 312, rango (R) e índice de Hurst (K). El número de espesores es suficiente para el análisis de una secuencia natural (N=186).



A)

Rango calculado	K
R	$(\text{Log } (R/S))/\text{Log } (N/2)$
4.027734682	0.627683096



B)

Rango calculado	K
R	$(\text{Log } (R/S))/\text{Log } (N/2)$
16.52880623	0.750140169

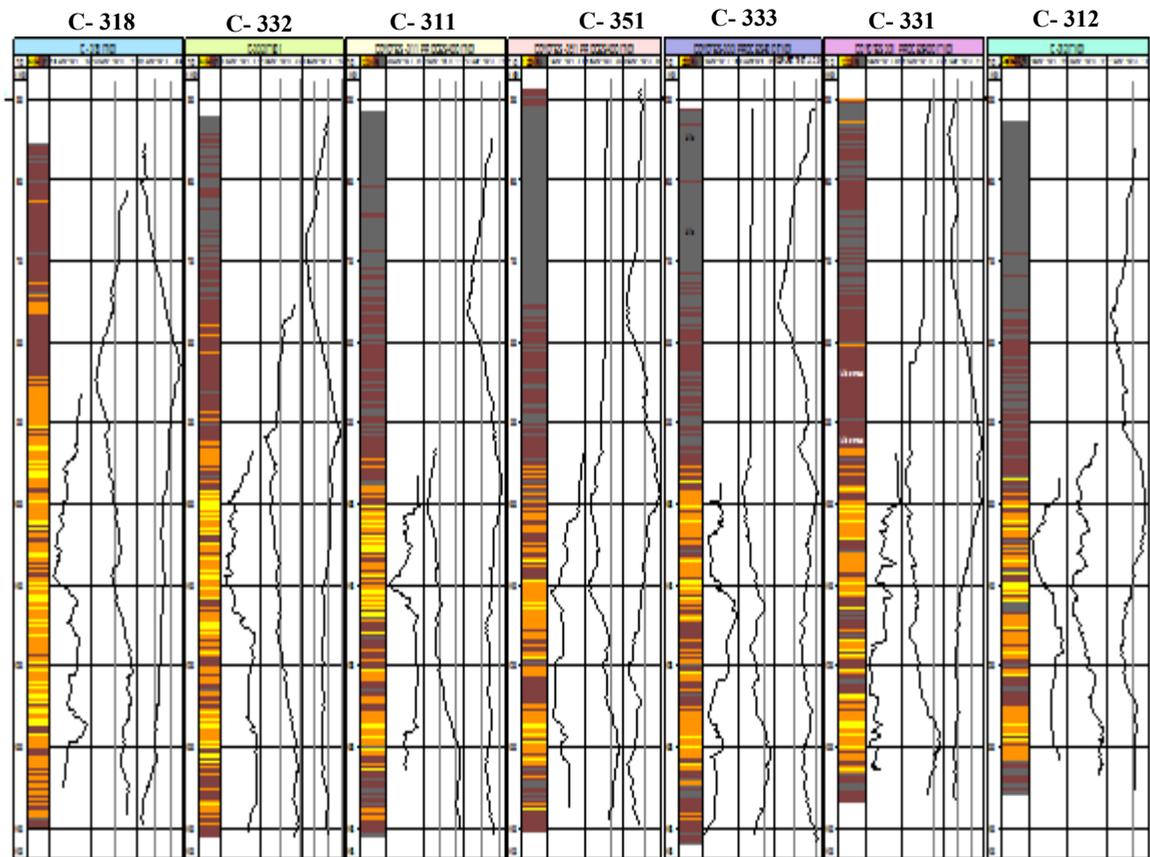
*Fig. 5.9. Diferencias acumuladas desde la media vs el número (N) de los espesores de areniscas (A) y de areniscas arcillosas (B) del pozo 318, rango (R) e índice de Hurst (K). El número de espesores es suficiente para el análisis de ambos conjuntos de datos. Los conjuntos de datos del pozo 318 tienen una tendencia de agrupamiento de capas delgadas al inicio del gráfico, entre 0 y 60 (N), sin embargo, solo la facies de areniscas arcillosas muestra un comportamiento posterior de pendiente positiva entre 55 y 150, indicando un agrupamiento de capas gruesas.*

POZO	K	
	(Log (R/S)/Log (N/2))	
	ARENISCAS	ARENISCAS ARCILLOSAS
318	0.627683096	0.750140169
332	0.65232511	0.767906603
331	0.527850708	0.72962811
333	0.531371155	0.722215995
311	0.641516617	0.855409157
312	0.7793544	0.671186782
351	0.720944415	0.748908591

*Tabla 5.1 Valores de K encontrados mediante el método de rango reescalado (R/S) para los espesores de areniscas y areniscas arcillosas de los pozos del campo Coyotes.*

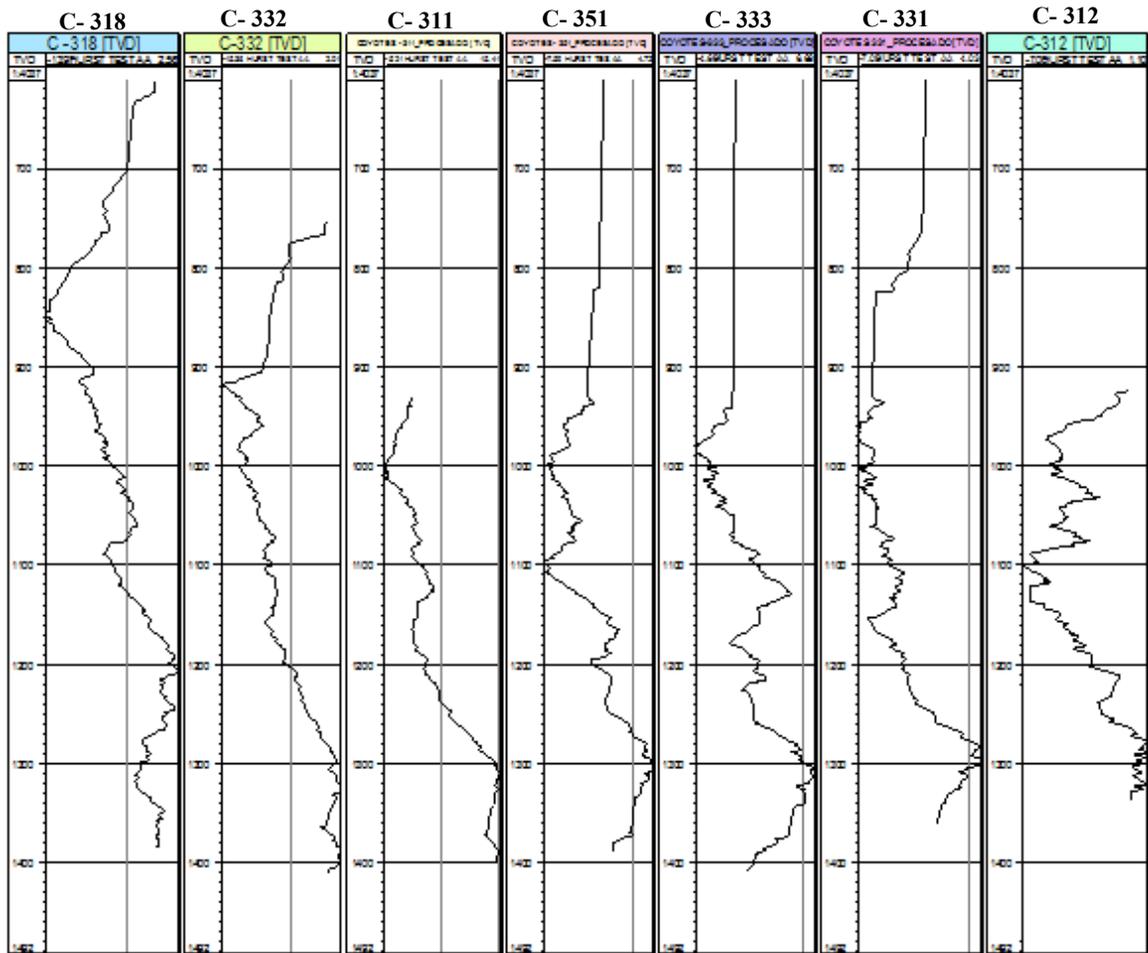
### ***5.3 Tendencias de agrupamiento de los espesores de las electro-facies de areniscas, areniscas arcillosas y lutitas arenosas de los pozos del campo Coyotes***

El conjunto de valores obtenido del análisis estadístico de Hurst, hace evidentes las tendencias de agrupamiento de los espesores en función del número de capas N, sin contemplar su posición real sobre la trayectoria del pozo. Con el fin de comparar las distribuciones de espesores en profundidad, se graficaron en el software Petrel ®, las diferencias acumuladas desde la media del logaritmo de los espesores, contra la profundidad que se localiza a la mitad de cada espesor (“Hurst Test”), de tal forma que cada pozo contiene tres curvas: “Hurst Test A” para la electro-facies de areniscas, “Hurst Test AA” para electro-facies de areniscas arcillosas y “Hurst Test LA” para lutitas arenosas (Fig. 5.10). El análisis no se aplicó en la electro-facies de lutitas debido a que la cantidad de espesores de era mínimo. Se compararon todos los pozos y sus respectivos gráficos “Hurst Test” para visualizar si existía similitud entre las firmas de las curvas.



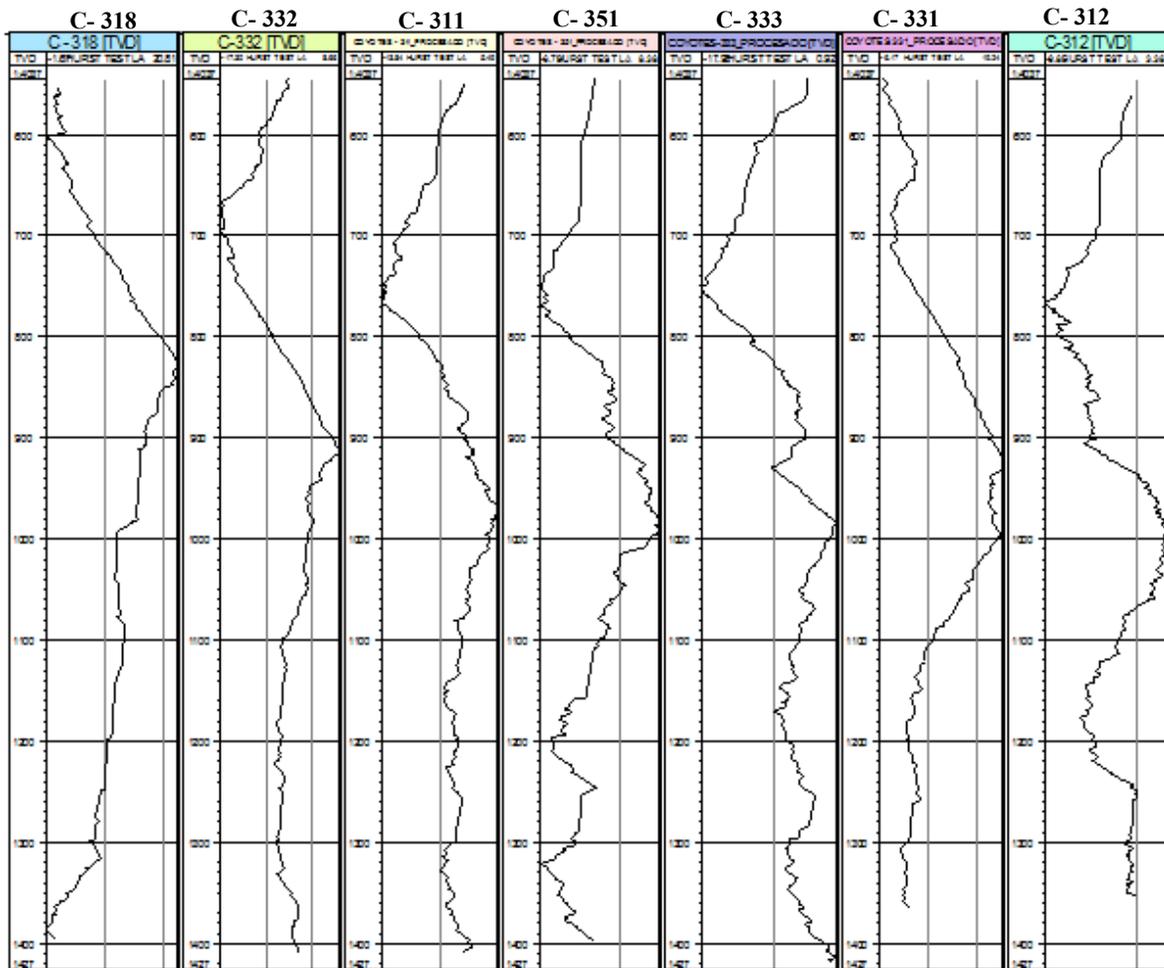
*Fig. 5.10. Electro-facies de los pozos Coyotes 318, 332, 311, 351, 333, 331, 312. El primero, segundo y tercer “track” de cada pozo, corresponden a las diferencias acumuladas desde la media contra la profundidad localizada a la mitad de cada espesor de la electro-facies de areniscas (“Hurst Test A”), areniscas arcillosas (“Hurst Test AA”) y lutitas arenosas (“Hurst Test LA”) respectivamente.*

Al comparar las curvas de “Hurst Test” de las electro-facies de areniscas arcillosa (**Fig. 5.11**) y lutitas arenosas (**Fig. 5.12**) en todos los pozos, se observó que las firmas de estas gráficas, dependen del acomodamiento de los espesores y que tienen algunas similitudes en ciertas profundidades. Las curvas son rugosas y se comportan linealmente en algunos intervalos donde se agrupan espesores muy potentes (deflexiones hacia valores positivos) o muy delgados (deflexiones hacia valores negativos).



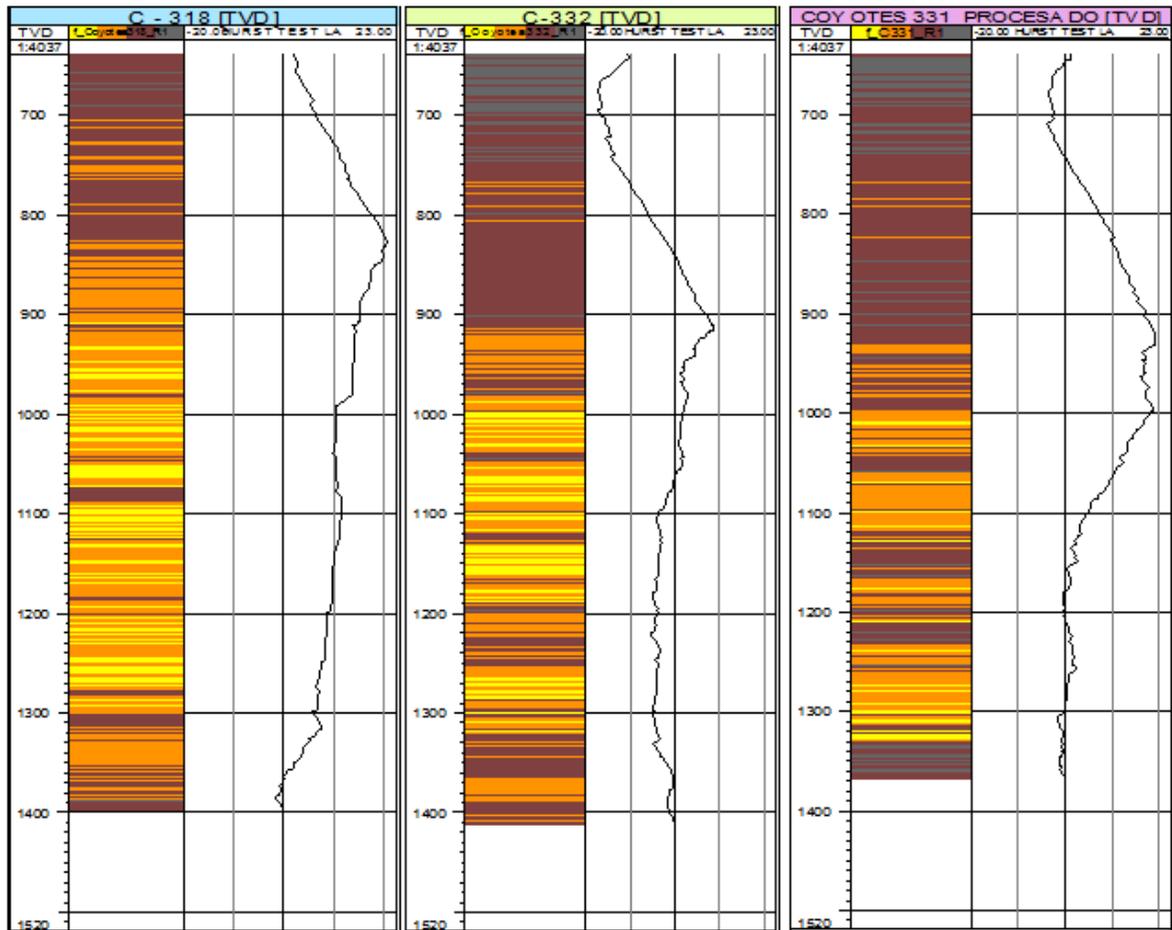
*Fig. 5.11. Tendencias de agrupamiento de los espesores de la electro-facies de areniscas arcillosas (“HURST TEST AA”) de los pozos Coyotes 318, 332, 311, 351, 333, 331y 312.*

Las curvas que mostraron un comportamiento similar en intervalos de algunos pozos, se observaron especialmente en aquellos que presentaban potentes espesores (entre 20 y 100 m) de la electro-facies de lutitas arenosas en la parte superior. En estas zonas, la curva de “Hurst Test LA” tiene un comportamiento lineal hacia valores positivos y posteriormente deflexiona hacia valores negativos, al presentarse intercalaciones de espesores delgados de lutitas arenosas con areniscas arcillosas y areniscas.



*Fig. 5.12. Tendencias de agrupamiento de los espesores de la electro- facies de lutitas arenosas (“HURST TEST LA”) de los pozos Coyotes 318, 332, 311, 351, 333, 331 y 312. Los pozos 318, 332 y 331 muestran una firma lineal en la parte superior.*

Para analizar este comportamiento, se compararon las electro-facies en los pozos que se encontraron más coincidencias. Se eligieron para esta comparación, las gráficas “Hurst Test” de los espesores de electro-facies de lutitas arenosas (“Hurst Test LA”) en los pozos Coyotes 318, 332 y 331 (Fig. 5.13):



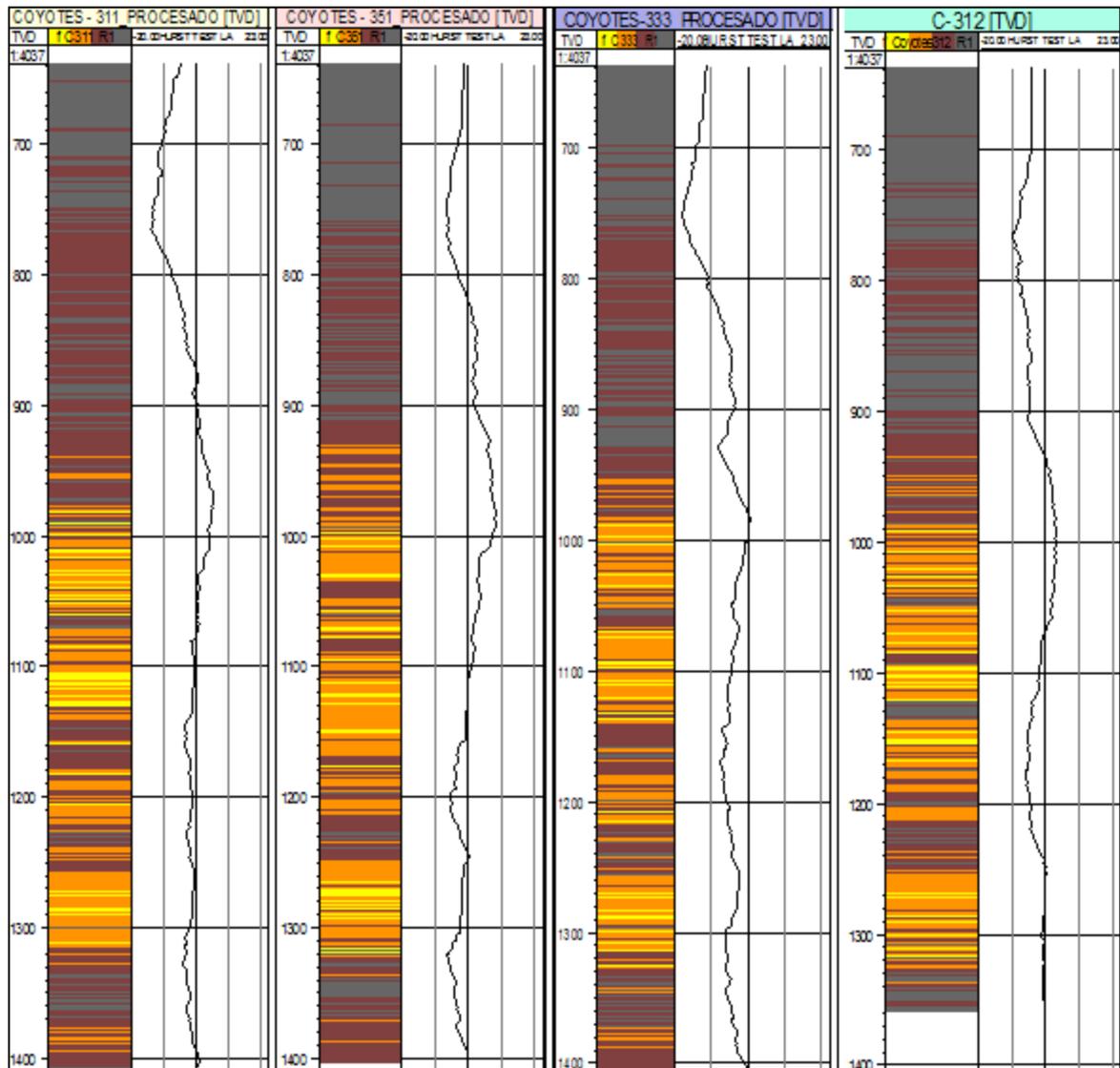
*Fig. 5.13. Electro-facies de los pozos Coyotes 318, 331 y 332, comparada con las diferencias acumuladas desde la media vs profundidad localizada a la mitad del espesor, de la electro-facies de lutita arenosa (“Hurst Test LA”). La escala vertical está en metros; la escala horizontal va de -20 a 23, es adimensional y resulta de logaritmo base 10 de los espesores. Los espesores de lutitas arenosas son potentes en la parte superior de los tres pozos y no gradúan suavemente hacia espesores delgados, las curvas “Hurst Test LA” se comportan linealmente en estos intervalos (entre 600 y 825 m, pozo 318; 680 y 920 m, pozo 331; 710 a 930 m, pozo 332).*

La curva de “Hurst Test LA” del pozo Coyotes 318 (Fig. 5.13), crece linealmente hacia valores positivos conforme aumenta la profundidad (entre los 600 y 825 m). Posteriormente, en donde se presenta un cambio abrupto de los espesores (transición rápida de gruesos a delgados) deflexiona hacia valores negativos; al presentarse espesores delgados de lutitas arenosas (café), intercalados con areniscas arcillosas (naranja), la curva presenta un descenso suave. El pozo 332 presenta el mismo comportamiento entre los 680 y 920 m de profundidad,

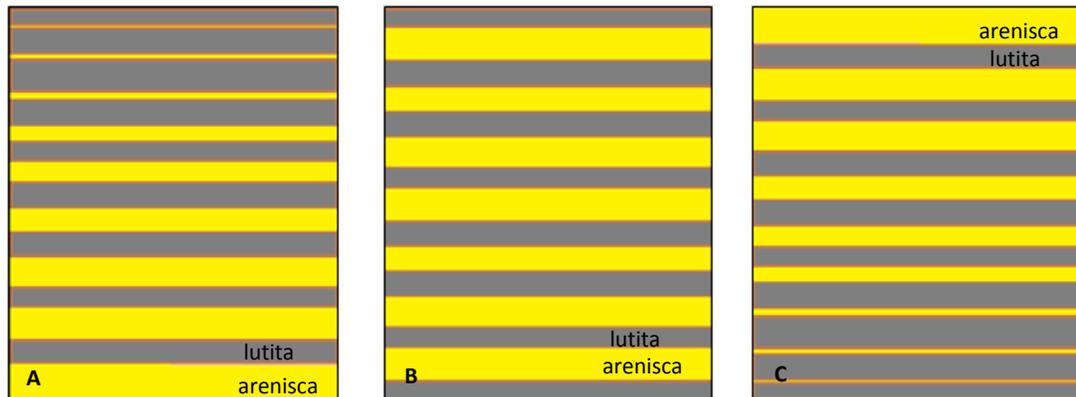
mientras que el pozo 331 lo presenta en el intervalo de 710 a 930 m de profundidad. Los tres pozos tienen en común que los espesores potentes (entre 20 y 100 m) de areniscas arcillosas de la parte superior, no decrecen gradualmente conforme avanza la profundidad, sino que se observa una transición abrupta hacia espesores delgados. Las agrupaciones de estos espesores potentes, se representan como tendencias lineales en las gráficas de “Hurst Test”, ya que sus valores están por encima de la media y las diferencias acumuladas se vuelven cada vez mayores, si los espesores están por debajo de media, las diferencias se vuelven hacia valores negativos. Por debajo de los espesores potentes de lutitas arenosas de estos tres pozos, no se observan tendencias evidentes con las que se pueda establecer una correlación.

Al comparar las electro-facies de los pozos Coyotes 311, 351, 333 y 312 y sus respectivas curvas de la “Hurst Test LA” (**Fig. 5.14**), se observó que en la parte superior de los pozos, los espesores de lutitas arenosas (café) se encuentran intercalados con lutitas (gris) y son menos potentes (oscilan entre 1 y 20 m) que en los pozos 318, 331 y 332. Los espesores de ésta electro-facies, tienden a variar de forma menos abrupta. Las intercalaciones con lutitas se vuelven gradualmente intercalaciones con areniscas arcillosas y areniscas, sin variaciones significativas de sus espesores. Las curvas de “Hurst Test LA” no presentan tendencias lineales evidentes en ninguno de estos cuatro pozos. Sin embargo, en algunos intervalos, existen pequeñas alineaciones de valores asociadas a algunos espesores por encima de la media (*e. g.*, intervalo de 1215 y 1250 m del pozo Coyotes 351 y 930 a 985 m del pozo Coyotes 333). En algunos otros intervalos, esta curva presenta un comportamiento sinusoidal deformado y elongado (*e. g.*, 750 a 930 m del pozo 333 y 900 a 1250 m del pozo 312).

Para examinar los comportamientos de las curvas “Hurst Test” desde el punto de vista estratigráfico, se supusieron tres conjuntos de datos que representaban a espesores con arreglos estrato-decreciente, agradacional y estrato-creciente de areniscas intercaladas en un espesor de lutita (**Fig. 5.15**). Estos espesores idealizados, se analizaron desde el punto de vista de los fractales determinísticos (mediante gráficos bilogármticos,  $\log$  espesor vs  $\log$  profundidad) y desde el punto de vista de los fractales estadísticos (“Hurst Test”).



*Fig. 5.14. Electro-facies de los pozos Coyotes 311, 351, 333 y 312, comparada con las diferencias acumuladas desde la media (log del espesor) de la electro-facies de lutita arenosa (“Hurst Test LA”). La escala vertical está en metros; la escala horizontal va de -20 a 23, es adimensional y resulta de logaritmo base 10 de los espesores. Los espesores de lutitas arenosas son menos potentes que en los pozos 318, 331 y 332, la electro-facies de lutitas arenosas en la parte superior de los pozos (entre los 600 y 950 m aprox.), pasa de intercalarse con lutitas, a intercalarse con areniscas arcillosas y areniscas sin cambios abruptos en los espesores. Las curvas de “Hurst Test LA” no muestran tendencias lineales significativas, ni firmas correlacionables entre pozos.*



*Fig. 5.15. Esquemas idealizados de patrones de apilamiento estratigráfico de espesores de areniscas (amarillo) intercalados con lutitas (gris). A) arreglo idealizado de espesores estrato decrecientes, los estratos se adelgazan conforme la profundidad se vuelve más somera; B) arreglo de espesores agradacional, los estratos conservan su espesor a lo largo de la profundidad; C) arreglo de espesores estrato creciente, los espesores se vuelven más potentes conforme la profundidad se vuelve más somera.*

Para el conjunto de datos que representa un arreglo de espesores estrato-decrecientes de areniscas, se supusieron 200 valores que disminuyen su magnitud de 5 m hasta 5 cm conforme la profundidad se hace más somera, los espesores están asociados con su profundidad dada a la mitad del espesor. Los valores que representan al arreglo de espesores agradacional (en donde se conserva la magnitud de los espesores) varían entre 5 y 5.1 m y se intercalan con lutitas a lo largo de la profundidad; mientras que para el arreglo estrato-creciente de areniscas, los espesores aumentan su magnitud desde 5 cm hasta 5 m conforme la profundidad se vuelve más somera (**Anexo A4**).

Los tres conjuntos fueron graficados en escala bilogarítmica (log profundidad vs log espesor), y en gráficos de las diferencias acumuladas desde la media (logaritmo base 10 de los valores) vs el número de espesor  $N$ , (“Hurst Test”) (**Figs. 5.16. 5.17 y 5.18**).

Para el conjunto que representa el arreglo estrato-decreciente, se observó que su gráfico log-log (**Fig. 5.16, dcha.**), se ajusta a una línea recta, lo cual se debe a que tanto los valores del espesor como los de profundidad decrecen hacia la parte somera. Su correspondiente gráfico de Hurst (**Fig. 5.16. izda.**), se presenta como un semicírculo deformado, con valores adimensionales entre 0 y 30 (logaritmo base 10 de los espesores).

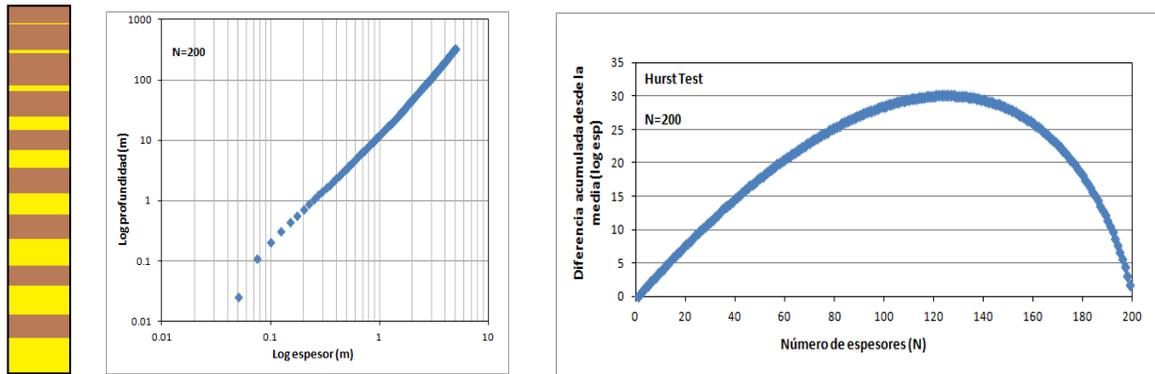


Fig. 5.16. Gráficos “Log-Log” (izquierda) y “Hurst Test” (derecha) de 200 espesores que simulan un arreglo estrato-decreciente. Los espesores disminuyen con la profundidad.

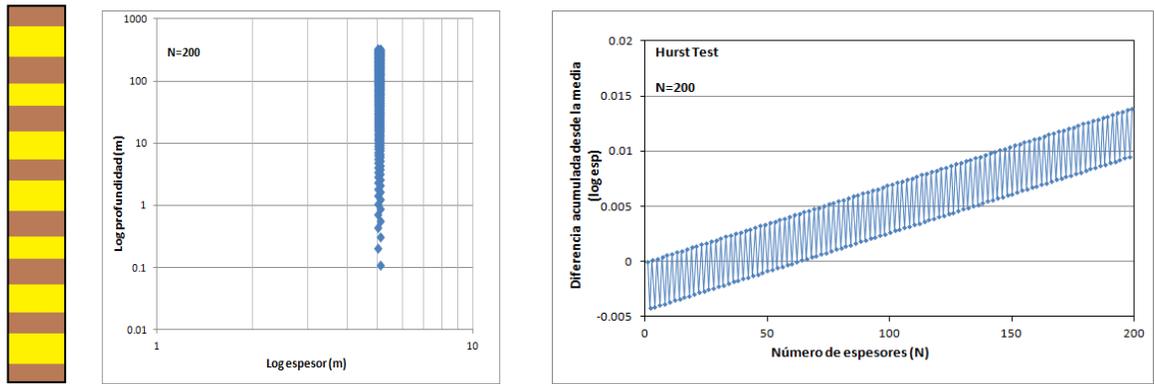


Fig. 5.17. Gráficos “Log-Log” y “Hurst Test” de 200 espesores que simulan un arreglo agradacional. Los espesores se conservan a lo largo de la profundidad.

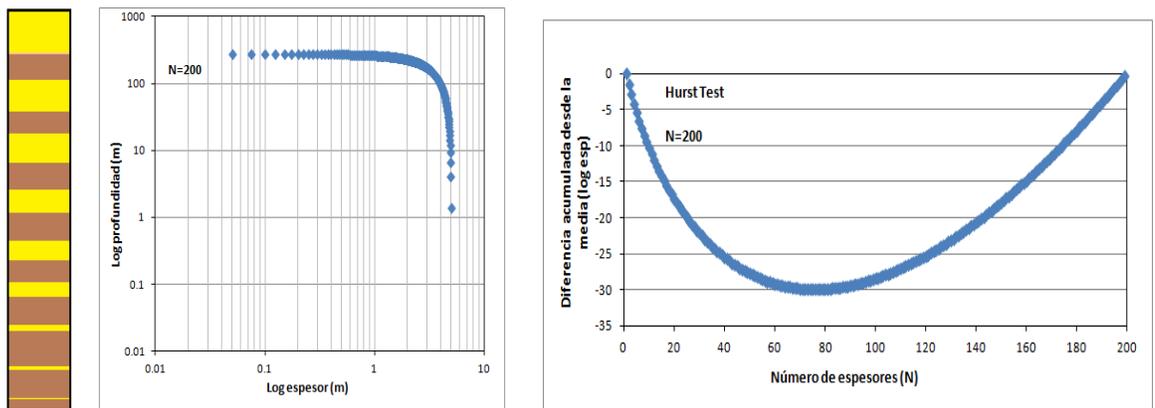


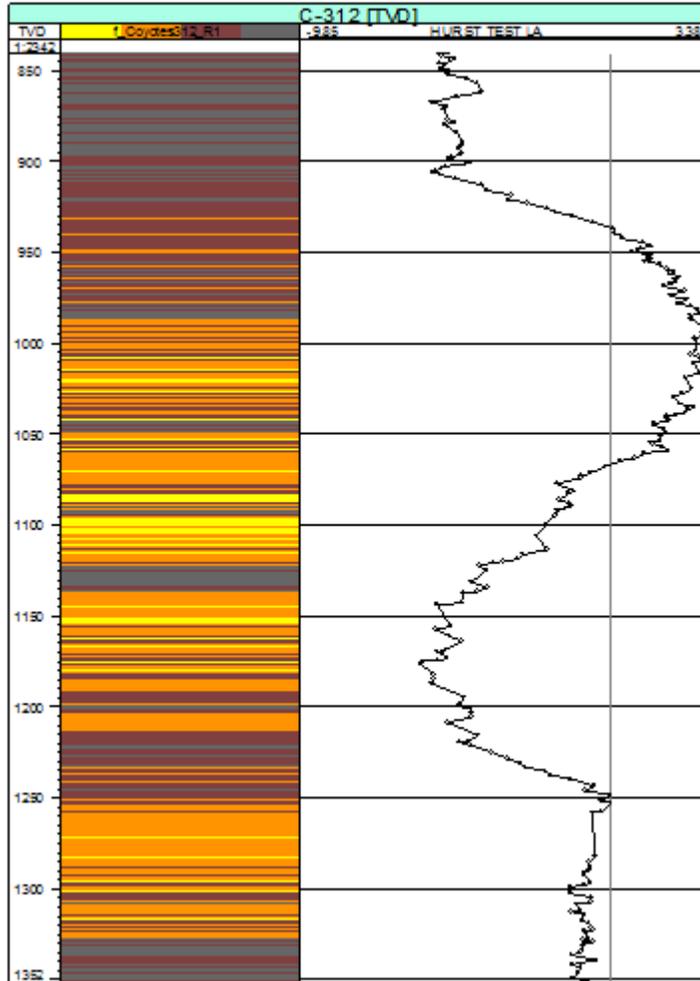
Fig. 5.18. Gráficos “Log-Log” y “Hurst Test” de 200 espesores que simulan un arreglo estrato-creciente. Los espesores aumentan conforme la profundidad disminuye.

Para el caso del arreglo agradacional, se observó en su gráfico log-log (**Fig. 5.17,**) como una línea vertical (los espesores tienen variaciones mínimas a lo largo de la profundidad), en el gráfico “Hurst Test” (**Fig. 5.17, izda.**), los valores se agrupan en una banda lineal que va desde 0.005 hasta 0.014 unidades adimensionales.

Para el conjunto que representa el arreglo estrato-decreciente, se observó que su gráfico log-log (**Fig. 5.18, dcha.**) tiene un comportamiento asintótico, debido a que los valores de profundidad decrecen mientras el espesor aumenta. Su correspondiente gráfico de Hurst (**Fig. 5.18, izda.**), se presenta como un semicírculo deformado, con valores adimensionales entre 0 y -30 (logaritmo base 10 de los espesores).

Adicionalmente, se analizó el caso en el que los espesores del arreglo estrato-decreciente se adelgazarán hasta una porción del 25 % de su valor original. El resultado de las gráficas bilogarítmicas (log espesor vs log profundidad) fue una alineación de los puntos con espesores que oscilaban en un rango menor que los de la gráfica **5.16** (izda.), resultando esencialmente la misma tendencia lineal pero desplazada hacia valores más bajos; así mismo, el gráfico de “Hurst Test” resultante de estos espesores fue idéntico al de la figura **5.16** (dcha.). Esto se debe a que al disminuir el espesor, disminuye la media y las diferencias acumuladas resultan ser las mismas. Este análisis se realizó con el propósito de observar el caso en el que existe adelgazamiento de espesores dentro de una cuenca sedimentaria (*e. g.*, debido a la distancia que existe desde la fuente de aporte de sedimento hasta dónde ocurre la depositación, entre más lejos se encuentre la fuente menor será el sedimento depositado).

Este análisis permitió obtener un comportamiento de referencia que se pudiera comparar con los espesores de las electro- facies de los pozos del campo Coyotes. Fue de particular interés el pozo Coyotes 312, el cual muestra en su gráfica “Hurst Test LA” una firma sinusoidal entre los 900 y los 1250 m de profundidad (**Fig. 5.19, dcha.**); al observar la distribución por colores de las electro-facies de este pozo, se puede percibir en ese intervalo, que los espesores de lutitas arenosas comienzan (a la profundidad de 900 m) con magnitudes grandes de alrededor de 12 m; conforme la profundidad aumenta decrecen gradualmente hasta 1 m y finalmente (hacia la profundidad de 1250 m) aumentan nuevamente hasta espesores de alrededor de 8 m.



*Fig. 5.19. Electro-facies del pozo Coyotes 332 (izquierda) y gráfico “Hurst Test LA”). Los espesores de la electro-facies de lutitas arenosas (café), comienzan a decrecer en magnitud a partir de los 900 m de profundidad, se vuelven más delgados alrededor de lo 1100 m y posteriormente comienzan a engrosarse hasta la profundidad de 1250 m. La firma de las diferencias acumuladas desde la media vs profundidad, es sinusoide deformada y aserrada en este intervalo.*

La simulación de patrones de apilamiento de espesores, permitió una mejor comprensión de las firmas de las curvas “Hurst Test” sobre la trayectoria de los pozos. Las formas que describe el pozo Coyotes 332 entre los 900 y los 1250 m, son correlacionables con los patrones de apilamiento ideales de estrato-crecencia y estrato-decrecencia. Este tipo de firma no se encontró en los otros pozos, en ellos se observaron formas similares que aunque no pueden ser correlacionables entre pozos, nos hablan de la heterogeneidad del yacimiento. Si en las firmas de estas curvas se encontrara correlación, se podría entablar una relación de conexión de unidades geológicas entre los pozos, sin embargo, tanto el análisis de datos sísmicos como el de distribuciones de electro-facies, concluyen que los espesores tienen poca continuidad lateral y por ende no se completa la conexión de estratos genéticamente relacionados entre pozos.

## ***CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN***

El conjunto de datos que se obtuvieron en este trabajo consta por un lado de los valores de radioactividad obtenida en los afloramientos de la Formación Chicontepec y por otro, de los gráficos e índices de Hurst de los espesores de electro-facies obtenidos a partir de los registros de rayos gamma de los pozos del campo Coyotes. Conforme a lo planteado en el objetivo, se describieron las facies de la Formación Chicontepec en función de los registros de radioactividad natural obtenidos en campo y se compararon con los valores de los registros de rayos gamma en los pozos mediante las electro-facies. Una vez descritas las facies, buscar la correlación entre pozos mediante el uso de clasificadores fractales como lo es el índice de Hurst.

Uno de los objetivos del análisis en afloramientos fue conocer mejor el tipo de facies presentes en los pozos del campo Coyotes. Pese a que es considerable la distancia entre los afloramientos analizados y los pozos de la macro pera Coyotes 331, los valores de los registros de rayos gamma obtenidos en afloramientos oscilan prácticamente en los mismos rangos que los de los pozos, lo que permite una estrecha correlación mediante las electro-facies de ambos conjuntos de datos.

Se observa de las secciones muestreadas, que las variaciones del registro de rayos gamma total se deben a las contribuciones de Th y K. Siendo la sección CH05 más arcillosa respecto a las secciones CH03 y CH06. Esto se atribuye a que las facies de la sección CH05 constan de intercalaciones frecuentes de arenas de grano fino a medio con lutitas en una proporción cercana a 1. Los espesores tanto de arenas como de lutitas son delgados, de alrededor de 5 cm. El registro de rayos gamma obtenido de esta sección tiene una distribución aleatoria dentro de un rango estrecho y alto de radioactividad, tal aleatoriedad se debe a que el instrumento de medición abarca varios estratos delgados y promedia sus contribuciones. En el análisis de valores de radioactividad del Uranio, se observó que los altos (mayores a 2 ppm) se asocian a la presencia de materia orgánica, y que la sección CH06 tiene mayores contribuciones de Uranio que las otras dos secciones.

En las proporciones  $Th/K$ , se encontró que las regiones mineralógicas que predominan en todas las secciones prospectadas, corresponden a montmorillonita e illita. La montmorillonita es más común en origen volcánico, no contiene Potasio en su composición química y es más común en arcillas compactas. La illita contiene Potasio en su composición química y se origina por meteorización de feldespatos y micas. Se observa que las variaciones de la curva se encuentran regidas por las fluctuaciones del Torio. Los valores altos de Torio pueden ser debidos a que no fueron lixiviados en estos estratos, ya que la persistencia del Torio se debe a que no tiene un estado soluble y no es fácilmente lixiviado, como el Uranio y el Potasio. Es decir, si la illita está asociada al Potasio y las cantidades de Potasio disminuyen, se le atribuye una menor existencia de este mineral de las arcillas en los espesores más potentes de arenisca. Por ejemplo, el espesor de arenisca del tercer transecto de la sección CH03 (**Fig. 4.5**) existe una disminución simultánea de Torio y Potasio que es bien correlacionado con un estrato de arenisca. La relación  $Th/K$  en este transecto, se encuentra ligeramente arriba de 3.5 (región de montmorillonita). Las cantidades de elementos radioactivo en este transecto (aunque sean bajos), pueden estar asociados al material arcilloso contenido en la matriz de la roca.

Respecto a las proporciones de  $Th/U$ , las secciones CH05 y CH03 están dentro del rango de 2 a 7 con mayor cercanía a 2 unidades, mientras que la sección CH06 se encuentra por debajo de 2 unidades. En los primeros tres transectos de esta sección, se observa que los valores por debajo de 2 (condiciones de reducción), generalmente coinciden con incrementos ligeros en las cantidades de Uranio (los valores del Torio son relativamente constantes). El comportamiento de los valores del Uranio, es el sugerido para la interpretación de condiciones de oxidación-reducción. En el cuarto transecto, los valores bajos de  $Th/U$ , indicativos de ambientes reductivos, no se deben a un aumento relativo del Uranio, sino a una disminución drástica del Torio.

Con respecto las pruebas de radioactividad en otras litologías (arenoarcilloso, basalto y caliza) tomadas como referencias de valores límite, se encontró que la caliza y el basalto son las rocas que menos contribución tiene de minerales arcillosos. En el otro extremo, los datos tomados en el “slump” arenoarcilloso fueron los más altos, incluso más que la sección CH05. Los resultados de las relaciones  $Th/U$  de estas pruebas corresponden a capas mezcladas en el

“slump” arenoarcilloso con altos valores de Torio y Uranio. Los de basalto también corresponden a capas mezcladas, sin embargo, los valores de Torio y Uranio son bajos y se trata de una roca masiva. Es decir, los valores bajos de radioactividad del basalto pueden estar asociados a minerales intersticiales, fracturas o accesorios minerales, pero la relación en este caso, no puede ser interpretada como función del ambiente depositacional. En el caso de la caliza, la relación Th/U indica que es una roca proveniente de un ambiente reductivo, sin embargo, este aparente resultado debe ser verificado con otras evidencias geológicas, ya que los valores bajos de Uranio son comparables a los valores bajos de Torio y las relaciones por las que se puede interpretar un ambiente reductivo son en las que el Uranio es alto y el Torio también.

Con el análisis de los valores de radioactividad en las secciones, también se pudo observar que en la sección CH06 donde existen espesores potentes de conglomerados (en los primeros tres transectos), los valores de Uranio son relativamente altos mientras que los de Torio son bajos. Por lo que, en la curva total de rayos gamma, al sumarse las contribuciones de todos los elementos se genera la aparente existencia de una roca areno arcillosa. Esto puede tener un importante significado en la interpretación de los registros en pozo, en los que solo se cuenta los datos de radioactividad total que no ha sido corregida. Ya que, en la interpretación de intervalos importantes como los de conglomerados, estos pueden verse en mascarados por los valores altos de Uranio.

Por otro lado, la conversión de unidades de los valores de radioactividad de las secciones PPM a API, permitió establecer una comparación entre los valores de las secciones y los valores de los pozos, esto nos habla de que los niveles captados por el equipo de prospección son equiparables a los captados por las herramientas de registros de pozo. De los rangos de radioactividad utilizados tanto en secciones como en pozos se obtuvieron electro-facies, en las que se puede observar cualitativamente las variaciones de los volúmenes de arcilla por la representación de colores. Al comparar a las electro facies del segundo rango (R2, calibradas con núcleos del pozo Coyotes 318) y el tercer rango (R3, calibradas con secciones medidas en afloramientos) se observó que la similitud entre ellas otorga más certeza de que las facies

estudiadas en las secciones si funcionan como análogo del yacimiento. La sección CH05 es la más arcillosa y las electro-facies resultantes corresponden a esta arcillosidad. Así también corresponden las electro-facies de las secciones CH03 y CH6. En la comparación de los valores de radioactividad de las secciones con los valores de los pozos, se encontró que las electro-facies de la sección CH05 son similares a las de los pozos en los intervalos donde ocurren los valores más altos de radioactividad. Mientras que en las otras dos secciones (CH03 y CH06) los valores obtenidos en estratos potentes de areniscas son similares en intervalos en los que ocurren los valores más bajos de los pozos. Esto podría significar que las facies de esos intervalos en los pozos son del tipo de las facies de los afloramientos prospectados, sin embargo, es necesario confirmar esta asociación con las descripciones de los núcleos de los pozos. De esta forma, podemos también observar que los amplios espesores de a electro-facies de lutitas en los registros de los pozos, son correlacionables con las facies de la sección CH05, por lo que se asocia en esos intervalos, la existencia de intercalaciones frecuentes de areniscas y lutitas cuyos espesores delgados no pueden ser delimitados por los rangos tan amplios de los valores de rayos gamma total, con los cuales se obtuvieron las electro-facies en los pozos.

De esta forma quedan descritas las facies de los afloramientos análogos al campo Coyotes y la correlación que existe entre ambos sitios (análogo de yacimiento y pozos de yacimiento). Para buscar la correlación entre los pozos de campo, en intervalos en los que las distribuciones de los espesores de las facies son complejas, se probó la metodología de Chen y Hiscott (1999). Los resultados indican que el conjunto de datos correspondientes a espesores, pueden ser tratados con esta metodología, ya que no se trata de una distribución aleatoria ni normal, sino que contiene tendencias estadísticas que regulan el agrupamiento de estos espesores. Se encontraron mediante los índices de Hurst, que se trata de una distribución persistente (valores mayores a 0.5) y que existen ciertos patrones de repetición. Al localizar en gráficos bilogarítmicos (del espesor contra su profundidad media) los intervalos en donde ocurrían estos patrones, no se observaron similitudes obvias en las firmas de las curvas. Lo cual indica que existen patrones enmascarados en la distribución de espesores y que pueden ser evidenciados mediante clasificadores fractales. Para identificar si las tendencias de agrupamiento se repetían en los pozos, se graficaron los valores de la prueba de Hurst contra

su profundidad dada a la mitad del espesor y se comparó con las electro-facies de cada pozo. De las electro-facies observadas en colores, no se distinguen patrones de apilamiento, sin embargo, estadísticamente se pueden observar tendencias de agrupamiento similares en algunos intervalos de los pozos analizados (**Figs. 5.9, 5.10 y 5.11**)

De las gráficas de la figura **5.13**, se observa que todos los intervalos en donde la prueba de Hurst se comporta similarmente, terminan en la base del espesor de lutita arenosa que limita el yacimiento, sin embargo, por debajo de este límite, los pozos con estas característica (Coyotes 318, 331 y 332) contienen estratos más finos intercalados con areniscas arcillosas y la correlación no puede ser establecida. El que los intervalos de similitud se encuentren a distintas profundidades en los pozos, se debe a la pendiente del subsuelo, ya que los estratos no son horizontales y se encuentran a mayor profundidad en algunos pozos. Así también, debe tomarse en cuenta de que el pozo C-318 está muestreado a diferentes profundidades que los pozos de la macro para 331, y que además, es más arenoso ya que se encuentra en un nivel más alto y pudo recibir un mayor aporte de terrígenos gruesos. Aun con las diferencias entre los volúmenes de arcilla de estos tres pozos, existe un comportamiento similar en algunos intervalos que pudiera ser correlacionado con algún evento geológico. En el análisis de arreglos ideales de espesores (estrato-creciente, agradacional y estrato-decreciente), se observó que las tendencias lineales corresponden a estratos de espesores constantes que se encuentran por encima de la media y que probablemente se encuentren asociados un comportamiento agradacional, mientras que las formas sinusoides que describen las curvas “Hurst Test LA” del pozo Coyotes 312, probablemente corresponden a las formas de estrato-crecencia y estrato-decrecencia de gran escala, ya que la forma sinusoide que se encuentra en ese intervalo corresponde a una disminución en los espesores de la electro-facies de areniscas arcillosas hacia la parte central del intervalo.

## ***CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES***

- El equipo de espectrometría de rayos gamma utilizado (RS-230), captó niveles de energía equiparables a los de pozos de perforación, permitiendo establecer la correlación entre facies de afloramientos y facies de pozos.
- El registro de rayos gamma obtenido en litologías con intercalaciones frecuentes de estratos delgados de areniscas y lutitas tiene una distribución aleatoria dentro de un rango estrecho y alto de radioactividad, ya que el instrumento de medición abarca varios estratos y promedia sus contribuciones. Por lo que no se pueden delimitar estratos delgados con esta técnica, pero si obtener un rango de variación general de este tipo de alternancias.
- Los intervalos con valores de radioactividad alta en los pozos, se correlacionan con los valores de la sección CH05, mientras que la radioactividad baja en los pozos, es comparable con la de los espesores de areniscas finas, medias y gruesas, sin materia orgánica y fuertemente consolidadas, que fueron encontradas en las secciones CH03 y CH06. Sin embargo, en los pozos también se encontraron intervalos en las electro-facies de areniscas, cuya densidad (RHOB) es baja, por lo que probablemente estas areniscas no se encuentren consolidadas.
- La relación Th/K de las secciones registradas, indica que el principal contenido mineralógico de las arcillas presentes en la formación, corresponde a illitas y montmorillonitas. Siendo la sección CH05 más abundante en illita y la CH06 más abundante en montmorillonita.
- Las relaciones Th/U de las secciones CH03 y CH05 se encuentran por arriba de la línea que delimita el ambiente de reducción (oscilan entre 2 y 5), mientras que la sección CH06 se encuentra por debajo de dicha línea, por lo que probablemente los sedimentos de esta sección se depositaron en ambiente menos oxidado que las secciones CH03 y CH05.

- No todos los valores altos de radioactividad total registrada corresponden a rocas arcillosas y lutitas. Existen valores altos de Uranio que se suman al registro de radioactividad total en intervalos que corresponden a conglomerados y areniscas de grano muy fino a grueso, con presencia de materia orgánica.
- Los gráficos “Hurst Test” de las electro-facies, indican tendencias de agrupamiento de espesores gruesos o delgados respecto a la media de los valores, el asociar los valores de las diferencias acumuladas con la profundidad, hace posible contemplar la distribución vertical de los espesores. La comparación entre gráficos “Hurst Test” de la misma electro-facies puede ser utilizada como herramienta de interpretación de intervalos inciertos en los pozos.
- De acuerdo con los índices de Hurst calculados ( $K > 0.5$ ), la distribución vertical de los espesores no es aleatoria, sino persistente. Existen patrones de agrupamientos de estratos que pueden ser evidenciados mediante técnicas fractales.
- El análisis fractal de los espesores de electro-facies de lutitas arenosas de los pozos Coyotes 318, 331 y 332, indican que pueden ser correlacionados solo en algunos intervalos, mediante los gráficos “Hurst Test”. Los pozos restantes no muestran correlación evidente en las curvas de “Hurst Test”.
- La simulación de espesores adelgazados a un 25 % de su magnitud original, produjo gráficos de “Hurst Test” iguales, por lo que se espera que en campos donde ocurre adelgazamiento de espesores, las curvas se puedan encontrar similares en los pozos que crucen las mismas facies.

**ANEXOS****A1. VALORES DE RADIOACTIVIDAD SECCIÓN CH03**

Total[ppm]	K[%]	U[ppm]	Th[ppm]	Dose	DIST
601	1.7	1.9	4.3	44.7	0
535.1	1.5	2.1	4.9	44.6	0.15
526.5	1.4	1.9	4.5	41.3	0.3
524	1.5	1.7	4	39.3	0.45
567.8	1.6	2.6	4.9	48	0.6
491.1	1.4	2	3.4	39	0.75
521.8	1.4	2.2	4.3	41.8	0.9
561	1.7	2	5.5	47.2	1.05
549.4	1.6	1.2	6.4	44.4	1.2
549.9	1.5	2	3.7	40.7	1.35
564.4	1.6	2.2	5.4	48	1.5
517.25	1.55	1.45	5.15	41.95	1.65
489.2	1.3	2.4	4.1	41.2	1.8
572	1.8	1.6	4.6	45.3	1.95
524.1	1.5	2.4	4.7	44.6	2.1
470.5	1.3	1.9	4.1	38.4	2.25
436.5	1.2	1.7	4.3	36.5	2.4
514.4	1.4	2.2	5.1	43.7	2.55
493.3	1.2	2.6	4.2	41.1	2.7
502.1	1.4	1.9	4.4	40.1	2.85
502.4	1.4	2	4.7	42.3	3
531.4	1.5	1.9	5.9	46	3.15
535.5	1.4	2.7	4.7	45.5	3.3
427.9	1.1	1.7	3.3	32.9	3.45
450.5	1.1	1.8	4.7	37	3.6
340.1	0.8	1.7	3.3	28.3	3.75
324.8	0.8	1.1	3.2	25.3	4.05
438.7	1.2	1.9	3	34	4.2
463.1	1.3	1.8	4.7	39.3	4.35
591.5	1.7	2.4	5.6	50.6	4.5
609.5	1.8	1.8	6	50.1	4.65
609.9	1.7	2.1	5.4	47.8	4.8
473.6	1.2	1.9	4.3	37.9	4.95
368.4	0.9	1.6	3.5	30.1	5.1
335.7	0.8	1.5	2.3	25.5	5.25
339.4	0.8	1.7	2.1	26.1	5.4
544.6	1.5	1.8	5.6	44.6	5.55
501.8	1.3	2.1	4.6	40.7	5.7
471.1	1.2	1.8	4.7	38.6	5.85
449.4	1.1	2	4.2	36.3	6
415.2	1.1	1.3	3.8	31.7	6.15
392.6	1	1.5	3.1	29	6.3
522.1	1.4	1.5	5	39.5	6.45
423.4	1.2	1.3	4.1	33.4	6.6
426.7	1.1	1.8	3.9	34.4	6.75
580.8	1.6	2.1	5.6	47	6.9
424.1	1	1.7	4.2	33.5	7.05
513.7	1.3	2.1	4.8	41.6	7.2
515.9	1.3	1.9	5.5	42.1	7.35
489.8	1.4	1.8	4.3	39.1	7.5
380.7	0.9	1.5	2.8	27.2	7.65
517.4	1.5	1.5	6.1	44.1	7.8
570.2	1.6	1.8	4.6	42.5	7.95

549.6	1.6	2.1	4.9	46.1	8.1
518.6	1.5	1.6	5.1	41.8	8.25
483.4	1.3	1.8	4.7	39.3	8.4
474.1	1.4	1.5	5	39.9	8.55
373.9	1	1.2	4	30.1	8.7
426.4	1.2	1.6	4.2	35.7	8.85
485.3	1.4	1.8	5.3	42.4	9
480.2	1.4	1.8	4.3	40.4	9.15
478	1.3	1.9	4.9	40	9.3
501.5	1.3	1.9	4.9	40.3	9.45
553.5	1.8	2	4.8	47.2	9.6
463.3	1.4	1.9	2.9	35.6	9.75
569	1.6	1.9	6.1	47.1	9.9

## A2. VALORES DE RADIOACTIVIDAD SECCIÓN CH05

Total[ppm]	K[%]	U[ppm]	Th[ppm]	Dose	DISTANCIA
621.1	1.9	2.2	5.4	51.7	0
613.4	2	1.9	5.8	51.7	0.15
596.4	1.8	1.7	4.9	45.7	0.3
585.1	1.8	1.5	6	48.3	0.45
602.8	2	1.4	5.3	47.7	0.6
590.4	1.7	2	5.8	48.9	0.75
557.2	1.7	1.3	5	42.6	0.9
570.1	1.8	1.4	4.7	44.2	1.05
564.1	1.8	1.4	4.9	44.6	1.2
556.2	1.8	2	5.1	48.3	1.35
568.3	1.7	1.7	5.8	46.8	1.5
554.4	1.7	1.4	5.9	45.4	1.65
556.1	1.6	1.9	4.9	44.35	1.8
580.9	1.7	1.9	5	46.4	1.95
565.9	1.7	1.9	5.1	46.7	2.1
559.7	1.6	1.8	5.4	45.8	2.25
546.5	1.6	2.1	5.7	46.9	2.4
572.6	1.8	2.1	5	48.7	2.55
558.8	1.7	1.5	5.4	45.6	2.7
555.1	1.8	1.4	5.7	46.4	2.85
557.1	1.6	1.5	5.2	43.7	3
543.7	1.6	1.7	4.4	42.4	3.15
572.3	1.8	2	5	47.2	3.3
576.6	1.8	1.7	4.9	45.8	3.45
554.95	1.6	1.55	4.95	42.5	3.6
531.9	1.5	2.1	4.4	42.4	3.75
516.3	1.6	2.2	4.5	44.2	3.9
532.2	1.6	2	5.6	46.3	4.05
534.4	1.7	1.6	4.6	42.9	4.2
555.6	1.7	2.1	4.8	47.2	4.35
543.1	1.6	1.5	6.5	46.3	4.5
530.1	1.5	1.5	4.6	39.9	4.65
547.3	1.7	1.3	6	45.5	4.8
560	1.7	1.5	5.5	45.1	4.95
569.95	1.7	1.8	5.45	46.25	5.1
562.9	1.7	2.1	4.8	46.6	5.25
553.1	1.6	2	5.4	46.3	5.4
583.4	1.8	1.6	6.3	49.3	5.55
578.2	1.7	2.1	5.6	48.9	5.7
556	1.7	1.4	5.5	45.2	5.85
524.9	1.6	1.5	4.9	41.9	6
533.4	1.7	1.5	5.7	46.2	6.15
523.9	1.6	2	4.7	44.2	6.3
512.5	1.5	1.4	4.9	40.4	6.45



531.7	1.4	1.8	5.4	43.1	6.6
586.5	1.8	2	4.9	47.9	6.75
576.8	1.7	1.8	6.3	49.2	6.9
544.3	1.7	1.5	5.7	45.5	7.05
573.4	1.9	1.9	4.5	46.7	7.2
582.2	1.8	1.7	6.7	50.9	7.35
527	1.7	1.4	5	42.5	7.5
539	1.7	1.8	4.7	45.6	7.65
544.7	1.6	1.6	5.7	44.6	7.8
546.3	1.7	1.4	5.6	44.8	7.95
545.2	1.5	1.6	5.6	44	8.1
559.2	1.7	2.3	4.9	47.9	8.25
558.6	1.6	2	4.9	44.8	8.4
530.3	1.7	1.9	4.7	44.6	8.55
554.1	1.7	2	5.1	46.3	8.7
525.3	1.5	1.9	5.5	45.3	8.85
565.9	1.7	1.8	5.2	46	9
572.8	1.7	1.4	5.6	45.3	9.15
570.6	1.7	2.1	4.9	47.2	9.3
547.9	1.8	1.5	6	47.6	9.45
550.6	1.6	1.8	5.2	44.7	9.6
584.3	1.9	1.3	6	47.7	9.75
605.9	1.8	2.1	5.7	50	9.9
608.3	1.9	2.6	4.8	51.2	10.05
574.9	1.7	2.1	4.2	44.5	10.2
674.4	1.8	3.3	6.1	57.8	10.35
555.8	1.8	1.8	6	49.6	10.5
589	1.7	2.4	6.3	51.8	10.65
583.7	1.8	2.1	5.6	49.7	10.8
576.1	1.8	1.6	6	48.4	10.95
591.1	1.8	1.8	5.5	47.6	11.1
575.3	1.9	1.9	5.4	50	11.25
552.1	1.6	2.4	3.9	44.8	11.4
566.1	1.6	2.1	5.6	48	11.55
574.2	1.8	2	5	48.4	11.7
577.2	1.6	2.6	5.3	50	11.85
567.6	1.7	2	4.5	45.8	12
567.2	1.7	2.6	5.6	52.3	12.15
597.4	1.7	2.3	6.3	51.5	12.3
574.3	1.7	1.7	6.6	48.9	12.45
589.8	1.8	2.3	5.5	51	12.6
589.7	1.8	1.6	5.2	46	12.75
574	1.7	2.3	6.4	51.7	12.9
566.1	1.8	1.9	6.6	50.9	13.05
594.6	1.8	2.5	5.8	52.4	13.2
600.2	1.9	2.2	5.3	50.6	13.35
582.9	1.7	1.9	6.6	51	13.5
575.3	1.9	1.8	5.5	48.9	13.65
567.4	1.7	2.1	5.05	46.75	13.8
593.2	1.8	1.7	5.2	46.2	13.95
579	1.7	2.2	5.6	48.6	14.1
573.1	1.8	2.1	5.2	49.3	14.25
572.3	1.7	2.6	4.1	47.7	14.4
564.4	1.5	2.1	5.7	47.2	14.55
578.8	1.9	1.4	6.7	50.3	14.7
573.8	1.7	2.1	4.6	46.1	14.85
610.9	1.9	2.2	7	55.4	15
568.5	1.6	2.6	4.9	48.1	15.15
562.5	1.8	1.8	5.2	46.7	15.3
568.2	1.7	2	4.3	44.6	15.45
556.2	1.6	2.2	5.1	46.7	15.6
548.2	1.7	1.3	5.7	43.8	15.75
583.2	1.8	1.4	6.2	48.2	15.9
527.5	1.6	1.5	5.4	44.2	16.05
539.2	1.6	1.5	5.2	43.7	16.2
563.4	1.8	1.4	6.3	47.8	16.35
604.8	1.9	1.8	5	48.8	16.5
617.9	1.5	2	5.5	45.5	16.65
598.9	1.8	1.6	5.7	47.6	16.8
562.4	1.6	2	5.5	47.2	16.95
600.3	1.9	1.5	6.5	50.4	17.1
600.2	1.9	2.2	5.2	50.9	17.25
588.6	1.9	2.1	4.3	48.2	17.4

573.1	1.7	1.7	6.6	48.4	17.55
590.8	1.8	2.4	5.2	51	17.7
574.3	1.8	1.6	5	46	17.85
550.6	1.6	1.9	4.7	44	18
543.6	1.6	2.1	4.1	42.9	18.15
559.1	1.7	1.8	5.8	47.8	18.3
578.3	1.7	2.3	5.1	48.3	18.45
593.8	1.6	2	4.9	45	18.6
610.4	1.9	2.3	5.7	52.7	18.75
593.6	1.8	1.9	5.7	48.9	18.9
579.5	1.8	1.3	6.6	48.8	19.05
564.9	1.8	2.2	5.6	50.2	19.2
574.5	1.6	2.1	5.55	47.8	19.35
546.5	1.6	1.6	5.9	45.5	19.5
544.3	1.6	1.7	5.2	43.4	19.65
563.9	1.6	1.9	6.2	48.4	19.8
582	1.9	2	5	48.9	19.95
593.3	1.9	2.3	5.1	50.6	20.1
580.4	1.8	2	5.2	48.8	20.25
587.7	1.8	1.8	5	47	20.4
591.3	1.8	1.5	6.9	50.3	20.55
571.8	1.8	1.6	4.5	45.1	20.7
581.5	1.9	1.2	5.9	47.6	20.85
589.2	1.7	1.5	5.7	46.2	21
576	1.7	2	5.6	48.6	21.15
578.9	1.8	1.7	5.5	48	21.3
569.4	1.6	1.7	5.5	45.8	21.45
613.2	1.9	1.9	6.9	54.5	21.6
594.2	1.8	2.2	4.9	49	21.75
596.1	1.8	2.3	5.4	50.1	21.9
559.3	1.6	2.1	4.4	44.6	22.05
563.1	1.7	1.7	5	45.3	22.2
560.3	1.7	1.7	5.4	46	22.35
561.2	1.6	2	5.2	45.7	22.5
558.6	1.6	1.4	5.3	42.8	22.65
573.4	1.5	2	5	44.7	22.8
568	1.7	1.8	5	45.3	22.95
588.7	1.5	2.1	5	44.4	23.1
548.3	1.6	1.4	6	44.1	23.25
513.5	1.5	2	5.2	44.6	23.4
553.7	1.6	2	6.2	48.1	23.55
546.5	1.6	2.1	6.5	50.3	23.7
577.5	1.8	1.8	5.1	46.5	23.85
554.9	1.8	1.5	5.4	46.2	24
533.5	1.6	1.8	4.6	43.2	24.15
567.9	1.7	1.8	5.8	48.2	24.3
592.9	1.9	1.6	7.2	52.3	24.45
573.2	1.7	1.9	4.4	44.3	24.6
582	1.9	1.6	6.2	50.1	24.75
580.2	1.8	1.9	6.1	49.6	24.9
612.1	1.9	2	5.1	49.3	25.05
576.8	1.7	1.6	5.4	45.9	25.2
587.4	1.8	2.1	5.2	49.6	25.35
595.3	1.8	2.2	5.3	49.7	25.5
612.5	1.9	1.9	5.8	51.8	25.65

### A3. VALORES DE RADIOACTIVIDAD SECCIÓN CH06

Total[ppm]	K[%]	U[ppm]	Th[ppm]	Dose	DISTANCIA
422.2	1	2.4	2.5	33.1	0
367.6	0.7	2.7	2.5	30.6	0.15
396.7	0.5	3.6	1.8	31.3	0.3
455.9	0.5	4.2	2	35.2	0.45
342.5	0.4	2.9	1.1	24.4	0.6
287.5	0.4	2.3	1.5	22.4	0.75
298.7	0.6	1.7	1.9	21.9	0.9
355.5	0.7	2.4	2	27.6	1.05



389.1	0.7	2.6	2	28.6	1.2
401.6	0.5	3.9	1.4	32	1.35
329.6	0.5	2.8	1.7	26.2	1.5
270.5	0.5	2	1.7	21.3	1.65
251.9	0.5	1.5	1.3	18.6	1.8
271.8	0.5	1.9	1.9	22.8	1.95
276.2	0.6	1.9	1.8	22.3	2.1
299.3	0.7	2	1.7	24.2	2.25
382.7	0.8	2.3	2.9	30.5	2.4
406	0.9	2.3	3.7	34.7	2.55
418.8	1	2.4	3.1	35	2.7
375.9	0.8	2.4	3.1	31.8	2.85
347.4	0.8	2.1	3.8	31.5	3
372.8	0.8	1.8	3.2	29.4	3.15
419.9	0.9	2.2	3.5	33	3.3
417.4	1.1	2	2.9	32.7	3.45
403.5	0.9	2.3	3.2	33.6	3.6
403.1	1	2.5	3.5	36	3.75
381.3	1	1.8	3.4	31.3	3.9
391	0.9	2.2	3.2	32.4	4.05
380.8	0.9	2	3.3	30.9	4.2
370.5	0.9	1.6	3	28.1	4.35
343.9	0.8	1.3	2.7	24.9	4.5
378.5	0.8	2	3.4	31.1	4.65
457.9	1.2	1.7	4.5	36.4	4.8
358.7	0.8	2	2.8	29.2	4.95
333.4	0.8	1.9	2.4	27.2	5.1
296.7	0.7	1.9	1.5	23.5	5.25
307.9	0.7	1.5	1.9	22.7	5.4
314.8	0.7	1.5	2.1	23.4	5.55
360.4	0.9	1.5	2.8	27.8	5.7
371.8	0.9	2.2	2.8	31.2	5.85
498.1	1.4	2.6	4.5	44.1	6
465.4	1.1	2.8	3.2	38	6.15
409.9	0.8	2.4	3.5	33.5	6.3
375.8	0.7	2.5	2.4	29.2	6.45
386.6	0.9	2	2.8	30.2	6.6
379.2	0.8	2	2.7	28.9	6.75
380.8	0.8	2	3.5	31.2	6.9
450	1.2	2	3.8	36.2	7.05
497.3	1.3	2.3	3.9	39.7	7.2
522.7	1.5	2.3	4.3	43.3	7.35
520.1	1.4	2.2	5	43.3	7.5
427.3	0.9	2.3	4.1	35.5	7.65
364.3	0.8	2.2	2.6	29.2	7.8
368.7	0.8	2.2	2.2	28.5	7.95
366	0.9	2	2.2	28.3	8.1
369.6	0.8	1.9	2.7	28.2	8.25
315.9	0.7	1.9	2.4	26	8.4
290.1	0.6	1.8	2.1	23.9	8.55
307.6	0.7	1.9	2.5	25.8	8.7
376.9	0.8	2.5	2.9	31.9	8.85
396.8	0.8	2.6	2.1	30.7	9
360.9	0.8	2.5	1.9	29.1	9.15
379.2	0.8	2.1	3.2	31	9.3
422.7	1.2	2	3.5	35.5	9.45
385.4	0.9	2.1	3.5	32.2	9.6
350.2	0.9	1.7	2.4	27.3	9.75
328.7	0.8	1.7	2.5	26.3	9.9
318.3	0.7	1.8	2.2	24.9	10.05



322.1	0.8	1.6	2.9	26.9	10.2
406.4	1	2	2.8	32	10.35
357.7	0.9	1.5	2.9	28.2	10.5
332.3	0.8	1.6	2.6	26.2	10.65
348.1	0.8	1.8	2.4	27	10.8
338.7	0.7	1.8	2.5	26.1	10.95
425.6	1.1	2.1	3.8	35.4	11.1
515.5	1.5	2.2	4	42.2	11.25
569.7	1.8	2.3	4.3	47.2	11.4
476.6	1.2	2	4.1	37.5	11.55
486.6	1.3	2.3	3.9	40.4	11.7
444.6	1.1	2	3.3	34	11.85
449.1	1.1	1.9	3.5	34.4	12
385.8	0.8	1.7	3.4	29	12.15
386.1	0.9	2.4	3.3	33.1	12.3
377.8	0.7	2.9	2.2	30.5	12.45
403.1	1	2	3.3	32.9	12.6
323.8	0.7	2	2.4	26.8	12.75
285.1	0.6	1.3	2.8	22.1	12.9
273.1	0.6	1.1	2.9	22.2	13.05
326.7	0.8	1.9	1.9	25	13.2
458.9	1.2	2.4	3.2	37.4	13.35
472.8	1.3	2	3.1	36.4	13.5
355.6	0.8	1.7	2.4	26.6	13.65
356.2	0.8	2	2.6	29	13.8
389.9	0.9	2.2	2.8	31.3	13.95
436.4	1.1	2.3	3.2	35.3	14.1
349.7	0.8	2	2.5	28.1	14.25
353	0.8	1.8	2.7	27.4	14.4
403.5	1	1.7	3.2	31.4	14.55
447.4	1.2	2.2	3.8	37.8	14.7
370.4	0.8	2.3	2.9	30.8	14.85
370.4	0.8	2.2	2.2	28.8	15
450.5	1.1	2.1	3.7	36.3	15.15
479.2	1.1	2.3	3.8	37.8	15.3
505.5	1.2	2.6	3.8	40.3	15.45
493.8	1.2	2.7	3.4	40.1	15.6
498.9	1.3	2.6	3.2	39.6	15.75
493.3	1.3	2.1	3.6	38.3	15.9
487.6	1.3	2.2	3.7	39	16.05
489.2	1.2	2.8	3.1	38.9	16.2
545.1	1.3	2.4	4.6	41.8	16.35
484.7	0.9	2.5	3.5	35.2	16.5
475.9	1.1	2.9	3	38.4	16.65
457.5	1.1	2.3	3.4	35.8	16.8
495	1.2	2.8	2.9	38.2	16.95
491.8	1.3	2.6	3.5	40	17.1
507.4	1.2	2.9	4	41.6	17.25
536.2	1.1	3.4	3.9	42.9	17.4
504.3	1.1	2.8	3.3	38.6	17.55
491.9	1.2	2.7	3.3	39.1	17.7
457.2	0.9	2.9	3.5	37.4	17.85
522.6	1.1	2.9	3.2	39.2	18
533.1	1.3	2.7	4.1	43.4	18.15
478.9	1.1	2.7	4.1	40.5	18.3
466.3	1.1	2.5	3.2	36.4	18.45
474.4	0.9	3.3	3.1	38.4	18.6
516.8	1.1	2.7	3.7	39.7	18.75
557.6	1.1	3.5	3.9	44.2	18.9
544.7	1.3	2.8	4.5	44.1	19.05



532	1.4	2.7	4.6	45.2	19.2
509.7	1.3	2.6	4.3	43.3	19.35
470.8	1.3	2	3.9	38.1	19.5
388.4	0.9	2.1	2.8	30.2	19.65
386.5	0.9	2.2	3.4	32.3	19.8
410.2	1.1	2.1	3.3	34.4	19.95
390.9	0.9	1.8	3	30.2	20.1
383.2	0.9	1.5	3.1	28.7	20.25
494.3	1.2	2.9	3.7	41.4	20.4
483.2	1.2	2.6	4	40.5	20.55
509.8	1	3.2	3.1	39.3	20.7
492.6	1.2	2.4	3.6	38	20.85
463.8	1.2	2.3	3.5	37	21
436.3	1	2.1	3.4	33.1	21.15
429.5	1	2.7	3.1	35.7	21.3
470	1.1	2.4	3.9	38.3	21.45
459.4	1.2	1.7	3.8	35.5	21.6
548.2	1.5	2.4	4.1	44.3	21.75
523.2	1.5	2	4.9	43.4	21.9
513.4	1.3	2.2	3.7	39.3	22.05
585.9	1.6	2.3	4.9	47	22.2
623.1	1.7	2.8	5.8	53.1	22.35
651	1.8	2.7	5.4	53.1	22.5
685.1	2.1	2.4	5.8	56.4	22.65
583.3	1.6	2.4	4.7	46.4	22.8
496.7	1.3	2.1	3.9	38.8	22.95
485.7	1.2	2.6	3.4	38.8	23.1
531.9	1.4	2.5	4.5	44.4	23.25
476.2	1.2	2.3	3.5	37.9	23.4
355.6	0.8	1.9	2	26.4	23.55
288.1	0.6	1.6	2.6	23.2	23.7
267.8	0.5	1.8	1.8	21.6	23.85
285	0.7	1.6	1.5	21.2	24
308	0.7	1.9	2.1	24.7	24.15
329.8	0.7	1.8	2.5	26.3	24.3
390.1	0.9	2.5	3.1	34.5	24.45
778.2	2.4	2.5	6.2	61.7	24.6
772.2	2.3	3.2	6.9	66.1	24.75
578.1	1.5	2.7	4.6	46.4	24.9
508.1	1.2	2.6	4.1	41.1	25.05
522	1.3	2.3	4.9	43	25.2
547.2	1.4	2.1	4.3	41.8	25.35
519.2	1.4	2.2	4.1	40.7	25.5
506.9	1.4	2.4	4.7	43.1	25.65
488.4	1.3	2.2	3.9	39.3	25.8
453	1.1	2	3.3	34.2	25.95
564.5	1.7	2.3	4.7	47.2	26.1
456.4	1.3	1.7	3.2	35.2	26.25
442.3	1.2	1.9	3.2	34.8	26.4
455.7	1.3	2.2	3.5	38	26.55
442.7	1.1	2.3	3.6	36.7	26.7
613	1.8	2.4	5.6	52	26.85
631.4	1.8	2.8	4.8	51.9	27
647.2	1.8	2.5	5.9	52.7	27.15
654.4	2	2.4	5.4	54.5	27.3
672.9	1.9	2.4	5.6	53.9	27.45
695.9	2	2.8	5.6	56.2	27.6
598.4	1.7	2.5	5.4	50.2	27.75
442.7	1	2.3	3.3	34.8	27.9
325.9	0.7	1.7	2.6	25.2	28.05



290	0.6	1.5	2	21.8	28.2
310.4	0.7	1.7	1.9	23.4	28.35
321.6	0.7	1.7	2.3	24.4	28.5
321.6	0.8	1.4	2.3	24.9	28.65
384.8	1	2.3	3.2	33.9	28.8
628.4	1.7	2.2	6.2	50.9	28.95
765.8	2.3	2.9	7.4	65.9	29.1
781.6	2.3	3.1	6.6	65.2	29.25
518.5	1.2	2.8	4.1	41.9	29.4
485.9	1.3	2	4.2	38.6	29.55
479.9	1.2	2.3	3.9	39.5	29.7
475.5	1.3	2	4	39.2	29.85
448.4	1.2	2	3.6	35.8	30
384.8	0.8	2.1	2.7	29.6	30.15
473.8	1.3	1.9	4.6	39.8	30.3
371.3	0.8	2.1	2.6	29.2	30.45
361	0.8	1.8	3.2	28.4	30.6
429.7	1.1	2.1	3.5	34.6	30.75
353.7	0.8	1.6	2.1	24.9	30.9
266.8	0.6	1.4	1.8	19.9	31.05
250.7	0.5	1.5	1.4	18.7	31.2
235.1	0.5	1.2	1.7	17.3	31.35
262.5	0.5	1.8	1.8	21.3	31.5
327.7	0.7	1.4	2.8	24.1	31.65
379.7	0.9	2	2.8	29.6	31.8
330.1	0.6	2.1	2.6	27	31.95
364.3	0.8	1.5	3.2	27.3	32.1
494.7	1.3	2.5	4.3	42.3	32.25
545.2	1.5	2.5	4.5	45.1	32.4
359.5	0.7	2.3	3.1	29.5	32.55
366.4	0.8	2.2	3.3	31.1	32.7
416.9	0.6	3.4	2.7	34.3	32.85
396.5	0.9	2.5	2.9	32.7	33
441	1.2	2.1	3.9	37	33.15
412.7	1.1	2.1	3.4	34.5	33.3
311	0.7	1.6	2.4	24.3	33.45
312.9	0.6	1.9	1.9	23.9	33.6
369.5	0.8	2.3	3.2	31.2	33.75
457.4	1.3	2	4.3	39.3	33.9
482	1.2	2.4	3.6	39.1	34.05
379.6	0.8	1.8	3	28.8	34.2
402.1	1	1.6	3.8	31.5	34.35
519.6	1.4	2.3	4.3	42.8	34.5
384.3	0.9	1.9	3.4	31.8	34.65
301.7	0.7	1.4	2.5	23.4	34.8
329	0.7	2.2	2.8	28.4	34.95
301.9	0.6	1.7	2.3	23.7	35.1
289.8	0.6	1.6	2.7	23.8	35.25
310.4	0.7	1.8	2.3	25	35.4
307.2	0.7	1.9	2	25.2	35.55
330.6	0.8	1.5	2.2	25	35.7
368.5	0.9	1.7	3	29.5	35.85
465.9	1.3	2.1	4.3	40.1	36
602.7	1.8	2.1	5.6	50.4	36.15
407.5	1	1.6	3.3	31.3	36.3
320.6	0.7	1.4	2.9	25.2	36.45
325.1	0.8	1.7	2.6	26	36.6
383.2	1	1.7	3.1	30.8	36.75
404	1	2.3	3.1	34.6	36.9
511.8	1.4	2.2	4.1	42.2	37.05



475.9	1.2	2.3	3.9	38.7	37.2
421.4	1.1	2.3	3.4	35.4	37.35
283.4	0.7	1.6	2.3	23.8	37.5
268	0.6	1.7	2.7	23.9	37.65
291	0.6	1.4	2.4	22.4	37.8
336.9	0.7	2	3	28.4	37.95
341.8	0.8	1.8	3.1	28.6	38.1
333.7	0.7	2.5	2.2	28.4	38.25
329.6	0.7	1.6	3.2	26.6	38.4
360.6	0.7	2.5	2.6	29.9	38.55
408.8	0.9	2.4	3.7	34.5	38.7
377.6	0.8	2	4	31.9	38.85
484.9	1.3	2	4.9	41	39
495.2	1.2	2	4.4	39.2	39.15
667.5	1.7	2.5	8	57.1	39.3
600.3	1.5	2.6	6.5	51	39.45
420.6	0.9	1.9	4.3	33.9	39.6
304.3	0.7	1.9	2.6	26	39.75
303.1	0.6	1.7	2.3	23.8	39.9
307.7	0.7	1.4	2.2	22.9	40.05
373.3	0.8	1.5	3.7	29	40.2
410.7	1.1	1.6	4.6	35	40.35
414.8	1.2	1.9	4.1	36.5	40.5
336.7	0.8	1.7	2.8	27.7	40.65
420.8	1.2	2	3.6	36.3	40.8
350.4	0.8	1.8	2.5	27.1	40.95
300.6	0.7	1.8	2.6	25.1	41.1
283.3	0.6	1.8	2.6	24.6	41.25
388.5	1	2.2	2.9	32.8	41.4
284.6	0.6	1.4	2.5	22.4	41.55
268.2	0.5	1.7	2.1	21.3	41.7
301	0.5	1.7	2.7	23.4	41.85
464.3	1.2	2	4.3	38.3	42
329	0.7	1.6	2.9	25.9	42.15
293.2	0.7	1.5	2.4	23.2	42.3
373.9	1	1.4	3.3	29.7	42.45
417.8	1.1	1.9	4.2	36	42.6
447.1	1.2	1.8	4	35.5	42.75
450	1.2	2.2	3.4	36.8	42.9
375.4	1	1.6	3.1	29.5	43.05
399.1	1	1.8	2.8	30.9	43.2
324.5	0.7	1.8	2.6	25.7	43.35
401	1	1.7	3.8	32.6	43.5
299.9	0.7	1.4	2.2	22.6	43.65
305.4	0.7	1.3	3.2	25.2	43.8
453	1.3	1.6	4.7	37.9	43.95
298.3	0.7	1.3	2.7	23	44.1
313	0.6	1.8	3.3	26.6	44.25
435.9	0.8	2.7	3.4	34.6	44.4
387.2	0.8	2.3	3.1	31.2	44.55
404	1	2.1	3.8	34.5	44.7
307	0.6	1.8	2.6	24.6	44.85
254.4	0.5	1.3	2.1	18.9	45
301.3	0.6	1.6	3.3	25.6	45.15
307.9	0.6	1.7	2.7	23.8	45.3
391.2	0.8	2.6	3.3	32.6	45.45
420.8	1	1.8	4.2	33.4	45.6
417.1	1	2.3	4.4	37.1	45.75
409.3	1	1.8	4	33.9	45.9
348.4	0.7	1.8	3	27.6	46.05



305	0.6	1.7	2.3	22.9	46.2
302.4	0.6	1.6	3.1	24.1	46.35
308.1	0.6	1.7	3	25.7	46.5
350.7	0.7	2	3.4	29.2	46.65
367.7	0.9	1.7	3.5	30.4	46.8
501.8	1.5	2.2	4.3	43	46.95
409.8	1.1	1.7	3.2	32.2	47.1
439.2	1	2	4.5	36.2	47.25
363.6	0.8	1.6	3.2	27.4	47.4
348.5	0.7	1.5	3.9	28.1	47.55
400.4	0.9	1.9	4.3	33.4	47.7
403.2	1	1.9	4.4	34.7	47.85
348.7	0.7	1.4	3.3	26.1	48
404.9	0.9	1.5	3.5	29.5	48.15
414.9	0.9	1.8	4.4	33.4	48.3
790	1.6	3.2	10.8	67	48.45
522.6	0.9	2.6	6.1	42.8	48.6
535.1	0.8	2.5	7.7	45.5	48.75
774.3	1.2	2.8	12.6	65.4	48.9
960	1.6	3.9	14.2	80	49.05
952.4	1.5	3.5	14.6	78.1	49.2
956.2	1.4	3.6	14	74.8	49.35
844.6	1.4	3.4	13.1	72.4	49.5
684.7	1.1	2.8	8.6	52.7	49.65
447.7	0.9	2.3	4.8	37.2	49.8
355.9	0.7	2.1	3.6	30.1	49.95
329.9	0.5	2.4	2.4	26.7	50.1
442	0.9	2.2	4.6	35.5	50.25
521.4	1	2.1	5.8	39.2	50.4
608.4	1.3	2.7	7.3	51.5	50.55
609.1	1.3	2.8	7	50.1	50.7
579.7	1.1	3.1	6.6	49.4	50.85
666.6	1.3	2.7	7.3	51.4	51
505.5	0.9	2.4	5	37.7	51.15
472.9	0.9	2.3	4.6	37.2	51.3
454.3	0.9	2.4	4.4	36.2	51.45
485	0.9	2.5	5.5	39.6	51.6
491.1	0.9	2.5	5.5	39.7	51.75
508.6	1	3	4.9	42.1	51.9
541.7	1	3.1	5.7	45.1	52.05
566.5	1.2	3.1	6.2	49.2	52.2
371.5	0.7	2.4	3.1	30.8	52.35
302	0.5	2	2.2	22.9	52.5
282.9	0.4	2.3	1.8	22.4	52.65
268	0.5	1.9	2	21.7	52.8
254.7	0.5	1.4	2.3	20	52.95
247.5	0.5	1.4	1.9	19	53.1
254.5	0.4	1.6	2.2	20.5	53.25
308.4	0.6	1.9	2.4	25.2	53.4
413	1	2.3	3.3	34.2	53.55
397.9	0.9	1.8	3.8	31.2	53.7
429	1	2	3.4	32.8	53.85
448.7	1.1	2.3	4.3	38.4	54
524	1.2	3.1	4.3	44.4	54.15
512.5	1	3.4	3.8	42.4	54.3
436.7	1.1	2.6	3.7	37.9	54.45
408.1	0.9	2.5	3.3	33.9	54.6
469.1	1.1	2.8	3.7	39.9	54.75
413.5	0.9	2.7	2.8	33.4	54.9
414.8	0.8	2.7	3	32.6	55.05



426.4	0.8	2.3	3.1	32	55.2
435.1	1	2.2	4	36.3	55.35
435.1	1.1	2.2	3.7	36.1	55.5
431.7	1	2.1	4.1	35.7	55.65
478.7	1.2	2.3	4.2	39.1	55.8
415.3	0.9	2.7	3	34.4	55.95
389.8	0.9	1.5	3.7	29.6	56.1
354.8	0.7	2	2.7	28.1	56.25
326.8	0.6	2.2	2.8	27.8	56.4
327.4	0.7	2	2.7	27.6	56.55
339.8	0.7	2.2	2.9	28.6	56.7
354.1	0.7	1.9	3.5	28.7	56.85
328.3	0.6	1.9	2.9	26.1	57
330.4	0.7	1.8	2.2	24.5	57.15
369.4	0.7	2	3	28.2	57.3
433.4	1.1	2.4	3.3	36	57.45
375.5	0.8	2	3.2	29.6	57.6
326.6	0.7	2.3	2.6	28	57.75
297.2	0.6	1.6	3	25.1	57.9
270.6	0.6	1.5	1.5	20.2	58.05
271.2	0.6	1.6	1.5	20.4	58.2
317.5	0.6	1.5	2.5	23.3	58.35
309.1	0.7	1.9	2.1	24.5	58.5
311.2	0.6	2	2	24.4	58.65
293.5	0.6	1.4	2.6	23.1	58.8
314.3	0.8	1.8	2.4	26.3	58.95
302.3	0.7	1.5	2.3	23	59.1
289.4	0.6	1.7	2.3	22.8	59.25
308.5	0.6	2	2.3	24.7	59.4
311	0.7	1.9	2.3	24.9	59.55
302.9	0.7	1.7	2.2	24.2	59.7
312.2	0.8	1.4	2.7	24.9	59.85
335	0.7	1.8	2.7	26.1	60
356.8	0.8	1.9	2.9	29.2	60.15
416.8	1.1	1.9	2.7	31.8	60.3
466.9	1.2	2	4.1	38.2	60.45
440.2	1.1	2.2	3.3	35.1	60.6
425	1	2.1	3.2	32.8	60.75
585.7	1.2	3.7	4.5	48.2	60.9
633.2	1.3	4.1	4.2	50.9	61.05
645.3	1.4	3.8	4.1	50.2	61.2
370.7	0.8	2.1	3.1	30.3	61.35
346.8	0.7	2.1	2.7	27.1	61.5
335	0.6	2.1	2.9	26.9	61.65
377.3	0.9	2.1	2.5	29.4	61.8
440.5	1	2.4	3.9	36.3	61.95
504.8	1.2	2.7	4.3	42.3	62.1
464	1.2	2.5	3.1	37.7	62.25
539.3	1.4	2.3	4.8	43.2	62.4
443.3	1	2.4	3.6	35.9	62.55
386.3	0.8	1.8	2.4	27	62.7
378.8	0.8	2.1	2.6	28.6	62.85
425.5	0.8	2.6	3	33	63
497.8	0.7	4	2.7	38.8	63.15
483.3	0.8	3.8	2.8	38.6	63.3
469.8	0.7	4.2	2.4	38.8	63.45
388.6	0.8	2.4	2.1	28.8	63.6
333.1	0.7	1.9	2.2	24.8	63.75
353.6	0.7	1.9	2.5	26.4	63.9
394.2	0.8	1.8	3.6	30.5	64.05



450.2	1	2.4	3.8	36.9	64.2
521.4	1.4	2.4	5.2	44.6	64.35
471.2	1	2.9	3.7	38.8	64.5
492.7	1	2.5	4.2	38.1	64.65
544.7	1.6	2.3	4.2	43.8	64.8
572	1.5	2.5	5.1	47.3	64.95
486.5	1.3	2.4	4.7	42	65.1
540.3	1.5	2.7	5	47	65.25
533.6	1.5	1.9	4.3	41.8	65.4
503.3	1.2	2.7	4.8	42.8	65.55
481.4	1.2	2.6	3.5	38.8	65.7
508.4	1.3	2.3	4.3	41.3	65.85
478.6	1.2	2.1	4.8	39.6	66
418.1	1	2.2	3.8	35.5	66.15
451.2	1	2.5	3.5	36.5	66.3
436.7	1	2.2	3.6	34.4	66.45
475.2	1.2	2.7	4	40.7	66.6
430.5	1	2.5	2.9	33.8	66.75
499.8	1.3	2.6	4.2	42.8	66.9
425.5	1.1	1.7	3.9	34.5	67.05
357.3	0.8	1.7	3.3	28.5	67.2
343.5	0.7	1.9	2.7	27.7	67.35
386.4	1	1.7	3	30.8	67.5
408.2	0.8	2.6	3.7	34.6	67.65
393.9	0.8	2.1	3.4	30.2	67.8
399.6	0.8	2.7	2.7	33.2	67.95
418.6	0.8	2.3	3.5	33.1	68.1
610	1.6	2.8	5.6	51.4	68.25
517	1.4	2.5	4.7	44.3	68.4
555.5	1.4	3.2	4.9	49.5	68.55
528.1	1.2	2.6	5.4	44.3	68.7
488.6	1	3.2	3.6	40	68.85
429.7	0.9	2.6	3.7	35.2	69
476.6	1.1	2.7	3.3	37.6	69.15
596.7	1.3	3.4	4.5	47.5	69.3
501.1	1	2.9	3	36.5	69.45
485.3	0.8	3.9	3.3	40.2	69.6
390.3	0.6	2.8	2.4	29.2	69.75
432.8	0.6	3.5	2.2	33.4	69.9
418	0.7	3.6	2.3	34.1	70.05
349	0.5	2.4	2.2	26	70.2
349.4	0.6	2.7	2.7	29.4	70.35
329.7	0.7	2	2.6	26.8	70.5
380.2	0.8	2.4	3.2	32.3	70.65
446	1.1	2.1	4.6	37.8	70.8
423.7	0.8	2.3	2.9	30.3	70.95
380.8	0.8	2.5	3.1	32.8	71.1

**A4. ESPEORES Y PROFUNDIDADES SIMULADAS PARA ARREGLOS ESTRATO-CRECIENTE, AGRADACIONAL, ESTRATO-DECRECIENTE Y ESTRATO-DECRECIENTE DISMINUIDO EN UN 75%.**

ARREGLO		ARREGLO		ARREGLO		ARREGLO	
ESTRATO-DECRECIENTE		AGRADACIONAL		ESTRATO-CRECIENTE		ESTRATO-DECRECIENTE (-75%)	
ESPESOR	PROFUNDIDAD	ESPESOR	PROFUNDIDAD	ESPESOR	PROFUNDIDAD	ESPESOR	PROFUNDIDAD
5	325.55	5	325.55	0.05	271.125	1.25	325.55
4.975	322.05625	5.1	322.05625	0.075	270.99375	1.24375	322.05625
4.95	318.575	5	318.575	0.1	270.85	1.2375	318.575
4.925	315.10625	5.1	315.10625	0.125	270.69375	1.23125	315.10625
4.9	311.65	5	311.65	0.15	270.525	1.225	311.65
4.875	308.20625	5.1	308.20625	0.175	270.34375	1.21875	308.20625
4.85	304.775	5	304.775	0.2	270.15	1.2125	304.775
4.825	301.35625	5.1	301.35625	0.225	269.94375	1.20625	301.35625
4.8	297.95	5	297.95	0.25	269.725	1.2	297.95
4.775	294.55625	5.1	294.55625	0.275	269.49375	1.19375	294.55625
4.75	291.175	5	291.175	0.3	269.25	1.1875	291.175
4.725	287.80625	5.1	287.80625	0.325	268.99375	1.18125	287.80625
4.7	284.45	5	284.45	0.35	268.725	1.175	284.45
4.675	281.10625	5.1	281.10625	0.375	268.44375	1.16875	281.10625
4.65	277.775	5	277.775	0.4	268.15	1.1625	277.775
4.625	274.45625	5.1	274.45625	0.425	267.84375	1.15625	274.45625
4.6	271.15	5	271.15	0.45	267.525	1.15	271.15
4.575	267.85625	5.1	267.85625	0.475	267.19375	1.14375	267.85625
4.55	264.575	5	264.575	0.5	266.85	1.1375	264.575
4.525	261.30625	5.1	261.30625	0.525	266.49375	1.13125	261.30625
4.5	258.05	5	258.05	0.55	266.125	1.125	258.05
4.475	254.80625	5.1	254.80625	0.575	265.74375	1.11875	254.80625
4.45	251.575	5	251.575	0.6	265.35	1.1125	251.575
4.425	248.35625	5.1	248.35625	0.625	264.94375	1.10625	248.35625
4.4	245.15	5	245.15	0.65	264.525	1.1	245.15
4.375	241.95625	5.1	241.95625	0.675	264.09375	1.09375	241.95625
4.35	238.775	5	238.775	0.7	263.65	1.0875	238.775
4.325	235.60625	5.1	235.60625	0.725	263.19375	1.08125	235.60625
4.3	232.45	5	232.45	0.75	262.725	1.075	232.45
4.275	229.30625	5.1	229.30625	0.775	262.24375	1.06875	229.30625
4.25	226.175	5	226.175	0.8	261.75	1.0625	226.175
4.225	223.05625	5.1	223.05625	0.825	261.24375	1.05625	223.05625
4.2	219.95	5	219.95	0.85	260.725	1.05	219.95
4.175	216.85625	5.1	216.85625	0.875	260.19375	1.04375	216.85625
4.15	213.775	5	213.775	0.9	259.65	1.0375	213.775
4.125	210.70625	5.1	210.70625	0.925	259.09375	1.03125	210.70625
4.1	207.65	5	207.65	0.95	258.525	1.025	207.65
4.075	204.60625	5.1	204.60625	0.975	257.94375	1.01875	204.60625
4.05	201.575	5	201.575	1	257.35	1.0125	201.575
4.025	198.55625	5.1	198.55625	1.025	256.74375	1.00625	198.55625
4	195.55	5	195.55	1.05	256.125	1	195.55
3.975	192.55625	5.1	192.55625	1.075	255.49375	0.99375	192.55625
3.95	190.075	5	190.075	1.1	254.85	0.9875	190.075



3.925	187.60625	5.1	187.60625	1.125	254.19375	0.98125	187.60625
3.9	185.15	5	185.15	1.15	253.525	0.975	185.15
3.875	182.70625	5.1	182.70625	1.175	252.84375	0.96875	182.70625
3.85	180.275	5	180.275	1.2	252.15	0.9625	180.275
3.825	177.85625	5.1	177.85625	1.225	251.44375	0.95625	177.85625
3.8	175.45	5	175.45	1.25	250.725	0.95	175.45
3.775	173.05625	5.1	173.05625	1.275	249.99375	0.94375	173.05625
3.75	170.675	5	170.675	1.3	249.25	0.9375	170.675
3.725	168.30625	5.1	168.30625	1.325	248.49375	0.93125	168.30625
3.7	165.95	5	165.95	1.35	247.725	0.925	165.95
3.675	163.60625	5.1	163.60625	1.375	246.94375	0.91875	163.60625
3.65	161.275	5	161.275	1.4	246.15	0.9125	161.275
3.625	158.95625	5.1	158.95625	1.425	245.34375	0.90625	158.95625
3.6	156.65	5	156.65	1.45	244.525	0.9	156.65
3.575	154.35625	5.1	154.35625	1.475	243.69375	0.89375	154.35625
3.55	152.075	5	152.075	1.5	242.85	0.8875	152.075
3.525	149.80625	5.1	149.80625	1.525	241.99375	0.88125	149.80625
3.5	147.55	5	147.55	1.55	241.125	0.875	147.55
3.475	145.30625	5.1	145.30625	1.575	240.24375	0.86875	145.30625
3.45	143.075	5	143.075	1.6	239.35	0.8625	143.075
3.425	140.85625	5.1	140.85625	1.625	238.44375	0.85625	140.85625
3.4	138.65	5	138.65	1.65	237.525	0.85	138.65
3.375	136.45625	5.1	136.45625	1.675	236.59375	0.84375	136.45625
3.35	134.275	5	134.275	1.7	235.65	0.8375	134.275
3.325	132.10625	5.1	132.10625	1.725	234.69375	0.83125	132.10625
3.3	129.95	5	129.95	1.75	233.725	0.825	129.95
3.275	127.80625	5.1	127.80625	1.775	232.74375	0.81875	127.80625
3.25	125.675	5	125.675	1.8	231.75	0.8125	125.675
3.225	123.55625	5.1	123.55625	1.825	230.74375	0.80625	123.55625
3.2	121.45	5	121.45	1.85	229.725	0.8	121.45
3.175	119.35625	5.1	119.35625	1.875	228.69375	0.79375	119.35625
3.15	117.275	5	117.275	1.9	227.65	0.7875	117.275
3.125	115.20625	5.1	115.20625	1.925	226.59375	0.78125	115.20625
3.1	113.15	5	113.15	1.95	225.525	0.775	113.15
3.075	111.10625	5.1	111.10625	1.975	224.44375	0.76875	111.10625
3.05	109.075	5	109.075	2	223.35	0.7625	109.075
3.025	107.05625	5.1	107.05625	2.025	222.24375	0.75625	107.05625
3	105.05	5	105.05	2.05	221.125	0.75	105.05
2.975	103.05625	5.1	103.05625	2.075	219.99375	0.74375	103.05625
2.95	101.075	5	101.075	2.1	218.85	0.7375	101.075
2.925	99.10625	5.1	99.10625	2.125	217.69375	0.73125	99.10625
2.9	97.15	5	97.15	2.15	216.525	0.725	97.15
2.875	95.60625	5.1	95.60625	2.175	215.34375	0.71875	95.60625
2.85	94.075	5	94.075	2.2	214.15	0.7125	94.075
2.825	92.55625	5.1	92.55625	2.225	212.94375	0.70625	92.55625
2.8	90.95	5	90.95	2.25	211.725	0.7	90.95
2.775	89.35625	5.1	89.35625	2.275	210.49375	0.69375	89.35625
2.75	87.775	5	87.775	2.3	209.25	0.6875	87.775
2.725	86.20625	5.1	86.20625	2.325	207.99375	0.68125	86.20625
2.7	84.65	5	84.65	2.35	206.725	0.675	84.65
2.675	83.10625	5.1	83.10625	2.375	205.44375	0.66875	83.10625
2.65	81.575	5	81.575	2.4	204.15	0.6625	81.575



2.625	80.05625	5.1	80.05625	2.425	202.84375	0.65625	80.05625
2.6	78.55	5	78.55	2.45	201.525	0.65	78.55
2.575	77.05625	5.1	77.05625	2.475	200.19375	0.64375	77.05625
2.55	75.575	5	75.575	2.5	198.85	0.6375	75.575
2.525	74.10625	5.1	74.10625	2.525	197.49375	0.63125	74.10625
2.5	72.65	5	72.65	2.55	196.125	0.625	72.65
2.475	71.20625	5.1	71.20625	2.575	194.74375	0.61875	71.20625
2.45	69.775	5	69.775	2.6	193.35	0.6125	69.775
2.425	68.35625	5.1	68.35625	2.625	191.94375	0.60625	68.35625
2.4	66.95	5	66.95	2.65	190.525	0.6	66.95
2.375	65.55625	5.1	65.55625	2.675	189.09375	0.59375	65.55625
2.35	64.175	5	64.175	2.7	187.65	0.5875	64.175
2.325	62.80625	5.1	62.80625	2.725	186.19375	0.58125	62.80625
2.3	61.45	5	61.45	2.75	184.725	0.575	61.45
2.275	60.10625	5.1	60.10625	2.775	183.24375	0.56875	60.10625
2.25	58.775	5	58.775	2.8	181.75	0.5625	58.775
2.225	57.45625	5.1	57.45625	2.825	180.24375	0.55625	57.45625
2.2	56.15	5	56.15	2.85	178.725	0.55	56.15
2.175	54.85625	5.1	54.85625	2.875	177.19375	0.54375	54.85625
2.15	53.575	5	53.575	2.9	175.65	0.5375	53.575
2.125	52.30625	5.1	52.30625	2.925	174.09375	0.53125	52.30625
2.1	51.05	5	51.05	2.95	172.525	0.525	51.05
2.075	49.80625	5.1	49.80625	2.975	170.94375	0.51875	49.80625
2.05	48.575	5	48.575	3	169.35	0.5125	48.575
2.025	47.35625	5.1	47.35625	3.025	167.74375	0.50625	47.35625
2	46.15	5	46.15	3.05	166.125	0.5	46.15
1.975	44.95625	5.1	44.95625	3.075	164.49375	0.49375	44.95625
1.95	43.775	5	43.775	3.1	162.85	0.4875	43.775
1.925	42.60625	5.1	42.60625	3.125	161.19375	0.48125	42.60625
1.9	41.45	5	41.45	3.15	159.525	0.475	41.45
1.875	40.30625	5.1	40.30625	3.175	157.84375	0.46875	40.30625
1.85	39.175	5	39.175	3.2	156.15	0.4625	39.175
1.825	38.05625	5.1	38.05625	3.225	154.44375	0.45625	38.05625
1.8	36.95	5	36.95	3.25	152.725	0.45	36.95
1.775	35.85625	5.1	35.85625	3.275	150.99375	0.44375	35.85625
1.75	34.775	5	34.775	3.3	149.25	0.4375	34.775
1.725	33.70625	5.1	33.70625	3.325	147.49375	0.43125	33.70625
1.7	32.65	5	32.65	3.35	145.725	0.425	32.65
1.675	31.60625	5.1	31.60625	3.375	143.94375	0.41875	31.60625
1.65	30.575	5	30.575	3.4	142.15	0.4125	30.575
1.625	29.55625	5.1	29.55625	3.425	140.34375	0.40625	29.55625
1.6	28.7	5	28.7	3.45	138.525	0.4	28.7
1.575	27.85625	5.1	27.85625	3.475	136.69375	0.39375	27.85625
1.55	27.025	5	27.025	3.5	134.85	0.3875	27.025
1.525	26.20625	5.1	26.20625	3.525	132.99375	0.38125	26.20625
1.5	25.4	5	25.4	3.55	131.125	0.375	25.4
1.475	24.60625	5.1	24.60625	3.575	129.24375	0.36875	24.60625
1.45	23.825	5	23.825	3.6	127.35	0.3625	23.825
1.425	23.05625	5.1	23.05625	3.625	125.44375	0.35625	23.05625
1.4	22.3	5	22.3	3.65	123.525	0.35	22.3
1.375	21.55625	5.1	21.55625	3.675	121.59375	0.34375	21.55625
1.35	20.825	5	20.825	3.7	119.65	0.3375	20.825



1.325	20.10625	5.1	20.10625	3.725	117.69375	0.33125	20.10625
1.3	19.4	5	19.4	3.75	115.725	0.325	19.4
1.275	18.70625	5.1	18.70625	3.775	113.74375	0.31875	18.70625
1.25	18.025	5	18.025	3.8	111.75	0.3125	18.025
1.225	17.35625	5.1	17.35625	3.825	109.74375	0.30625	17.35625
1.2	16.7	5	16.7	3.85	107.725	0.3	16.7
1.175	16.05625	5.1	16.05625	3.875	105.69375	0.29375	16.05625
1.15	15.425	5	15.425	3.9	103.65	0.2875	15.425
1.125	14.80625	5.1	14.80625	3.925	101.59375	0.28125	14.80625
1.1	14.2	5	14.2	3.95	99.525	0.275	14.2
1.075	13.60625	5.1	13.60625	3.975	97.44375	0.26875	13.60625
1.05	13.025	5	13.025	4	95.35	0.2625	13.025
1.025	12.45625	5.1	12.45625	4.025	93.24375	0.25625	12.45625
1	11.9	5	11.9	4.05	91.125	0.25	11.9
0.975	11.35625	5.1	11.35625	4.075	88.99375	0.24375	11.35625
0.95	10.825	5	10.825	4.1	86.85	0.2375	10.825
0.925	10.30625	5.1	10.30625	4.125	84.69375	0.23125	10.30625
0.9	9.8	5	9.8	4.15	82.525	0.225	9.8
0.875	9.30625	5.1	9.30625	4.175	80.34375	0.21875	9.30625
0.85	8.825	5	8.825	4.2	78.15	0.2125	8.825
0.825	8.35625	5.1	8.35625	4.225	75.94375	0.20625	8.35625
0.8	7.9	5	7.9	4.25	73.725	0.2	7.9
0.775	7.45625	5.1	7.45625	4.275	71.49375	0.19375	7.45625
0.75	7.025	5	7.025	4.3	69.25	0.1875	7.025
0.725	6.60625	5.1	6.60625	4.325	66.99375	0.18125	6.60625
0.7	6.2	5	6.2	4.35	64.725	0.175	6.2
0.675	5.80625	5.1	5.80625	4.375	62.44375	0.16875	5.80625
0.65	5.425	5	5.425	4.4	60.15	0.1625	5.425
0.625	5.05625	5.1	5.05625	4.425	57.84375	0.15625	5.05625
0.6	4.7	5	4.7	4.45	55.525	0.15	4.7
0.575	4.35625	5.1	4.35625	4.475	53.19375	0.14375	4.35625
0.55	4.025	5	4.025	4.5	50.85	0.1375	4.025
0.525	3.70625	5.1	3.70625	4.525	48.49375	0.13125	3.70625
0.5	3.4	5	3.4	4.55	46.125	0.125	3.4
0.475	3.10625	5.1	3.10625	4.575	43.74375	0.11875	3.10625
0.45	2.825	5	2.825	4.6	41.35	0.1125	2.825
0.425	2.55625	5.1	2.55625	4.625	38.94375	0.10625	2.55625
0.4	2.3	5	2.3	4.65	36.525	0.1	2.3
0.375	2.05625	5.1	2.05625	4.675	34.09375	0.09375	2.05625
0.35	1.825	5	1.825	4.7	31.65	0.0875	1.825
0.325	1.60625	5.1	1.60625	4.725	29.19375	0.08125	1.60625
0.3	1.4	5	1.4	4.75	26.725	0.075	1.4
0.275	1.20625	5.1	1.20625	4.775	24.24375	0.06875	1.20625
0.25	1.025	5	1.025	4.8	21.75	0.0625	1.025
0.225	0.85625	5.1	0.85625	4.825	19.24375	0.05625	0.85625
0.2	0.7	5	0.7	4.85	16.725	0.05	0.7
0.175	0.55625	5.1	0.55625	4.875	14.19375	0.04375	0.55625
0.15	0.425	5	0.425	4.9	11.65	0.0375	0.425
0.125	0.30625	5.1	0.30625	4.925	9.09375	0.03125	0.30625
0.1	0.2	5	0.2	4.95	6.525	0.025	0.2
0.075	0.10625	5.1	0.10625	4.975	3.94375	0.01875	0.10625
0.05	0.025	5	0.025	5	1.35	0.0125	0.025

## REFERENCIAS

1. Alemán L. A., 1980, *Migración y acumulación de hidrocarburos en los sedimentos terciarios del Chicontepec, zona Poza Rica, Veracruz, Tesis Licenciatura (Ingeniero Geólogo)-UNAM, Facultad de Ingeniería, p. 50-55.*
2. Allain, C., and Cloitre, M., 1991, *Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets, Physical Review A, 44(6), p. 3552-3558.*
3. Adams, J. A. S., and Weaver, C. E., 1958, *Thorium-t-Uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies: Bulletin of the American Association of petroleum Geologists, 42, p. 43.*
4. Arellano, G. J. y Yussim, G. S., 2004, *Discordancias progresivas en la secuencia sedimentaria cretácica en México., Simposio, La Investigación en la Facultad de Ingeniería, p. 3.*
5. Arizabalo, R. D., Oleschko, K., Korvin, G., Lozada, M., Castrejón, R. y Ronquillo, G., 2006, *Lacunarity of geophysical well logs in the Cantarell oil field, Gulf of México , 45 (2), pp. 99-11.*
6. Barker, R. W. and Berggren, W. A., 1977, *Paleoceno and early Eoceno of the Río Grande and Tampico embayments; foraminiferal biostratigraphy and paleoecology: Marine Micropaleontology, 2, p. 67-108.*
7. Bassiouni, Z., 1994, *Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs, SPE Textbook Series, 4, 372 p.*
8. Belt, B.C., 1925, *Stratigraphy of the Tampico District of Mexico: Bulletin American Association of Petroleum Geologist, 9(1), 136-144.*
9. Benavides, L., 1956, *Descripción de las provincias petroleras en: XX Congreso Geológico Internacional, Symposium sobre Yacimientos de Petróleo y Gas América del Norte, Tomo III, p. 366-562.*
10. Bitter, M. R., 1993, *Sedimentation and provenance of Chicontepec sandstones with implications for uplift of the Sierra Madre Oriental and Teziutlan Massif, east-central Mexico, en Pindell, J.L. y Perkins, B.F., (eds.), Mesozoic and Early Cenozoic*

- Development of the Gulf of Mexico and Caribbean Region, Gulf Coast Section SEPM, 13th Annual Research Conference, p. 154-172.*
11. Busch, D. A. and Goveia, S. A., 1978, *Stratigraphy and Structure of Chicontepec Turbidites, Southeastern Tampico Misantla Basin, Mexico, Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, 62, p. 235- 246.
  12. Cantú, Ch. A., 1985, *Is there a Chicontepec Paleocanyon in the Paleoceno of eastern México, Journal of Petroleum Geology*, 8 (4), p. 423-434.
  13. Carr, J.R., 1997, *Statistical self-affinity, fractal dimension, and geological interpretation, Engineering Geology*, 48, p. 269-282.
  14. Carrillo, B. J., 1980, *Paleocañones Terciarios de la Planicie Costera del Golfo de México, Bol.Asoc.Mex.Geólogos Petroleros*, 32 (1), p. 27-55.
  15. Casados, M. A., 2002, *Diagnóstico Municipal de Chicontepec, p. 46, recuperado el 20 de enero 2012 de portal.veracruz.gob.mx/47CE814C488A5780E040A8C02E004.*
  16. Cassidy, J., 1981, *Techniques of field gamma-ray spectrometry, Mineral, Mag.* 44, p. 391–398.
  17. Chen C. and Hiscott R. N., 1999, *Statistical analysis of turbidite cycles in submarine fan successions; tests for short-term persistence, Journal of Sedimentary Research*, 69, p. 486-504.
  18. Chen C. and Hiscott R. N., 2004, *Statistical analysis of facies clustering in submarine-fan turbidite successions, Journal of Sedimentary Research*, v. 69 no. 2 p. 505-517.
  19. Clarck, B. E. and Steel, R. J., 2006, *Eocene turbite population statics from shelf edge to basin floor , Spitsbergen, Svalbard, Journal of Sedimentary Research*, , 76, 903–918.
  20. Contreras, B. A. y Gío, A. R., 1985, *Consideraciones paleobiológicas de los icnofósiles de la Formación Chicontepec en el estado de Puebla: Revista del Instituto de Geología*, 6(1), 73-85.
  21. Doveton, J. H., 1991, *Lithofacies and geochemical facies profiles from nuclear wire line logs: New subsurface templates for sedimentary modeling, Kansas Geological Bull.* 233, p. 101-110.
  22. Dumble, E. T., 1918, *Geology of Northern end of the Tampico Embayment Area: California Academy of Sciences, Procceding*, 8, p. 113-156.

23. Ehrenberg, S.N., 1991, *Kaolinized, potassium-leached zones at the contacts of the Garn Formation, Haltenbanken mid-Norwegian continental shelf: Marine and Petroleum Geology*, 8, p. 19.
24. Feder, J., 1988, *Fractals*, Plenum Press, New York, 283 p.
25. Felletti, F., 2004, *Spatial variability of Hurst statistics in the Castagnola Formation, Tertiary Piedmont Basin, NW Italy: discrimination of sub-environments in a confined turbidite system*, Geological Society, London, *Special Publications*, 222, p. 285-305.
26. Felletti, F., and Bersezio R., 2010, *Validation of Hurst statistics: a predictive tool to discriminate turbiditic sub-environments in a confined basin*, Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Milano, via Mangiagalli 34, 20133 I-Milano, Italy, p. 401-412.
27. Gamper, M. A., 1977, *Bioestratigrafía del Paleoceno y Eoceno de la Cuenca Tampico-Misantla basada en los foraminíferos planctónicos: Revista del Instituto de Geología*, 1(2), p. 117-128.
28. Glover, P., 2000, *Petrophysics MSc Course, Notes Spectral Gamma Ray Log, Chapter 12*, p. 115.
29. Gumiel, P., Sanderson, D. J., Roberts, S. y Campos, R., 1992, *El uso del análisis fractal como discriminador de sistemas filonianos auríferos en el área de la Condosera, Extremadura España*, *Geogaceta* 12, p. 3-7.
30. Hassan, M., Hossin, A. and Combaz, A., 1976, *Fundamentals of the differential gamma-ray log interpretation technique*, SPWLA 17th Annual, Symposium Transactions Paper 8, p. 1-7.
31. Hewett, T. A., 1986, *Fractal Distributions of Reservoir Heterogeneity and Their Influence on Fluid Transport*. Society of Petroleum Engineers (SPE) Paper 15386, presented in SPE Ann. Tech. Conf., New Orleans.
32. Husinec, A., Basch D., Rose and B., Read, J. F., 2008, *FISCHERPLOTS: An Excel spreadsheet for computing Fischer plots of accommodation change in cyclic carbonate successions in both the time and depth domains*, Elsevier, *Computers & Geosciences* 34, p. 269–277.

33. Levinson, A. A., and Coetzee, G.L., 1978, *Implications of disequilibrium in exploration for uranium ores in the surficial environment using radiometric techniques*, *Miner. Sci., Eng.* 10 (1), p. 19–27.
34. López-Ramos, E., 1979, *Geología de México, Tomo II, 2da. Edición, México, D.F.*, 454 p.
35. Lugo- Hubp, J., 1990, *El relieve de la República Mexicana*, Instituto de Geología, UNAM, *Revista*, 9(1), p 81-111.
36. Malinverno, A., 1997, *On the power law size distribution of turbidite beds*. *Basin Research*, 9, p. 263–274.
37. Mandelbrot, B. B., 1977, *Fractals: Form, Chance, and Dimension*, San Fransisco, W. H. Freeman and Company, p. 352.
38. Mandelbrot, B. B., 1983, *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Co., New York, 468 p.
39. Mesa, J. O., and Poveda, G., 1993, *The Hurst effect: The scale of fluctuation Approach*, *Water Resources Research*, 29, No. 12, P. 3995-4002.
40. Miranda, M. E., Oleschko, K., Parrot, J. F., Castrejón, V. F., Taud, H. y Brambila, F., 2006, *Porosidad de los yacimientos naturalmente fracturados: una clasificación fractal*, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(2), p. 199-214.
41. Moon, J. L. and Chaudhuri, S., 1976, *Clay mineral studies of the Lower Permian Havensville shale in Kansas and Oklahoma*, *Clays and Clay Minerals*, 24, pp. 239-245.
42. Muir, J. M., 1936, *Geology of the Tampico Region: Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist Tulsa, Oklahoma, U.S.A.*, 280 p.
43. Mutti, E. and Ricci Luchi, F., 1975, *Turbidite facies and facies Associatons*. In: *ctExamples of turbidite facies and facies associations from Selected formations of the Northern Apennines. Field Trip Guidebook A-1 1: Int. Sed. Congr. IX, Nice*, pp. 21-36.
44. Mukhopadhyay, B., Chakraborty P. P. y Majumder T., 2004, *A modified Waldron test based on sliding skewness for determining asymmetric cycle in a turbidite section*, *Geosciences Journal*, 8(2), p. 171-177.
45. Murray, C. J., Lowe, D. R., Graham, S. A., Martinez, P. A., Zeng, J., Carroll, A.R., Cox, R., Hendrix, M., Heubeck, C., Miller, D., Moxon, I. W., Sobel, E., Wendebourg, J. and

- Williams, T., 1996, Statistical analysis of bed-thickness patterns in a turbidite section from the Great Valley Sequence, Cache Creek, northern California, Journal of sedimentary Research, 66 (5), p. 900-908.*
46. *Nájera, H., 1952, Estudio de las formaciones del Eoceno en la región de Poza-Rica: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, p. 71-115.*
47. *Nava, P., Alegría L. L., y Álvarez, M., 2001, Los Sistemas Petroleros de la Región de Tampico – Misantla, Tesis de Licenciatura, Ingeniero Petrolero, México, UNAM, 132 p.*
48. *Nuttal, W. L. F., 1930, Eocene foraminifera from Mexico: Journal of Paleontology, 4, p. 271-293.*
49. *Pérez-López, R., Muñoz-Martín, A., Paredes, C., de Vicente, G., and Elorza, F.J., 2000, Dimensión fractal de la distribución espacial de fracturas en el área granítica de El Berrocal (Sistema Central): relación con el tensor de esfuerzos, Revista de la Sociedad Geológica de España, 13, p. 487–503.*
50. *Pérez H. C, 1990, Estudio geológico y cálculo del volumen original de hidrocarburos del Campo Miquetla, Formación Chicontepec, Tesis de Licenciatura, Ingeniero Geólogo, México, UNAM, 124 p.*
51. *Plotnick, R. E., and Gardner, R. H., 1996, Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns, Physical Review E 53(5), p. 5461.*
52. *Restrepo, D. P., Mesa, O., y Arango, H., 2001, Conjuntos Fractales en el tiempo y el Espacio, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, p. 51-59.*
53. *Rothman, D. H., and Grotzinger, J. P., 1995, Scaling properties of gravity-driven sediments, Nonlinear Processes in Geophysics 2: p. 178-185.*
54. *Schlager, W., 2004, Fractal nature of stratigraphic sequences: Geology, 32(3), p. 185-188.*
55. *Selley, R.C., 1976, Subsurface environmental analysis of North Sea sediments, American Association of petroleum geologist Bulletin, 60(2), p. 184-195.*
56. *SGM (Servicio Geológico Mexicano), Léxico Estratigráfico de México, 2012, “Chicontepec Formación”, Recuperado el 17 de Enero 2012, de <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Chicontepec.pdf>*
57. *Sheriff, R. E., 1989, Geophysics Methods, Prentic Hall, New Jersey, USA. p. 147-159.*



58. Turcotte, D., 1992, *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge, Cambridge University Press, 221 p.
59. Turner, M. J., Blackledge, J. M., and Andrews, P. R., 1998, *Fractal geometry in digital imaging: Cambridge, UK, Academic Press*, 328 p.
60. Viniegra, O. F., 1965, *Geología del Macizo de Teziutlan y de la Cuenca Cenozoica de Veracruz: Boletín AMGP*, 17, (7-12), p. 101-163.
61. Wang, Y., Evans, M. E., Xu, T. C., Rutte, N., Ding, Z. and Liu, X. M., 1991, *Rescaled range analysis of paleoclimatic proxies, Can. J. Earth, SCI., Vol. 29*, p. 296-300.
62. Xu, Y., and Burton, P. W., 1999, *Spatial Fractal Evolutions and Hierarchies for Microearthquakes in Central Greece, Pure and Applied Geophysics*, 154(1), pp. 73-99.