

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



## CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y RADIOACTIVA DE LA FORMACIÓN SAN ANTONIO, ESTADO ANZOÁTEGUI, VENEZUELA

Trabajo Especial de Grado  
presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela por la **Br. Khelymey  
Uzcátegui** para obtener el Título  
de Licenciada en Geoquímica

Caracas, Marzo de 2011

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA




**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y RADIOACTIVA DE LA  
FORMACIÓN SAN ANTONIO, ESTADO ANZOÁTEGUI,  
VENEZUELA**

Trabajo Especial de Grado  
presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela por la **Br. Khelymey  
Uzcátegui** para obtener el Título  
de Licenciada en Geoquímica

Caracas, Marzo de 2011

## ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: **CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y RADIOACTIVA DE LA FORMACION SAN ANTONIO, ESTADO ANZOÁTEGUI, VENEZUELA**, presentado por la Br. Khelymey Darleny Uzcategui Reveitte, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por esta Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciada en Geoquímica.




---

Prof. Liliana López  
Tutora




---

Prof. María del Carmen Gómez  
Tutora



---

Prof. Manuel Martínez  
Jurado



---

Prof. Federico Galarraga  
Jurado

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por iluminarme y darme fuerzas para enfrentar cada obstáculo que se presentó en mi camino.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela y al Instituto de Ciencias de La Tierra, por brindarme el conocimiento y los instrumentos necesarios para culminar esta etapa de mi vida.

A mi abuelo Humberto, quien me guía y me cuida desde el cielo. Te amo abuelito!!

A mis padres y a mi familia por llenarme de amor, de sonrisas y de apoyo cuando más los necesite. A mi mami por saber ponerme carácter cuando estaba necia y por saber que palabras decir para ayudarme a sobreponerme; a mi papi por siempre saber sacarme una sonrisa y por tenerme tanta paciencia a pesar todo... LOS AMO MUCHISIMO...

A la profesora Liliana López, por tenerme tanta paciencia y brindarme su apoyo no solo durante mi proyecto, sino durante los momentos difíciles que se presentaron. Por ayudarme a entender y superar mis limitaciones y por siempre preocuparse por mí. Gracias por todo profe!!

A la profesora Patricia Lugo, quien me recibió y me despide de mi carrera, gracias por sus palabras, su apoyo, sus consejos y su cariño.

A la profesora María del Carmen Gómez, por sus comentarios, sugerencias y ayuda.

Al profesor Manuel Martínez, por ser uno de los mejores profesores de la carrera, quien me enseñó que con un poco de esfuerzo todo se puede lograr.

Al profesor Santiago Marrero, por ser un gran jefe de laboratorio y entender cuando no podía cumplir mis horas jajaja. Gracias por cuidarnos y apoyarnos siempre profe!!

A Alexmar, Gibran, Ana K, Nadeztha y Richard "*mi grupo*" jajaja, por ser mis mejores amigos, por todos los lindos momentos que vivimos durante la carrera, por siempre estar para mí cuando los necesité, por regalarme sonrisas, llantos, molestias y recuerdos imborrables. Porque sin importar las diferencias entre nosotros siempre serán especiales para mí. Los quiero chicos!!

A Vanessa López por ser desde el colegio más que una mejor amiga, una hermanita mayor... Gracias por tantos años de amistad, de consejos y cariño... Tqm amiga...

A Carlitos por ser más que un profesor un amigo siempre dispuesto a ayudar. A Albani, Mariacarolina, Henry, Edgar, Jeffrey, Luisa, Kris, Carlos, Antonio, Yrasenia y L. Mujica por su apoyo y por tantos raticos divertidos. A Kamal y a Eduard por ser más que los mejores compañeros de laboratorio, ser grandes amigos, por sus locuras, por sus regaños. Gracias chic@s los quiero mucho a todos!!

Al proyecto caracterización radioactiva y bioestratigráfica de la formación San Antonio. Localidad tipo, río Querecual, estado Anzoátegui. Cuenca Oriental de Venezuela CDCH UCV-PG-03-6518-2006 por el financiamiento.

Gracias a todos los que de una u otra forma estuvieron brindándome su apoyo y su cariño durante estos 5 años.

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudiaron las relaciones existentes entre las medidas de radioactividad natural total (GRtotal) y discriminada por elementos (U, Th y K) y los resultados de los análisis geoquímicos (Ctotal, Cinorgánico, COT y concentración de bitumen) realizados en las muestras de la sección tipo de la Formación San Antonio ubicada en el Río Querecual, Anzoátegui, Venezuela, con objeto de conocer su utilidad en la determinación de las variaciones ocurridas en las condiciones redox del ambiente de sedimentación de la formación, y para el determinar su efectividad en la identificación de rocas madres.

Los resultados obtenidos en la Formación San Antonio, demuestran que sí existe una relación entre los resultados geoquímicos y los radioactivos, ya que aquellas muestras que presentan altas concentraciones de COT, presentan altos valores de GRtotal y de los elementos (especialmente U). A su vez, ambas variables están relacionadas con la litología, quedando que la mayoría de las lutitas, lutitas calcáreas, margas, calizas y calizas margosas (rocas madre), se encuentran en el intervalo alto de GRtotal (1000 – 2000cps), bajos – medios de U (25 – 75cps), medios – excelentes de COT (1,5 – 5,4) y altos de bitumen (140 – 405ppm); mientras que las areniscas calcáreas en su mayoría presentan valores bajos de GRtotal (<700cps), muy bajos – bajos de U (<50cps), bajos de COT (~1,7%) y bajos de bitumen (~64ppm), pudiendo relacionarse con la baja eficiencia de expulsión de hidrocarburos en la formación. Lo que demuestra la efectividad de la técnica en la determinación de materia orgánica y por tanto en la identificación de rocas madre.

La relación Th/U permitió determinar que si bien las condiciones redox de sedimentación del Grupo Guayuta (Fm. Querecual y San Antonio) fueron anóxicas, existen diferencias entre ellas, ya que las de San Antonio fueron anóxicas en los sedimentos, donde esta presenta una interfase O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S, mientras que las de Querecual fueron anóxicas euxínicas. Con la relación Th/K y los valores tan altos de torio se pudo determinar que durante la sedimentación de la Formación San Antonio, el aporte de clastos a la cuenca fue mayor al ocurrido durante la sedimentación de Querecual, razón por la cual existe tanta diferencia entre ambas en cuanto a los valores de GRtotal y la litológica.

## INDICE

CONTENIDO	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>3</b>
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.1 Roca madre</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.2 Caracterización de una roca madre</b> .....	<b>4</b>
<i>Cantidad</i> .....	<b>5</b>
<i>Calidad</i> .....	<b>5</b>
<i>Madurez</i> .....	<b>8</b>
<b>2.1.3 Radioactividad como indicador de variación en las condiciones paleoambientales</b> .....	<b>10</b>
<i>Radioactividad</i> .....	<b>10</b>
<i>Fuentes naturales</i> .....	<b>10</b>
<i>Indicadores paleoambientales</i> .....	<b>13</b>
<b>2.2 ANTECEDENTES</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3 GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>18</b>
<b>3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1 TRABAJO DE CAMPO</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2 TRATAMIENTO FÍSICO</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3 ANALISIS QUÍMICOS</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2.1 Extracción de bitumen</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2.2 Determinación de Carbono (total, orgánico e inorgánico)</b> .....	<b>22</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1. LITOLOGÍA DE LA FORMACIÓN SAN ANTONIO</b> .....	<b>24</b>

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ROCA MADRE DE LA FORMACIÓN SAN ANTONIO .....	29
4.3. CARACTERIZACIÓN RADIOACTIVA DE LA FORMACIÓN SAN ANTONIO .....	35
4.4 RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE Ct, Cinorg, COT Y LAS MEDIDAS DE RADIOACTIVIDAD .....	50
5. CONCLUSIONES .....	57
6. RECOMENDACIONES .....	59
7. REFERENCIAS .....	60
8. APÉNDICES .....	65
<b>Apéndice 1:</b> Patrones y curva de calibración para el Ct realizada con el equipo LECO C-144.....	65
<b>Apéndice 2:</b> Curva de calibración para el Cinorg y fórmulas para determinar la concentración de Cinorg en las muestras.....	66
<b>Apéndice 3:</b> Resultados obtenidos para la Formación San Antonio.....	67

## INDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	Página
<b>Figura 1:</b> Diagrama de van Krevelen (modificado de Killops y Killops, 1993; Einsele, 2000)...	9
<b>Figura 2:</b> Gráfico de relación de Th/K - Th/U (modificado de Doveton, 1994 en Gómez 2006).	12
<b>Figura 3:</b> Zona de estudio (tomado de Rosales, 1967).....	20
<b>Figura 4:</b> Arenisca de la Formación San Antonio.....	25
<b>Figura 5:</b> Caliza de la Formación San Antonio.....	25
<b>Figura 6:</b> Lutita de la Formación San Antonio.....	25
<b>Figura 7:</b> Columna estratigráfica de la Formación San Antonio (modificado de López <i>et al.</i> , 2010).....	26
<b>Figura 8:</b> Colores presentados por las muestras según la tabla decolores de Munsell (1973)....	27
<b>Figura 9:</b> Distribución de las litologías presentes en la Formación San Antonio.....	27
<b>Figura 10:</b> Distribución de las litologías presentes en la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).....	28
<b>Figura 11:</b> Distribución de las rocas según su litología y su COT.....	30
<b>Figura 12:</b> Distribución de Ct, Cinorg, COT y bitumen en la columna estratigráfica de la sección tipo de la Formación San Antonio (modificado de López <i>et al.</i> , 2010).....	32
<b>Figura 13:</b> Distribución de Ct, Cinorg, COT y bitumen en la columna estratigráfica para la Formación Querecual (modificado de López <i>et al.</i> , 2010).....	33
<b>Figura 14:</b> Relación entre COT y Cinorg para las muestras de la Formación San Antonio.....	34
<b>Figura 15:</b> Relación K – GRtotal para la Formación San Antonio.....	36
<b>Figura 16:</b> Relación U – Grtotal para la Formación San Antonio.....	36
<b>Figura 17:</b> Relación Th – GRtotal para la Formación San Antonio.....	37
<b>Figura 18:</b> Relación K – GRtotal para la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).....	37
<b>Figura 20:</b> Relación Th – GRtotal para la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).....	38
<b>Figura 19:</b> Relación U – GRtotal para la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).....	38
<b>Figura 21:</b> Distribución porcentual de muestras de la Formación San Antonio según los valores de K discriminando por litología.....	40



<b>Figura 22:</b> Distribución porcentual de muestras de la Formación San Antonio según los valores de U discriminando por litología.....	40
<b>Figura 23:</b> Distribución porcentual de muestras de la Formación San Antonio según los valores de Th discriminando por litología.....	41
<b>Figura 24:</b> Distribución de la radioactividad total en las muestras de la Formación San Antonio.....	42
<b>Figura 25:</b> Distribución de la radioactividad total de la Formación San Antonio, discriminada por litología.....	43
<b>Figura 26:</b> Distribución de la radioactividad total de la Formación Querecual, discriminada por litología (modificado de Gómez, 2006).....	43
<b>Figura 27:</b> Resultados Radioactivos (GRtotal, K, U y Th) ubicados en la columna estratigráfica de la sección tipo de la Formación San Antonio (modificado de López <i>et al.</i> , 2010).....	44
<b>Figura 28:</b> Distribución de las areniscas, calizas y calizas margosas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/U.....	46
<b>Figura 29:</b> Distribución de las lutitas, lutitas calcáreas y las margas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/U.....	47
<b>Figura 30:</b> Distribución de las areniscas, calizas y calizas margosas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/K.....	48
<b>Figura 31:</b> Distribución de las lutitas, lutitas calcáreas y las margas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/K.....	48
<b>Figura 32:</b> Distribución de las muestras de la Formaciones San Antonio y Querecual en el diagrama presentado por Doveton (1994 en Gómez, 2006).....	49
<b>Figura 33:</b> Relación entre GRtotal y COT para las muestras de la Formación San Antonio.....	51
<b>Figura 34:</b> Relación entre COT y U para las muestras de la Formación San Antonio.....	52
<b>Figura 35:</b> Relación entre COT y Uautigénico para las muestras de la Formación San Antonio.....	53
<b>Figura 36:</b> Resultados radioactivos (totales y discriminados) y resultados geoquímicos (Ct, Cinorg, COT, concentración de bitumen) en la columna estratigráfica de la sección tipo de la Formación San Antonio .....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

### CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>Tabla 1:</b> Uso de valores de % COT para clasificar las rocas generadoras de hidrocarburos, en términos de cantidad de materia orgánica presente .....	5
<b>Tabla 2:</b> Relación entre los tipos de hidrocarburos generados y el tipo de materia orgánica presente .....	8
<b>Tabla 3:</b> Concentraciones (%m/m) de Ctotal, Cinorg y COT para la Formación San Antonio.....	29

## 1. INTRODUCCIÓN

Una roca madre es una roca sedimentaria que posee tamaño de grano tipo limo y arcilla al igual que una alta concentración de materia orgánica, cuyo un intervalo mínimo de carbono orgánico total (COT) es de 0,4% para lutitas y de 0,16% para rocas carbonáticas (Hunt, 1967 y Ronov, 1958 en Hunt, 1979), lo cual implica que son rocas que pueden llegar a ser, son o han sido capaces de generar cantidades significantes o importantes de petróleo (Tissot y Welte, 1984; Peters *et al.*, 2005).

Junto a la materia orgánica acumulada en las rocas madre se pueden encontrar diversos elementos, los cuales pueden estar formando parte de las diferentes fases de estas rocas sedimentarias. Algunos de estos elementos podrían ser radioactivos, lo que permite que puedan ser utilizados como indicadores geoquímicos de condiciones redox del ambiente de sedimentación (Natural Resources Canada, 2010). Uno de estos elementos es el potasio (K) presente en las lutitas (rocas madre por excelencia), éste se encuentra en minerales tales como moscovita ( $\text{KAl}_2(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$ ), feldespatos potásicos, arcillas o sales tales como silvina (KCl) y carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Otros elementos radioactivos también pueden encontrarse acumulados en concentraciones traza, como el uranio (U) y el torio (Th), que según el elemento pueden estar presentes en las fases minerales u orgánicas que componen a estas rocas (Gómez, 2006; Natural Resources Canada, 2010). El Th es un elemento inmóvil, que posee un único estado de oxidación ( $\text{Th}^{(\text{IV})}$ ), este puede encontrarse principalmente en minerales resistatos, sin embargo también puede ser adsorbido por las arcillas. Por su parte, el U presenta dos estados de oxidación ( $\text{U}^{(\text{IV})}$  y  $\text{U}^{(\text{VI})}$ ), que le permite ser lixiviado, fijado en los sedimentos o estar asociado al material orgánico, según sean las condiciones del ambiente de sedimentación en el que se encuentre (Gómez, 2006; Natural Resources Canada, 2010).

Por otra parte, la radioactividad es la emisión de radiación causada por el cambio espontáneo de un elemento en otro. Aunque se emiten varios tipos de radiación, sólo la radiación gamma tiene una penetración suficiente como para ser de uso práctico en el registro de la radioactividad

natural de rocas y sedimentos, la cual puede medirse en superficie o en subsuelo, ya sea de manera total o discriminada por elementos (Milson, 2003).

Los valores de radioactividad varían según el tipo de roca y sedimento que se está estudiando, ya que esta propiedad depende en gran medida de su composición donde las litologías con un alto contenido de arcillas tendrán mayores valores de radioactividad que las litologías consideradas como limpias. En contraste, rocas o sedimentos que contengan materia orgánica, además de alto contenido de arcillas, mostrarán la mayor radioactividad. Como ejemplo, se presenta el caso de las lutitas marinas orgánicas o lutitas bituminosas (*black shales*), las cuales presentan valores de radioactividad mayores en comparación con otras lutitas de origen diferente (J. R. Associates Civil and Environmental Geophysics, 2010). En términos generales, se espera que exista una buena relación entre litologías con alto contenido de materia orgánica y altos valores de rayos gamma, lo que implica valores altos de U (Gómez, 2006).

En la Cuenca Oriental de Venezuela se tienen algunas formaciones consideradas como rocas madre de alta calidad, entre ellas destacan la Formación Querecual y la Formación San Antonio. Esta investigación tiene lugar en la Formación San Antonio, ubicada en el Río Querecual en Anzoátegui nororiental, entre los puntos situados a 600 metros aguas abajo desde Paso Hediondo, y a 150 metros aguas arriba desde Paso Santa Anita. Esta formación consiste esencialmente en calizas y lutitas bituminosas, así como numerosas capas de areniscas duras de color gris claro y de chert, además de la presencia de diques de areniscas (González de Juana *et al.*, 1980).

Los datos radiactivos se correlacionaran con datos geoquímicos tales como cantidad, tipo y madurez de la materia orgánica. El uso de estas relaciones permite una caracterización más efectiva de la formación estudiada, ya que con éstas se logrará la determinación de cambios en las condiciones paleoambientales, ocurridos durante el proceso de sedimentación; además pueden servir como recurso predictivo para establecer un mejor muestreo, especialmente en áreas donde los análisis químicos son insuficientes o están ausentes (Gómez, 2006).

Para la realización de este estudio se plantean los siguientes objetivos:

### **1.1.Objetivo General:**

Realizar la caracterización geoquímica y radiactiva para la localidad tipo de la Formación San Antonio en el Río Querecual, estado Anzoátegui, y correlacionar estos datos a fin de interpretar las variaciones ocurridas en el ambiente de sedimentación.

### **1.2.Objetivos Específicos:**

Conocer la radioactividad de la Formación San Antonio, mediante la determinación de la radioactividad natural total y los elementos U, Th y K.

Correlacionar los datos de radioactividad obtenidos con aquellos correspondientes a C (orgánico y inorgánico) y concentración de bitumen.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación se presenta una revisión de conceptos e implicaciones teóricas, así como estudios similares anteriormente realizados, que darán soporte a los aspectos involucrados en la caracterización geoquímica y radiactiva de la Formación San Antonio, permitiendo con ello un mayor entendimiento y conocimiento de la investigación a realizar.

### 2.1.FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1.1. Roca Madre

Una *roca madre* es una roca sedimentaria que posee tamaño de grano tipo limo y arcilla, al igual que un alto contenido de materia orgánica, cuyo un rango mínimo de carbono orgánico para lutitas es de 0,4% y para rocas carbonáticas es de 0,16% (Hunt, 1967 y Ronov, 1958 en Hunt, 1979), y de 0,5 y de 0,3 respectivamente (Tissot y Welte, 1984; Glennie, 1998), lo que implica que son rocas que pueden llegar a ser o han sido capaces de generar cantidades significantes o importantes de petróleo (Tissot y Welte, 1984; Peters *et al.*, 2005). El término roca madre es aplicado independientemente de si la materia orgánica es madura o inmadura, y su potencial está definido en términos de cantidad y tipo de querógeno, así como la etapa de madurez alcanzada (Tissot y Welte, 1984).

#### 2.1.2. Caracterización de Rocas Madre

Para lograr una caracterización completa de las rocas madre de petróleo, se debe conocer su potencial de generación de hidrocarburos; éste se obtiene evaluando la cantidad, calidad y madurez térmica de la materia orgánica presente en la roca (Dow, 1977; Peters *et al.*, 2005). La cantidad y la calidad de la materia orgánica, están controladas principalmente por las condiciones del ambiente de sedimentación; esto incluye la tasa de depositación y soterramiento, la relación de materia orgánica marina o terrestre que se deposita (fuente de la materia orgánica),

condiciones redox del ambiente, y la cantidad de retrabajo que sufre el material orgánico antes del soterramiento (Gluyas y Swarbrick, 2004), mientras que la madurez es controlada principalmente por la relación existente entre la temperatura y el tiempo (Hunt, 1979)

*Cantidad de materia orgánica:* la cantidad de materia orgánica, efectivamente convertida en acumulaciones importantes de petróleo, es relativamente bajo, con valores cercanos al 15% (Hunt, 1979; Glennie 1998). Esta cantidad de materia orgánica es normalmente medida en porcentaje de carbono orgánico total (%COT) (Hunt, 1979; Glennie 1998). En base a ello, se pueden clasificar las rocas madre, desde aquellas con muy baja concentración de COT, hasta aquellas que poseen concentraciones altas. En la tabla 1 se presentan los valores de COT de las rocas madre, haciendo una separación entre litologías clásticas y carbonáticas; esto último se debe a que, el %COT requerido para que una roca clástica se considere roca madre de petróleo no es el mismo que el requerido para una carbonática (Glennie, 1998), debido a que, en esta última, la materia orgánica es casi enteramente de material amorfo derivada del plancton; mientras que las lutitas, tienen altas cantidades de material leñoso, el cual es capaz de formar pocos hidrocarburos (Hunt, 1979).

**Tabla 1:** Concentraciones de COT (% m/m) para clasificar las rocas generadoras de hidrocarburos, en términos de cantidad de materia orgánica presente (Glennie, 1998).

COT (rocas clásticas)	Designación de la roca	COT (rocas carbonáticas)
< 0,5	Muy pobre	< 0,3
0,5 – 1,0	Pobre	0,3 – 0,5
1,0 – 2,0	Media	0,5 – 1,0
2,0 – 4,0	Buena	1,0 – 2,0
4,0 – 12,0	Excelente o muy buena	2,0 – 6,0
> 12,0	Lutita o limolita bituminosa.	> 6,0
> 65,0	Carbón	-

*Calidad de la materia orgánica:* determina el tipo de hidrocarburos generados por la roca madre y depende, principalmente, del tipo de querógeno presente en la roca (Hunt, 1979). El querógeno se define como una mezcla compleja de material orgánico y mineral (Vandenbroucke y Largeau, 2007), insoluble en solventes orgánicos comunes. Este término no se limita a la

materia orgánica diseminada en sedimentos antiguos, sino que puede usarse para definir a toda la materia orgánica sedimentaria, incluyendo aquella presente en depósitos orgánicos “puros” (carbones húmicos), sedimentos recientes y suelos (Durand, 1980).

Las fuentes principales de materia orgánica son marina, lacustre, terrestre y reciclada. La materia orgánica puede dividirse fundamentalmente en dos tipos: la sapropélica, que está formada mayoritariamente por organismos planctónicos, provenientes de ambientes restringidos, marinos o lacustres, contiene altas concentraciones de grupos alifáticos y es capaz de generar cantidades importantes de petróleo (crudo, gas); y la húmica, la cual se forma a partir de materia orgánica con un gran aporte de plantas superiores o terrestres y es depositada generalmente en ambientes oxidantes, provocando que parte de esa materia orgánica se degrade y disminuya su calidad, generando principalmente gas (Hunt, 1979; Killips y Killips, 1993). A partir de estas diferencias en cuanto a las fuentes de materia orgánica se han propuesto diferentes tipos de querógeno, entre los cuales se encuentran:

- ✓ Tipo I: para muestras inmaduras, presenta relaciones de  $H/C > 1,5$  y  $O/C$  entre 0,03 y 0,1. Este querógeno presenta altas concentraciones de lípidos, particularmente cadenas alifáticas, y proviene de materia orgánica algal o amorfa (sapro pélica); esto puede estar relacionado a una acumulación selectiva del material algal. Este tipo de querógeno se relaciona generalmente con ambientes lacustres (Tissot y Welte, 1978; Hunt, 1979; Vandenbroucke y Largeau, 2007).
- ✓ Tipo II: para muestras inmaduras, presenta relaciones  $H/C$  de 1,3 y  $O/C$  de 0,15; esta materia orgánica contiene cetonas y grupos con ácidos carboxílicos, cadenas alifáticas y anillos nafténicos. Este tipo de querógeno es más abundantes que el tipo I y está asociado a ambientes marinos (moderadamente profundos), que tienen como fuente principal de materia orgánica, microorganismos planctónicos (fitoplancton y zooplancton) y bacterias (Tissot y Welte, 1978; Vandenbroucke y Largeau, 2007).



- ✓ Tipo II-S: presenta relaciones H/C y O/C similares al tipo II clásico; su diferencia radica en que presenta una relación S/C >0,04. Ambos querógenos provienen de fuentes similares de materia orgánica, sin embargo, el querógeno II-S se asocia principalmente a litologías bajas en Fe (carbonáticas), lo que evita que el S forme facies minerales propias, tales como la pirita, por el contrario, en litologías siliciclásticas si puede ocurrir la precipitación de sulfuros (Orr,1986 en Vandenbroucke y Largeau, 2007).
  
- ✓ Tipo III: en muestras inmaduras, se observa una relación de H/C <0,8 y de O/C entre 0,02 y 0,4. Frecuentemente está asociado a ambientes deltaicos y su fuente principal es material orgánico terrestre (materia orgánica húmica); contiene una alta proporción de compuestos poliaromáticos, cetonas heteroaromáticas y grupos de ácidos carboxílicos, con muy poca proporción de grupos alifáticos (Hunt, 1979; Vandenbroucke y Largeau, 2007).
  
- ✓ Tipo IV: presenta una relación de H/C de 0,3 a 0,45 y de O/C >0,3. Está formado principalmente por materia orgánica muy oxidada y retrabajada. Este término (Tipo IV) se ha ido dejando en desuso. Sin embargo, algunos autores siguen utilizándolo para nombrar querógenos de bajas relaciones H/C, aunque no implique ninguna característica geoquímica (Vandenbroucke y Largeau, 2007).

La relación existente entre los tipos de querógeno y los hidrocarburos generados se muestra en la tabla 2. Comparando los tipos de querógenos entre sí, se observa que los querógenos tipo I y II, compuestos por materia orgánica más alifática y con mayor relación H/C, son capaces de generar mayores cantidades de hidrocarburos líquidos. Por otra parte, aquellos compuestos por materia orgánica menos alifática y con menor relación H/C, presentan una capacidad de generación variable, quedando que el tipo III genera principalmente gas, mientras que el IV prácticamente no genera hidrocarburos (Tissot y Welte, 1978; Hunt, 1979; Vandenbroucke y Largeau, 2007).

**Tabla 2:** Relación entre los tipos de hidrocarburos generados y el tipo de materia orgánica presente (Hunt, 1979; Vandenbroucke y Largeau, 2007).

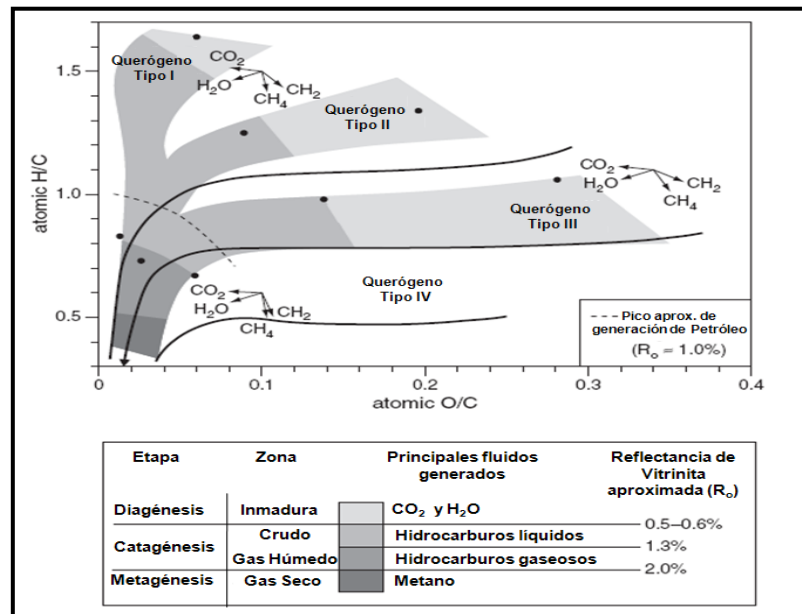
Tipo de querógeno	Sapropélica		Húmica	
	Tipo I y II	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
H/C	> 1,5	~1,3	<0,8	0,3 – 0,45
O/C	0,03 – 0,1	~0,15	0,02 – 0,4	>0,3
Fuente de materia orgánica	Marina – lacustre	Marina – terrestre	Terrestre	Terrestre – reciclada
Tipo de hidrocarburos generados	Principalmente crudo	Crudo y gas	Principalmente gas	Trazas de gas, no genera crudo

*Madurez de la materia orgánica:* las etapas de madurez de la materia orgánica, están representadas en el diagrama de van Krevelen, mostrado en la figura 1. En este diagrama se utilizan las relaciones de H/C, O/C o los índices de H y O, en conjunto con el tipo de querógeno presente, a fin de mostrar el camino de evolución de la materia orgánica (Peters *et al.*, 2005; Vandenbroucke y Largeau, 2007). Estas etapas son:

- ✓ **Diagénesis temprana:** es la primera etapa de evolución de la materia orgánica, ocurre en un rango de profundidad muy restringido, usualmente hasta unos pocos metros por debajo de la interfase agua – sedimento. Los organismos vivos y las reacciones bioquímicas pueden participar, directamente, a través de procesos de biodegradación, o indirectamente, por reacciones de la materia orgánica sedimentada con sus productos metabólicos. En esta etapa, se generan transformaciones en los tipos de enlace y en las relaciones de N/C, S/C y O/C de la materia orgánica presente, que conlleva a la formación de las sustancias húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas), precursoras del querógeno (Vandenbroucke y Largeau, 2007).
- ✓ **Diagénesis:** esta etapa ocurre a una profundidad > 1000m y a temperaturas  $\leq 50$  °C (Peters *et al.*, 2005). En esta etapa es en la que el querógeno pierde grandes cantidades de oxígeno, principalmente en forma de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>O, debido a las alteraciones biológicas, químicas y físicas que sufre la materia orgánica (Peters *et al.*, 2005; Vandenbroucke y Largeau, 2007). Con el incremento de la profundidad, la concentración de ácidos fúlvicos y húmicos

disminuye continuamente hasta hacerse despreciable, por otra parte, las huminas se transforman en el querógeno (Vandenbroucke y Largeau, 2007).

- ✓ **Catagénesis:** esta etapa ocurre a profundidades > 2000m y a un rango de temperatura entre 50 y 150 °C. En esta etapa, hay una pérdida de hidrógeno y de carbono, relacionándose con un incremento de la aromaticidad del querógeno (Vandenbroucke y Largeau, 2007), generando con esto el bitumen, que es la materia orgánica presente en la roca madre, soluble en compuestos orgánicos comunes como cloroformo, y diclorometano (Gluyas y Swarbrick, 2004; Killops y Killops, 1993). Luego de la migración se transforma en petróleo, que se refiere a un material compuesto principalmente por carbono e hidrógeno, que consta de tres fases (sólida, líquida y gaseosa), entre las que se encuentran el bitumen, gases hidrocarburos y crudo (Peters *et al.*, 2005).
- ✓ **Metagénesis:** esta etapa ocurre entre 150 y 200 °C (antes del metamorfismo) (Peters *et al.*, 2005). En ésta se produce el proceso de demetilación, con el consecuente aumento de la aromaticidad del querógeno residual y la generación de CH<sub>4</sub> (metano termogénico) (Vandenbroucke y Largeau, 2007).



**Figura 1:** Diagrama de van Krevelen (modificado de Killops y Killops, 1993; Einsele, 2000).

### **2.1.3. Radioactividad como indicador de variación en las condiciones paleoambientales**

*Radioactividad:* Es la emisión de radiación causada por el cambio espontáneo de un elemento en otro. La mayoría de los núcleos están constituidos por un conjunto de protones y neutrones, y la suma de esas partículas genera el número másico. Los isótopos de los elementos son átomos que tienen el mismo número atómico pero diferente número másico (por variación en el número de neutrones) entre ellos tenemos los isótopos estables (aquellos que no se desintegran espontáneamente) y los isótopos radiactivos (aquellos que si experimentan desintegración espontánea, la cual da lugar finalmente a isótopos estables) (Skoog *et al.*, 2001).

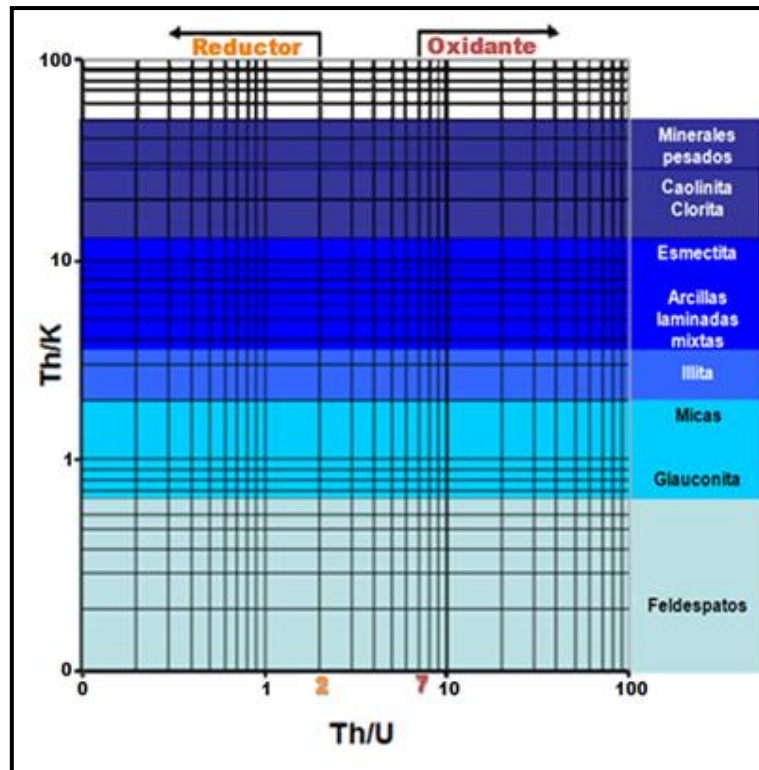
Aunque, con la desintegración radioactiva de los elementos, se emiten varios tipos de radiación (gamma y X), sólo la radiación gamma tienen una penetración suficiente como para ser de uso práctico en el registro de la radioactividad natural de rocas y sedimentos, la cual puede medirse en superficie o en subsuelo, ya sea de manera total o discriminada por elementos (Milson, 2003).

*Fuentes naturales de radioactividad:* La ocurrencia natural de isótopos podría ser responsable de la radioactividad de las rocas. Comparando los tiempos de vida media de los isótopos de los tres elementos radioactivos más comunes (uranio, torio y potasio), que son  $^{238}\text{U}$ :  $4,4 \times 10^9$  años,  $^{40}\text{K}$ :  $1,3 \times 10^9$  años y  $^{232}\text{Th}$ :  $1,4 \times 10^{10}$  años, y el de la Tierra que es  $4 \times 10^9$  años, se observa que los valores del tiempo de vida media de los elementos son mayores al de la Tierra, explicando así su ocurrencia natural en las rocas (Ellis, 2007).

Considerando las rocas sedimentarias, y especialmente aquellas que pueden ser rocas madre por excelencia (lutitas, limolitas y carbonatos), se observa que hay numerosos minerales que contienen al potasio en su composición. Esto se debe a que es uno de los elementos más comunes, no solo en ese tipo de rocas sino en la corteza terrestre en general, por esta razón es la mayor fuente de radioactividad natural. El K puede encontrarse en sales, feldespatos y en minerales de arcilla (Fairbridge, 1972; Ellis, 2007). Por su parte, los otros dos elementos radiactivos más comunes (Th y U), aunque se encuentran en cantidades traza en la fases

minerales y orgánicas que componen las rocas, aportan gran parte de la cantidad de radioactividad natural a éstas. Estos elementos pueden encontrarse formando facies minerales propias en minerales como la torita ( $\text{Th SiO}_4$ ) y la uraninita ( $\text{UO}_2$ ), pero también en minerales pesados como zircón ( $\text{ZrSiO}_4$ ), monacita ( $(\text{Ce, La, Y, Th}) \text{PO}_4$ ), apatito ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$ ) o adsorbidos en los minerales de arcillas y en los sedimentos, como es el caso del Th o en el caso del U, asociado a la materia orgánica (Adams and Weaver, 1958; Fairbridge, 1972; Klein y Hurlbut, 1998; Ellis, 2007; Natural Resources Canada, 2010).

Se ha reportado que existe una alta correlación entre minerales de arcilla y concentraciones elementales de Th y K, esto se debe a que estos elementos, se encuentran principalmente en la fracción clástica de las rocas madre (Ellis, 2007). Mientras que para el uranio, la única correlación significativa que ha sido encontrada es con la materia orgánica en las muestras de roca, debido a la afinidad de este elemento a las condiciones bajo las cuales se acumula dicha materia orgánica (Ellis, 2007). En la figura 2, se muestra un gráfico que combina las relaciones de Th/K y Th/U, el cual ayuda a establecer las condiciones redox del ambiente de sedimentación (relación Th/U) y los diferentes de arcillas asociados (relación Th/K) (Doveton, 1994 en Gómez 2006). Esto se debe a que un enriquecimiento relativo de U implica condiciones anóxicas en el ambiente de sedimentación; mientras que el enriquecimiento de K, sirve como indicador de especies de minerales de arcilla presentes en la roca (Doveton y Prenskey, 1992).



**Figura 2:** Gráfico de relación de Th/K - Th/U (modificado de Doveton, 1994 en Gómez 2006).

Los valores de radioactividad varían según el tipo de roca y sedimento que se está estudiando, ya que esta propiedad depende en gran medida de la composición que tengan. Las lutitas, arcillas y margas generalmente presentan mayor radioactividad que las arenas limpias, areniscas, calizas y dolomitas, lo cual implica que la radioactividad es proporcional al contenido de minerales de arcilla que presenten las rocas y sedimentos estudiados. Dentro del grupo de las lutitas, tenemos las lutitas marinas orgánicas o lutitas bituminosas, las cuales presentan valores de radioactividad mayores en comparación con otras lutitas de origen diferente. Estos altos valores de radioactividad se presentan, ya que el COT y el U están íntimamente relacionados entre sí, debido a que el U es reducido provocando su acumulación junto a la materia orgánica debido a las condiciones del ambiente en el que ésta se encuentra (J. R. Associates Civil and Environmental Geophysics, 2010; Bloxam, 1964). Por lo tanto, en términos generales, se espera que dentro de cada tipo litológico donde se encuentren altas concentraciones de carbono orgánico total (COT) se presenten altas concentraciones de U, y esto a su vez esté relacionado con altos valores de rayos gamma (Gómez, 2006).

La oxigenación de la columna de agua, ejerce un control importante en cuanto a la abundancia y tipo de materia orgánica preservada en los sedimentos, afectando así el potencial generador de la roca madre de petróleo. Del mismo modo influye la concentración de algunos metales traza, pudiendo ser relevante para el entendimiento de la génesis de ciertos tipos de depósitos minerales (Jones y Manning, 1994).

*Indicadores paleoambientales:* Geoquímicamente se han propuesto algunos índices de paleo-oxigenación en secuencias antiguas de litologías de grano fino. En general, estos se dividen en tres grupos: aquellos basados en la formación de pirita durante la diagénesis temprana (C/S, índice o grado de piritización: DOP), aquellos donde se emplean las relaciones entre varios metales traza (V/Cr, Ni/Co, Ni/V, (Cu+Mo)/Zn), y aquellos en los que se utilizan las variaciones en la relación entre U y Th en diferentes ambientes de depositación (U/Th, uranio autigénico) (Jones y Manning, 1994), haciéndose especial énfasis en el último índice mencionado, ya que será utilizado en este estudio para determinar los cambios en las condiciones paleoambientales ocurridos en la Formación San Antonio.

✓ U/Th y U autigénico: la relación U/Th puede ser utilizada como indicador redox del ambiente de sedimentación (Adams y Weaver, 1958; Rogers y Adams, 1969 en Jones y Manning, 1994). El Th es un elemento relativamente inmóvil en el ambiente exógeno y posee un único estado de oxidación ( $\text{Th}^{(\text{IV})}$ ); durante la meteorización se concentra en la fracción detrítica, principalmente en minerales pesados, conocidos también como minerales resistentes o en minerales de arcilla (por adsorción) (Jones y Manning, 1994). Por su parte, el U presenta dos estados de oxidación, el  $\text{U}^{(\text{IV})}$  que es insoluble y es concentrado en los sedimentos por reducción del uranio móvil; esta reducción provoca su precipitación como uraninita ( $\text{UO}_2$ ). También puede acumularse junto a la materia orgánica, por adsorción o por formación de complejos; la otra especie de uranio ( $\text{U}^{(\text{VI})}$ ) es lixiviado en condiciones oxidantes, ya que el ión formado (uranilo ( $\text{UO}_2^{2+}$ )) es soluble en el ambiente de meteorización (Ellis, 2007; Natural Resources Canada, 2010). Estas propiedades permiten que estos elementos radiactivos, puedan ser utilizados como indicadores geoquímicos de las condiciones redox del ambiente de sedimentación (Natural Resources Canada, 2010).

Se propone que el contenido de U autigénico (no litológico o detrítico), puede usarse como un índice de las condiciones anóxicas de aguas profundas en secuencias sedimentarias antiguas, ya que bajo esas condiciones precipita y se concentra como fases minerales de uranio (Wignall y Myers, 1988 en Jones y Manning 1994). El Th y el K pueden ser ampliamente correlacionados por su ocurrencia en minerales de arcilla y, como el material detrítico, tiene una relación de Th/U de  $3,8 \pm 1,1$ ; el contenido de uranio autigénico puede ser calculado con la siguiente ecuación (Jones y Manning, 1994):

$$U_{\text{autigénico}} = U_{\text{total}} - (Th/3) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Cuando la relación de Th/U presenta valores  $< 2$  se sugieren condiciones anóxicas y por tanto un enriquecimiento relativo de uranio, mientras que valores  $> 7$  sugieren condiciones oxidantes, donde ocurre la lixiviación del U (Adams y Weaver, 1958).

Los datos en superficie que respaldan este índice, pueden ser recolectados haciendo uso de un espectrómetro de rayos gamma, el cual mide señales emitidas por los elementos radiactivos (U, Th y K) presentes en las rocas, lo que permite inferir la presencia de materia orgánica; estas determinaciones se realizan *in situ*, por lo cual, resulta más económica y rápida para la obtención de resultados, permitiendo, de esta manera, establecer un mejor muestreo, debido a que puede utilizarse como recurso predictivo del contenido de COT presente en las rocas; igualmente puede ser de utilidad en áreas donde los análisis químicos son insuficientes o están ausentes (Gómez, 2006).

Es importante resaltar, que si bien estos tres elementos se ven afectados por diversos factores, como son: la meteorización, debido a su alta movilidad (K y U), y la acumulación con otras especies (diferentes a la materia orgánica) como fosfatos, carbonatos (U) y minerales pesados (Th y U) (Adams and Weaver, 1958; Jerden *et al.*, 2003; McSween *et al.*, 2003; Banner, 2004; Ellis, 2007), en este estudio se tratarán específicamente las relaciones existentes entre la acumulación de estos elementos, la materia orgánica y los minerales asociados a las litologías presentes en la Formación San Antonio.



## 2.2. ANTECEDENTES

En esta sección, serán nombrados algunos estudios realizados a nivel nacional e internacional, relacionados con la investigación que se plantea en este trabajo, que sirven de soporte y justificación para la realización del mismo.

**Klinkhammer y Palmer (1991)** realizaron un estudio en la plataforma y talud continental de California central, para evaluar detalles acerca del comportamiento del U disuelto en la interfase agua – sedimentos, lo cual podría hacer posible mejorar las estimaciones de la tasa de captación de U; también permitiría delinear procesos geoquímicos importantes en el ciclo del uranio. Para ello realizaron la extracción del agua intersticial a través de centrifugación y filtración, la determinación del U (ICP-MS), Fe y Mn (absorción atómica). Entre las conclusiones más importantes de estos análisis resaltan, que la movilización del U en los sedimentos es afectada por los cambios redox, ocurridos en el ambiente de sedimentación, los cuales se presentan después de la reducción del hierro en la secuencia diagenética. A su vez indican que el principal sumidero de U en los océanos es probablemente la uraninita. El estudio de la concentración de U, es de utilidad para estimar las tasas de depositación de sedimentos hemipelágicos, y por su sensibilidad a los cambios que ocurren en el ambiente de sedimentación, se utiliza como un indicador de condiciones paleoambientales.

**Fisher y Wignall (2001)** realizaron estudios en capas de lutitas calcáreas cercanas a Sheffield, Inglaterra. Sobre el control paleoambiental que intervino en la distribución del U y la precipitación de francolita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3\text{F}$ ) (Mineralienatlas, Fossilienatlas, 2010), además de la relación de ambos con las biofacies restringidas de oxígeno (ORB por sus siglas en inglés). Para ello utilizaron algunos indicadores geoquímicos y paleontológicos de condiciones paleoambientales, como C/S, grado de piritización (DOP), concentraciones de U y Th, tamaño de la piritita framboidal, además de los respectivos análisis a las ORB. Los resultados de esta investigación indicaron, que altas concentraciones de U autigénico solo se encuentran en ambientes marinos bajo condiciones de sedimentación anóxicas, de allí, la asociación de este elemento con ORB. Por su parte, la francolita también necesita condiciones anóxicas para su

formación, sugiriendo, que el U podría ser atrapado por este mineral mientras ocurre su precipitación. Otro resultado importante resalta que el enriquecimiento de U puede ocurrir tanto en aguas dulces como salobres.

**Lugo (2002)** desarrolló un estudio con el objeto de determinar las asociaciones orgánicas e inorgánicas de los elementos que componen las rocas del Grupo Guayuta (Formaciones Querecual y San Antonio), a fin de conocer su uso como indicadores geoquímicos de las condiciones en el ambiente de sedimentación. Para ello realizó una serie de análisis, entre los cuales están: la determinación de la concentración del bitumen, de carbono total, orgánico e inorgánico y de elementos (mayoritarios y traza), entre los que se destacan U y Th. Los resultados de los análisis, permitieron inferir que las condiciones de sedimentación del Grupo Guayuta fueron anóxicas para las formaciones Querecual y San Antonio. Sin embargo, también se determinó que las condiciones de San Antonio son menos anóxicas que las ocurridas en Querecual. En relación a la distribución de la materia orgánica y la madurez de las rocas madre de estas dos formaciones, las mayores concentraciones de COT se encuentran en la zona media de la Fm. Querecual y en las lutitas de la Fm. San Antonio, y que las rocas madre del Grupo Guayuta presentan un grado de madurez elevado, llegando a ser consideradas sobremaduras.

**McManus et al. (2004)** realizaron un estudio en el margen de la frontera Sur de California, ya que esta región de California, se caracteriza por presentar una penetración superficial de oxígeno en los sedimentos y por tanto tasas elevadas de oxidación del carbono. En este trabajo se presentaron estimaciones de la tasa de cambio de U, a través de la interfase agua – sedimento. Con esta investigación se esperaba conocer el comportamiento del U en los regímenes continentales. Además, de destacar la relación estrecha que existe entre la concentración de oxígeno, la tasa de acumulación de carbono orgánico y la acumulación de U autigénico. Para ello se realizaron análisis del U en el agua intersticial de los sedimentos y en cámaras de incubación béntica. Los resultados obtenidos de este estudio, demostraron que existe una relación entre la profundidad de penetración de oxígeno y la tasa de captación sedimentaria de U. Igualmente llevó a pensar que, a pesar de que muchos factores afectan la acumulación de U autigénico, este

ofrece un efectivo índice para conocer potencial para la tasa de depositación de carbono orgánico en los sedimentos, y determinar la profundidad de penetración del oxígeno en los sedimentos.

**Schnyder *et al.* (2006)** desarrollaron un estudio donde se combinaron la espectrometría de rayos gamma de alta resolución (SGR), análisis mineralógicos de arcillas y la concentración de COT, en dos secciones de aguas superficiales (marinas y no marinas) del sur de Inglaterra; con el fin de conocer la sensibilidad de la espectrometría de rayos gamma ante los cambios climáticos. Entre las técnicas realizadas en este estudio, se encuentran difracción de rayos X, utilizada para determinar minerales de arcilla, equipos de rayos gamma para conocer la distribución de cada elemento (U, Th y K) y, posteriormente, las relaciones de Th/K, Th/U, considerando la ubicación de estratos compuestos por carbonatos puros. Los resultados de este estudio, muestran que la (SGR) puede ser una herramienta útil, rápida y económica para el reconocimiento o estudio de cambios paleoambientales. Sin embargo, se recomienda su uso con otros indicadores paleoambientales, teniendo en cuenta que litologías donde se asocien arenas con depósitos de U y Th, deben ser evitados o considerados en la calibración del equipo usado, a fin de lograr una mejor interpretación de los resultados.

**Gómez (2006)** realizó un estudio en la localidad tipo de la Fm. Querecual, en el cual trató de establecer la correspondencia existente entre los valores de datos geoquímicos (concentraciones de Cinorgánico, COT, azufre y datos bioestratigráficos) con los provenientes de la radioactividad natural de las rocas y las relaciones entre U, Th, K. Para ello, se realizaron mediciones *in situ* de la radioactividad natural de la Formación, utilizando un espectrómetro portátil discriminador de rayos gamma. Por otra parte, la caracterización geoquímica se realizó, analizando un total de 48 muestras recolectadas en la zona, obteniendo como resultado que el COT aumenta hacia la parte media de la Formación y disminuye hacia el tope y la base de la misma. A su vez, los valores de radioactividad presentan una buena relación con los valores de COT, Cinorgánico, Ctotal y la litología mostrada, confirmando que es un buen indicador de presencia de materia orgánica en los sedimentos. Las señales de rayos gamma, muestran una relación proporcional con la concentración de azufre, excepto en las margas, donde su relación es inversamente proporcional;

todas esas relaciones permiten que se puedan reconocer los picos principales donde ocurrieron las máximas inundaciones en la secuencia estudiada.

**Galindo *et al.* (2007)** desarrollaron un estudio acerca de la composición y estructura de la lutita bituminosa de Timahdit (Marruecos). Este estudio, buscaba evaluar la factibilidad del uso de esta lutita como material adsorbente de U y Th, provenientes de aguas residuales. La caracterización, fue llevada a cabo en función de la distribución isotópica de U y Th; determinados mediante ICP-AES, difracción de rayos X y análisis SEM. Con estos análisis, se encontraron fases inorgánicas donde se acumulan el U y el Th, además de fases orgánicas, donde el U es acumulado. Estos resultados, permitieron inferir que esta lutita se depositó en un ambiente anóxico restringido. La baja relación de Th/U indicó que los sedimentos provienen de una fuente marina. Con este estudio también se determinó que la capacidad de retención de la lutita puede ser importante, ya que los elementos estables y radiactivos están ausentes en el agua intersticial, por tanto, es probable que los metales sean retenidos en las interfases resultantes de la asociación entre la materia orgánica y el material inorgánico presente.

### **2.3. GEOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

La Cuenca Oriental de Venezuela está ubicada hacia el noreste del país y limita, al norte con los cinturones plegados de la Serranía del Interior, el Golfo de Paria y Trinidad; al este con la corteza oceánica del Atlántico; al oeste con El Arco del Baúl y al sur con el río Orinoco y con el Escudo de Guayana. La cuenca se subdivide en dos subcuencas, la de Guárico al oeste y la de Maturín (cuyo límite al norte es el sistema de fallas de Urica y hacia el sur el sistema de fallas de Anaco) al este (González de Juana *et al.*, 1980; Di Croce *et al.*, 1999 en Truskowski, 2006). Esta última constituye la principal unidad petrolífera de la Cuenca Oriental (WEC, 1997).

Durante la máxima de transgresión del Cretácico, la sedimentación que se inicia en el Cenomaniense, marca un notable avance marino en Venezuela Oriental, provocando que esta región al igual que la Occidental estuvieran cubiertas por agua y comunicadas entre sí durante este período, ocurriendo entonces la sedimentación facies de plataforma carbonática. Al sur de la

Serranía del Interior, estas calizas están representadas por las formaciones El Cantil, Querecual y San Antonio (Aptiense-Turoniense) (Parnaud *et al.* 1995). Sin embargo, la unidad litológica característica de este período es el Grupo Guayuta, constituido por las formaciones Querecual y San Antonio.

Las condiciones ambientales al inicio de la sedimentación del Grupo Guayuta fueron euxínicas, correspondiente a calizas laminares ricas en materia orgánica, características de la Formación Querecual. Sin embargo, durante el Santoniense las condiciones ambientales cambiaron, haciéndose más oxigenadas y aumentando el aporte clásticos a la cuenca, correspondiente a la sedimentación de la Formación San Antonio (Gonzalez de Juana *et al.*, 1980; Talukdar *et al.*, 1988).

En el Río Guayuta, estado Monagas, la localidad del Grupo Guayuta se compone de querógeno tipo II, con concentraciones de carbono orgánico total de 1 a 6%, donde los máximos valores están hacia la base. Mediante pirolisis Rock - Eval y análisis visuales del querógeno, se determinó que la materia orgánica acumulada, presenta una madurez muy avanzada. Con relación a las condiciones del ambiente de sedimentación, se propone que éstas fueron más euxínicas hacia la base de la sección, ya que los valores de V/Ni están entre 2 y 5 incrementando de tope a base (Alberdi y Lafargue, 1993).

La zona de estudio de esta investigación se presenta en la figura 3, donde está ubicada la localidad tipo de la Formación San Antonio, situada en el Río Querecual en Anzoátegui nororiental, entre los puntos situados a 600 metros aguas abajo desde Paso Hediondo y a 150 metros aguas arriba desde Paso Santa Anita. Presenta un espesor de 350m (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 2010).

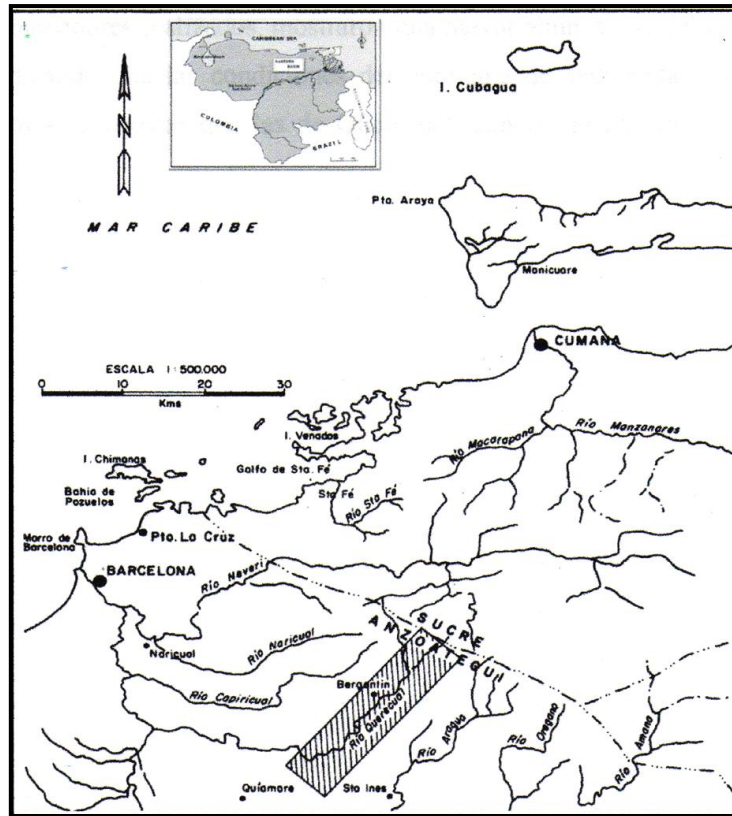


Figura 3: Zona de estudio (tomado de Rosales, 1967).

La Formación San Antonio en su localidad tipo, consiste esencialmente en una alternancia de areniscas calcáreas de grano fino, lutitas calcáreas oscuras o negras y calizas de color negro, así como numerosas capas de areniscas duras de color gris claro y de chert; además de la presencia de diques de areniscas, hacia el tope presenta concreciones de calcita de color negro similares a las observadas en Querecual (González de Juana *et al.*, 1980; Lugo, 2002).

Las lutitas calcáreas de la Formación San Antonio presentan querógeno tipo II, con concentraciones de carbono orgánico total de 0,25 – 6,60 % y valores de  $T_{max}$  ~450 °C, lo que la clasifica como una roca madura con un potencial de generación de bueno a medio (Talukdar *et al.*, 1988). Por otra parte, Lugo (2002), determinó concentraciones de COT entre 0,8 y 3,7 %, así como valores de  $T_{max}$  entre 391 y 463°C, lo que indica que la roca es madura. Estudios de biomarcadores realizados, mostraron una mayor abundancia del isoprenoide pristano sobre fitano, indicando que las condiciones del ambiente de sedimentación de San Antonio, debieron ser menos anóxicas que las de Querecual (Janezic *et al.*, 1982 en Barrios, 2004).

### **3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

En esta sección, se presentarán las diferentes etapas que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos planteados para este estudio, y que se dividen en: trabajo de campo (recolección de muestras y medidas de radioactividad), trabajo de laboratorio (tratamiento físico y análisis químicos) y trabajo de oficina (procesamiento y correlación de los datos obtenidos). La metodología que se siguió en la realización de este trabajo será especificada seguidamente.

#### **3.1. TRABAJO DE CAMPO**

Las muestras utilizadas para este estudio, fueron recolectadas en la sección tipo de la Formación San Antonio; entre los puntos situados a 600 metros aguas abajo desde Paso Hediondo y a 150 metros aguas arriba desde Paso Santa Anita, por el Grupo de Geoquímica del Petróleo GGP en mayo de 2008.

En este estudio se realizaron un total de 74 medidas de radioactividad a lo largo de la sección tipo de la formación, lo que correspondió a un espesor acumulado de 274,5m. Durante este levantamiento se obtuvieron los valores de radioactividad natural total (rayos gamma totales) y los correspondientes a los isótopos de uranio ( $^{238}\text{U}$ ), torio ( $^{232}\text{Th}$ ) y potasio ( $^{40}\text{K}$ ) (rayos gamma discriminados), medidos directamente en los afloramientos. Adicionalmente, en la zona también se recolectaron 53 muestras de mano basándose en las diferencias en las medidas de radioactividad y en las variaciones litológicas observadas en campo, identificándose las siguientes litologías: lutitas, lutitas calcáreas, margas, calizas, calizas margosas y areniscas.

La radioactividad natural de la Formación San Antonio, se midió utilizando un espectrómetro discriminador de rayos gamma (scintillómetro), marca SCINTREX, modelo GRS 500; este instrumento, permite discriminar entre la radioactividad total de la zona y la radioactividad isotópica de U, Th y K. Las lecturas que se observaron en la pantalla del detector, correspondieron a las medidas de conteo total de rayos gamma, potasio, uranio y torio, en unidades de cuentas por segundos (Gómez, 2006).

### **3.2. TRATAMIENTO FÍSICO**

En esta etapa se realizó la pulverización de las muestras de roca recolectadas en la Formación San Antonio. Este procedimiento se llevó a cabo, en un equipo Shatterbox; para ello se tomó una pequeña porción de la muestra para curar las placas y el envase de trituración. Este paso se realizó por duplicado, para garantizar que no se contaminaran las muestras.

Luego se tomaron ~150g de cada muestra y se pulverizaron, para posteriormente, colocarlas en envases debidamente rotulados para los análisis químicos posteriores.

### **3.3. ANÁLISIS QUÍMICOS**

En esta etapa del estudio, se realizaron los análisis que permitieron la caracterización geoquímica de la Formación San Antonio, dichos análisis fueron: carbono total (Ct), carbono inorgánico (Cinorg), carbono orgánico total (COT) y la concentración de bitumen. Los métodos que se aplicaron para la obtención de esta información se describen a continuación:

#### **3.3.1. Extracción de bitumen:**

Para la extracción de bitumen, se tomaron aproximadamente 120 g de roca pulverizada, y se colocaron en un equipo de extracción Soxhlet y se sometieron a la extracción en caliente con diclorometano ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ), durante 5 días (8 horas por día) o hasta que el solvente estuvo incoloro. Finalizado este paso, el solvente se eliminó por rotoevaporación, permitiendo, que por diferencia se cuantificara el bitumen extraído de la roca.

#### **3.3.2. Determinación de las concentraciones de carbono total, carbono inorgánico y carbono orgánico total:**

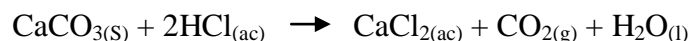
Las determinaciones de carbono total (Ct), se realizaron en un equipo marca LECO C-144. El procedimiento, consistió en pesar y colocar ~170 mg de roca pulverizada y patrones LECO, con los cuales se realizó la curva de calibración (apéndice 1), adicionalmente se agregaron ~100 mg



de acelerador (Com-cat N° de partes 502-321) en celdas de cuarzo-mullita. Luego, se llevaron a combustión bajo una atmósfera de oxígeno en el equipo. La lectura obtenida de la combustión de las muestras relacionada con el peso de las mismas, permitió calcular la concentración de Ct (% m/m).

Para determinar la concentración de carbono inorgánico (Cinorg) en las muestras, se pesaron entre 0,1 y 0,2 g de roca y se hicieron reaccionar con ~10 mL de HCl 40% v/v (Hesse, 1971; Lugo, 2002). La concentración de Cinorg en las rocas, se determinó mediante el método del calcímetro de Bernard; que consiste en cuantificar la concentración de carbonatos presentes en la muestra. Éste se basa, en la reacción de dicha muestra con HCl (40% v/v), en la cual, se observa el desprendimiento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que provoca, desplazamiento de un volumen de una solución saturada de NaCl equivalente a la concentración de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) presente en la muestra.

La ecuación siguiente representa la reacción que ocurre entre el HCl y los carbonatos que se encuentran en la muestra:



Para éste análisis, se realizó la curva de calibración (apéndice 2), utilizando patrones de 15, 30, 40 y 100% de CaCO<sub>3</sub>. Para conocer la concentración expresada en porcentaje m/m de CaCO<sub>3</sub> presente en las muestras, se utilizaron las ecuaciones mostradas en el apéndice 2:

La determinación de la concentración de Carbono Orgánico Total (COT), presente en las muestras, se realizó con la diferencia entre el Ct y el Cinorg mediante las siguientes ecuaciones.

$$\% \text{ Ct} = \% \text{ COT} + \% \text{ Cinorg}$$

$$\% \text{ COT} = \% \text{ Ct} - \% \text{ Cinorg}$$

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la determinación de las concentraciones de Ct, Cinorg, COT y bitumen, realizados en las muestras de la Formación San Antonio; además de aquellos obtenidos en la determinación de la radioactividad medida (total y discriminada por elementos), con el fin de caracterizar geoquímicamente y radioactivamente la Formación San Antonio, ubicada en el estado Anzoátegui. Estos resultados se presentarán tabulados en el apéndice 3.

La discusión de los resultados se enfocará hacia el conocimiento de la Formación San Antonio, utilizando los valores obtenidos de la concentración de Ct, Cinorg, COT y bitumen. Los resultados anteriores se relacionaron con las medidas de rayos gamma, para determinar las condiciones redox del ambiente de sedimentación de la formación, y posteriormente, observar la relación existente entre la litología, las medidas de radioactividad y el COT presente en la formación.

### **4.1.LITOLOGÍA DE LA FORMACIÓN SAN ANTONIO**

De acuerdo a la descripción de campo y laboratorio, las muestras de mano recolectadas para realizar la caracterización de la sección tipo de la Formación San Antonio, comprenden los siguientes tipos litológicos: lutitas, lutitas calcáreas, calizas, calizas margosas, margas y areniscas calcáreas; para realizar la caracterización de las litologías carbonáticas, se utilizó la clasificación planteada por Rey (2004), donde las litologías que poseen >80% de carbonatos son calizas, entre 80 y 60% son calizas margosas y <60% son margas. En las figuras 4 a la 6 se presentan algunas de las muestras tomadas en la formación.



**Figura 4:** Arenisca de la Formación San Antonio.

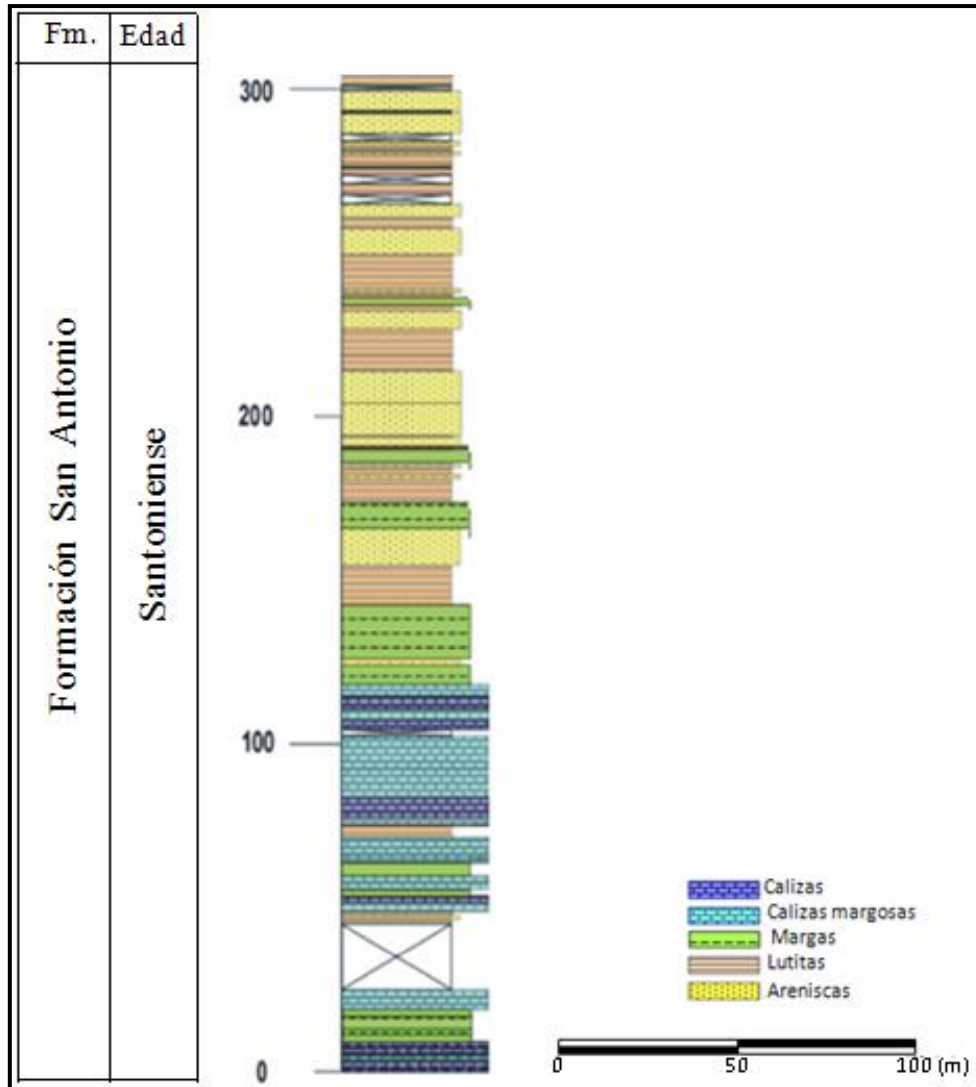


**Figura 5:** Caliza de la Formación San Antonio.



**Figura 6:** Lutita de la Formación San Antonio.

Estas seis litologías, se encuentran distribuidas a lo largo de la localidad tipo de la Formación San Antonio, cuya columna estratigráfica se presenta en la figura 7; en ella, se puede observar que la mayoría de las areniscas, las lutitas y las lutitas calcáreas reconocidas, se encuentran hacia la zona media y el tope de la sección; mientras que las calizas y las calizas margosas, se encuentran en su mayoría, distribuidas hacia la zona media y la base de la misma. Por su parte, las margas están ubicadas mayoritariamente en la zona media y hacia la base de la sección, implicando que el transporte de clásticos en la cuenca fue aumentando durante la sedimentación de las litologías ubicadas en el tope.



**Figura 7:** Columna estratigráfica de la Formación San Antonio (modificado de López *et al.*, 2010).

Estas litologías identificadas, también fueron caracterizadas según su color mediante el uso de la tabla de colores de Munsell (1973) (apéndice 3), encontrando que en su mayoría, presentan variaciones en las tonalidades. Los colores observados van desde gris muy claro (areniscas), hasta grises muy oscuros o negro (lutitas, lutitas calcáreas y margas), el resto de las litologías (calizas, calizas margosas) se encuentran divididas en las tonalidades intermedias de grises; y ya que la Formación San Antonio es roca madre, estos colores mostrados, pueden estar relacionados con la concentración de materia orgánica presente. La distribución de las muestras según su color se presenta en la figura 8.

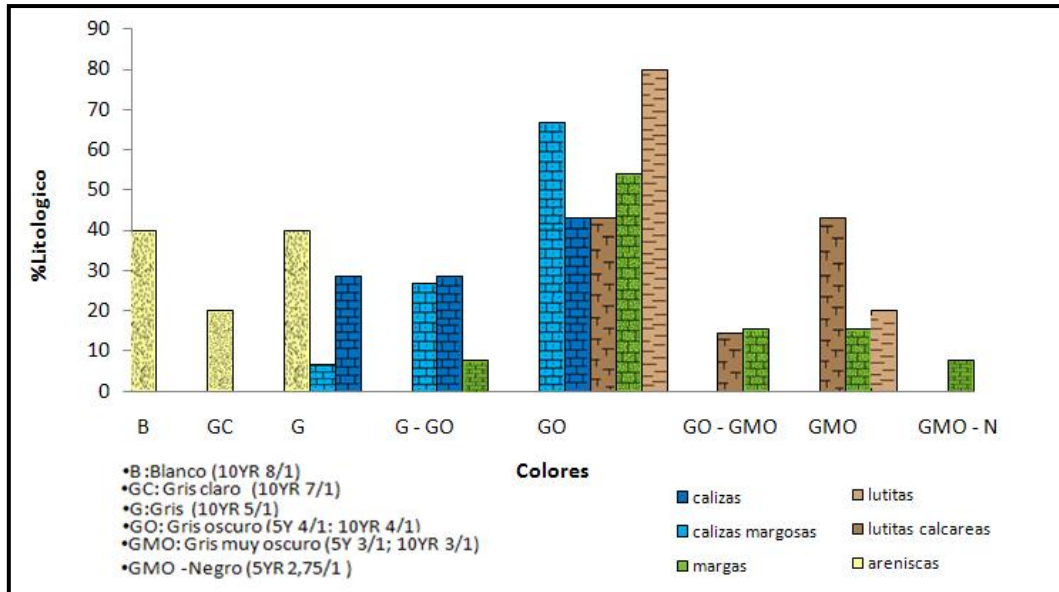


Figura 8: Colores presentados por las muestras según la tabla decolores de Munsell (1973).

En el gráfico de la figura 9, se presenta el porcentaje que corresponde a cada uno de estos seis tipos litológicos encontrados dentro de la sección tipo de la Formación San Antonio; mientras que en el gráfico de la figura 10, se presenta la distribución litológica reportada por Gómez (2006) para la Formación Querecual. Para realizar esta distribución se tomó como 100% el total de muestras recolectadas en las formaciones.

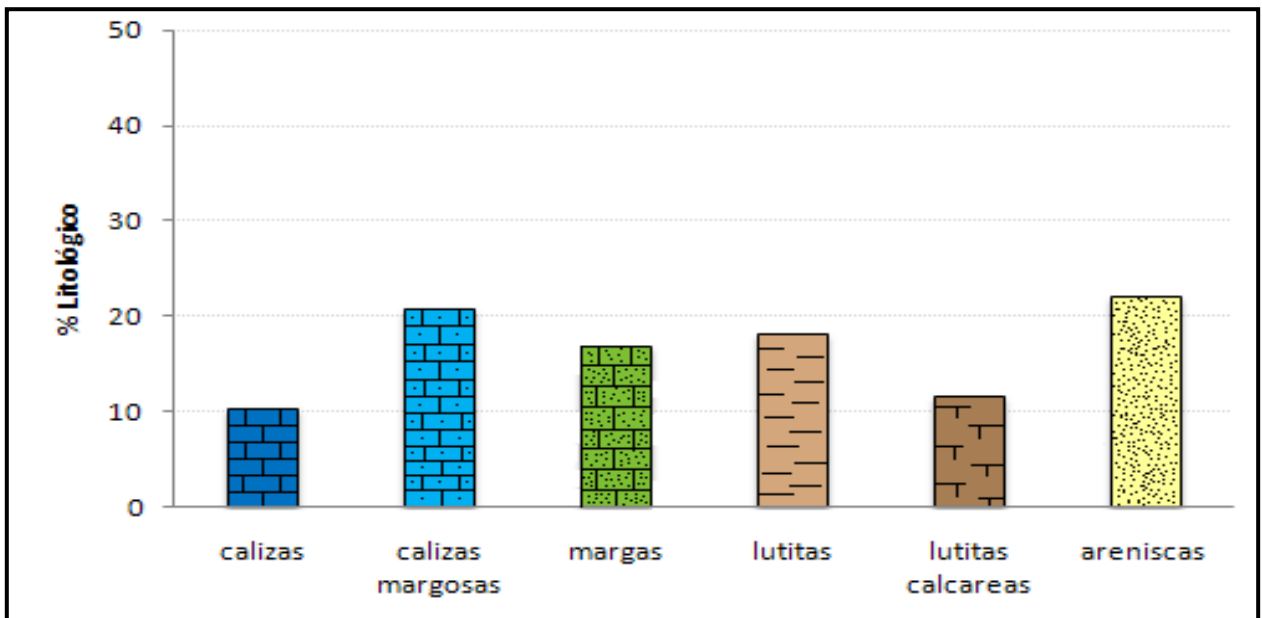
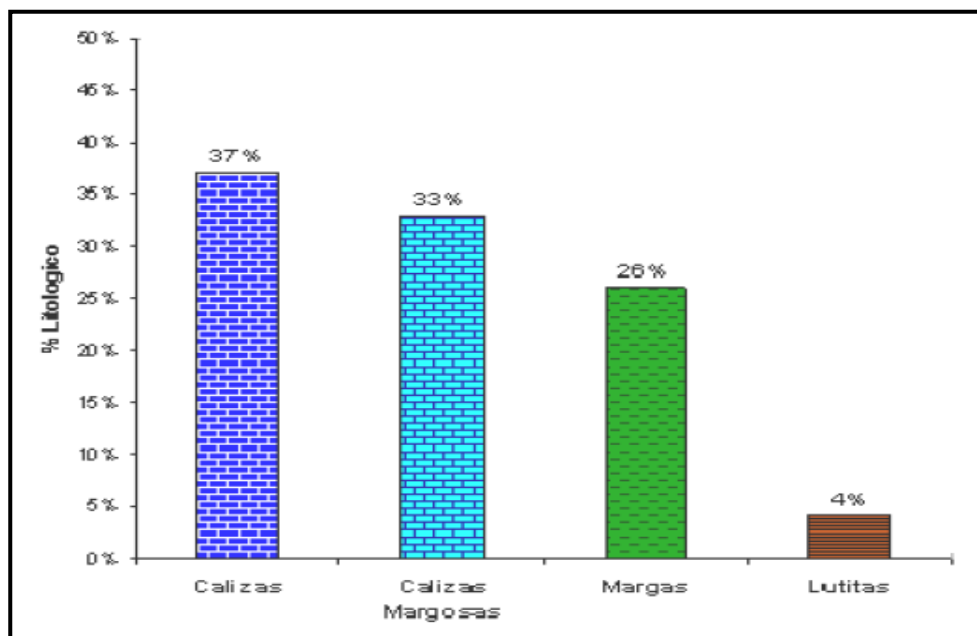


Figura 9: Distribución de las litologías presentes en la Formación San Antonio.



**Figura 10:** Distribución de las litologías presentes en la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).

Haciendo una comparación porcentual de las litologías identificadas en ambas formaciones (Querecual y San Antonio) (figuras 9 y 10), se observa que en la Formación San Antonio hay un aumento en la cantidad de lutitas (18,18%) y de lutitas calcáreas (11,69%), mientras que se presenta una disminución en el contenido de margas (16,88%) y de litologías carbonáticas (calizas 10,39%; calizas margosas 20,78%); adicionalmente en la Formación San Antonio se observa la presencia de areniscas (22,08%), litología que no se observa en Querecual. Estos valores demuestran diferencias en las condiciones del ambiente de sedimentación de ambas formaciones; coincidiendo, con lo indicado por González de Juana (1980), Talukdar *et al.*, (1988) y el Léxico Estratigráfico (2010), de que si bien las condiciones del ambiente de sedimentación del Grupo Guayuta (Formaciones Querecual y San Antonio) son similares, se presume que durante la sedimentación de la Formación San Antonio, se presentaban corrientes periódicas, capaces de transportar clásticos y promover la circulación de oxígeno a las aguas estancadas del fondo, generando así condiciones más oxigenadas y provocando la sedimentación de facies siliciclásticas en la cuenca.

## 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ROCA MADRE DE LA FORMACIÓN SAN ANTONIO

Para la descripción y caracterización de la roca, se utilizaron los valores obtenidos de las concentraciones de Ct, Cinorg, COT y bitumen; con los cuales, se realizaron las siguientes relaciones: COT-litología, COT-Cinorg, que permitieron conocer y clasificar las rocas de la formación.

Con los valores de COT (mínimo, máximo y promedio) obtenidos para las diferentes litologías encontradas en la Formación San Antonio (tabla 3), y utilizando la tabla 1 (Glennie, 1998), se realizó la clasificación de las litologías con potencial para la generación de hidrocarburos. En tabla 3, se observa que las lutitas y las lutitas calcáreas, presentan los valores de COT (promedio) más altos (5,4 y 4,4% respectivamente); seguidas por las margas (4,0%), las calizas margosas (2,2%) y las calizas (1,5%); permitiendo clasificar la formación con un potencial petrolero entre medio y excelente. Las areniscas presentan valores de COT bajos (1,7%), lo que podría estar relacionado con los procesos de migración ocurridos en la formación.

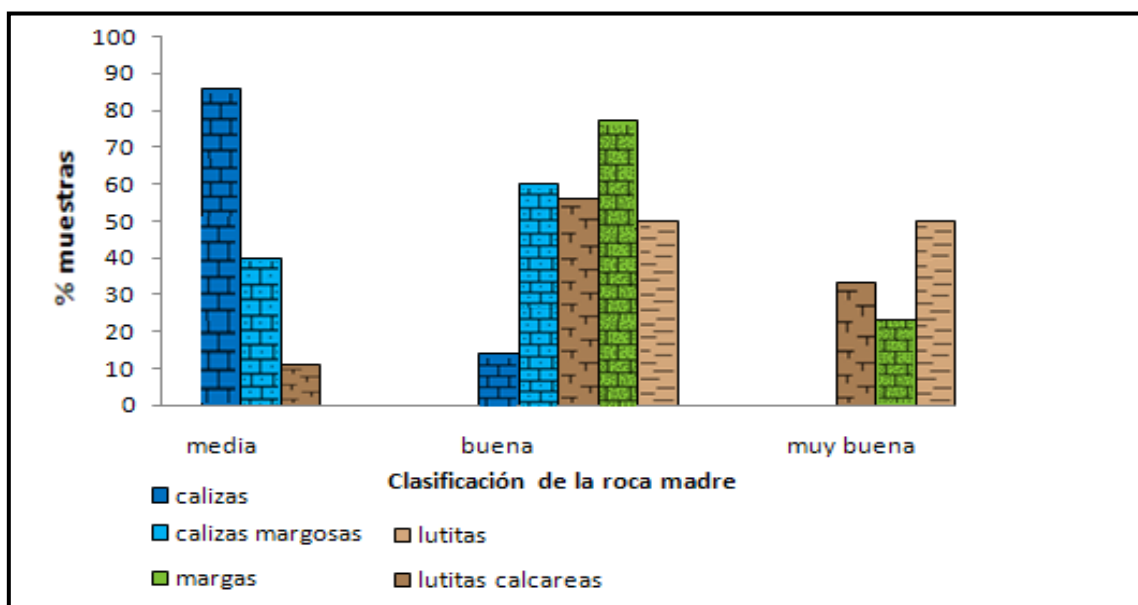
**Tabla 3:** Concentraciones (%m/m) de Cttotal, Cinorg y COT para la Formación San Antonio.

Litología	COT			Cinorg			Ct		
	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio
Lutitas	8,6	2,5	5,4	3,8	0,7	1,8	10,1	3,2	7,3
Lutitas calcáreas	7,2	1,9	4,4	5,2	0,3	1,7	8,2	3,2	6,1
Margas	8,3	2,2	4,0	4,8	1,2	2,6	9,5	3,5	6,6
Calizas	2,2	0,7	1,5	9,0	6,3	7,7	10,3	7,7	9,1
Calizas margosas	2,8	1,6	2,2	9,0	3,5	6,3	11,4	5,3	8,5
Areniscas	2,5	0,9	1,7	2,9	0,5	1,3	4,9	2,1	3,0

En el gráfico de la figura 11, se presenta una distribución más detallada de las rocas de la Formación San Antonio; en dicha figura, se encuentra el porcentaje de muestras pertenecientes a cada litología identificada de acuerdo a su COT (considerando como 100% el número de

muestras recolectadas de cada tipo de roca y manteniendo los colores usados en la columna estratigráfica); mientras que en la figura 12 se presentan los resultados de la determinación de la concentración de Ct, Cinorg, COT y bitumen, ubicados en la columna estratigráfica de la localidad tipo de la Formación San Antonio.

De ambas figuras (11 y 12) se extrae, que ~86% de las calizas y el 40% de las calizas margosas, ubicadas en la zona media y la base de la sección tipo de la Formación San Antonio, presentan valores de COT (1,3 y 1,9% respectivamente) que las clasifican como rocas madres intermedias; mientras que una muestra de caliza y el 60% de las calizas margosas, consideradas como buenas rocas madre por su COT (2,2 y 2,4% respectivamente), están ubicadas hacia la zona media de la sección. De acuerdo a sus valores de COT las lutitas (3,6 y 7,3%), las margas (3,2 y 6,6%) y las lutitas calcáreas (3,5 y 6,6%), distribuidas desde la zona media hasta el tope de la sección, son consideradas buenas y excelentes rocas madres. Como se puede observar (figura 11), las calizas presentan los menores valores de COT de las rocas madre de la formación, mientras que las lutitas, lutitas calcáreas y margas, presentan los mayores valores. Esto implica que el COT aumenta hacia el tope de la sección, demostrando que sí existe relación entre la litología y la concentración de COT en la Formación San Antonio.

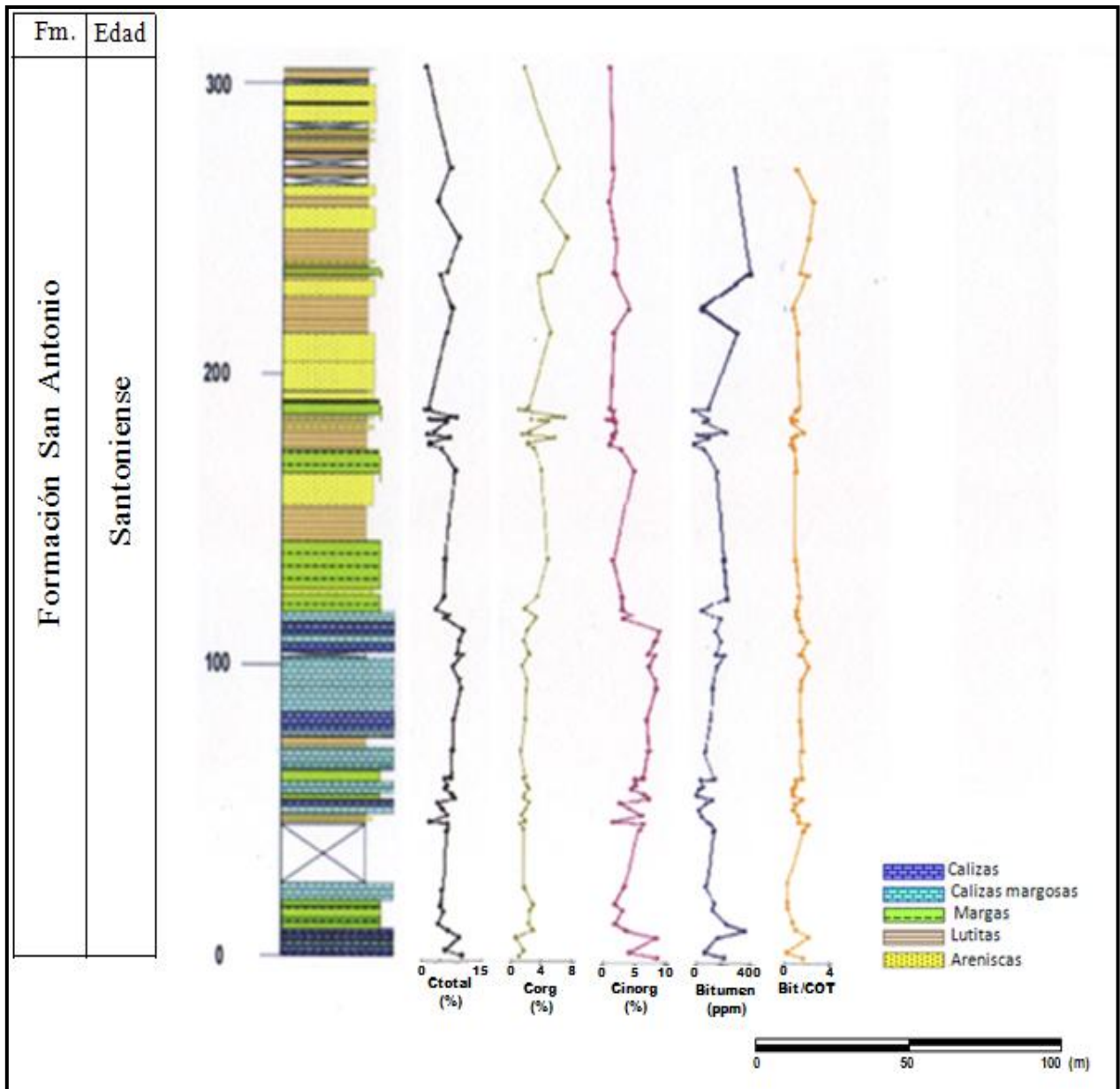


**Figura 11:** Distribución de las rocas según su litología y su COT.



Estudios realizados por diversos autores, en cuanto a la clasificación de las rocas madre de la Formación San Antonio, indican que las mismas tienen un potencial de generación en el intervalo entre medio y excelente (Talukdar *et al.*, 1988; Lugo, 2002), confirmando lo obtenido en los análisis de COT realizados. Aunque en este estudio, no se realizaron análisis para determinar el tipo de materia orgánica y la madurez de las rocas madre presentes en la formación, autores como Talukdar *et al.* (1988), Alberdi y Lafargue (1993), López (1997) y Lugo (2002), de acuerdo los valores de Tmax (431 y 550°C), la clasifican como una roca madura – sobremadura; estos autores, también indican que de acuerdo a sus valores de reflectancia de vitrinita, las rocas madres de la Formación San Antonio están compuestas principalmente por querógeno tipo II; es decir materia orgánica asociada a ambientes marinos.

En la tabla 3 también se encuentran los valores de Cinorg obtenidos para la Formación San Antonio, observándose como es de esperarse, que las calizas y las calizas margosas presentan mayores valores en comparación con las otras litologías, por esta razón, tal como se observa en la figura 12, las mayores concentraciones de Cinorg están distribuidas principalmente hacia la zona media y la base de la columna, ya que en esta zona es donde está ubicada la totalidad de las muestras correspondientes a las litologías carbonáticas.

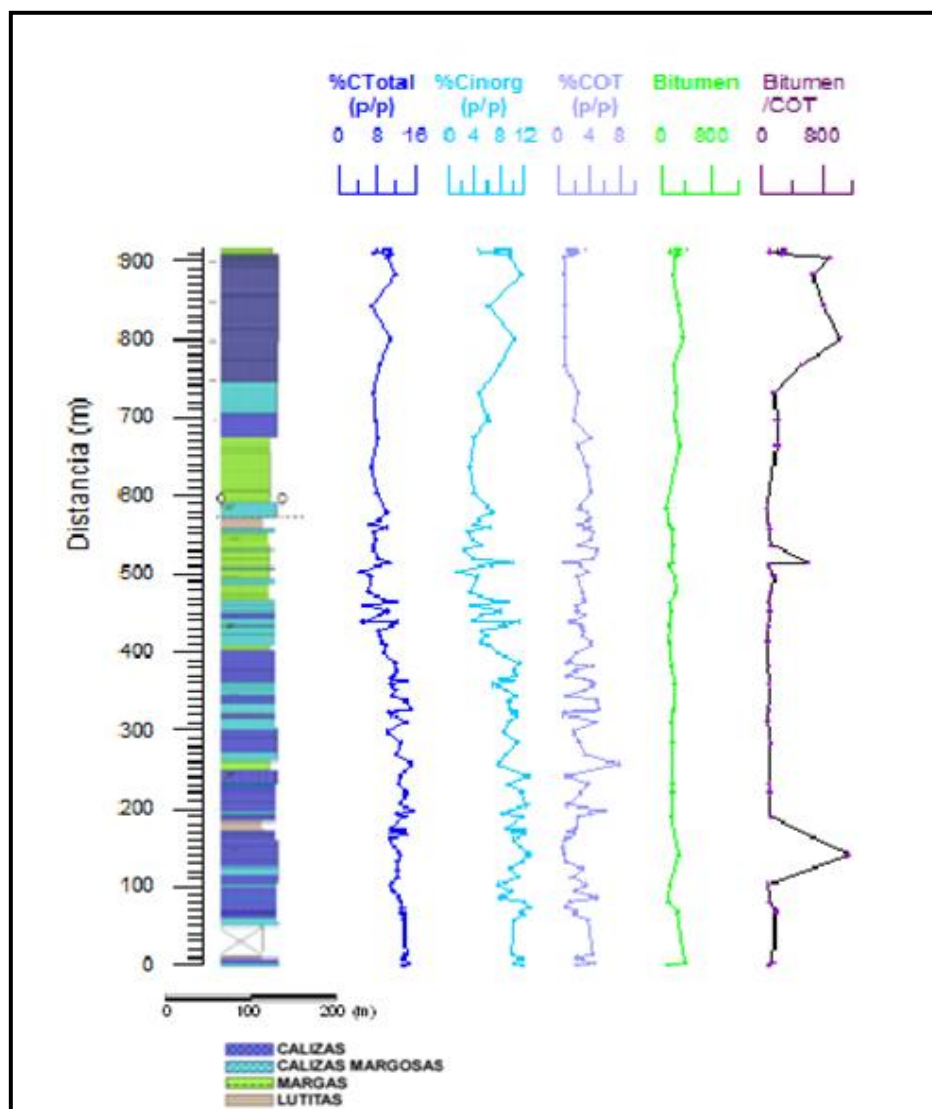


**Figura 12:** Distribución de Ct, Cinorg, COT y bitumen en la columna estratigráfica de la sección tipo de la Formación San Antonio (modificado de López *et al.*, 2010).

Al hacer una comparación entre las concentraciones de COT, Cinorg y bitumen obtenidos en este estudio (figura 12) y las de Querecual reportadas por López *et al.* (2010) (figura 13), se observa que los valores de Cinorg de la Formación Querecual son mayores a los mostrados por la Formación San Antonio, esto se debe a que la litología de esta última formación, tal como se

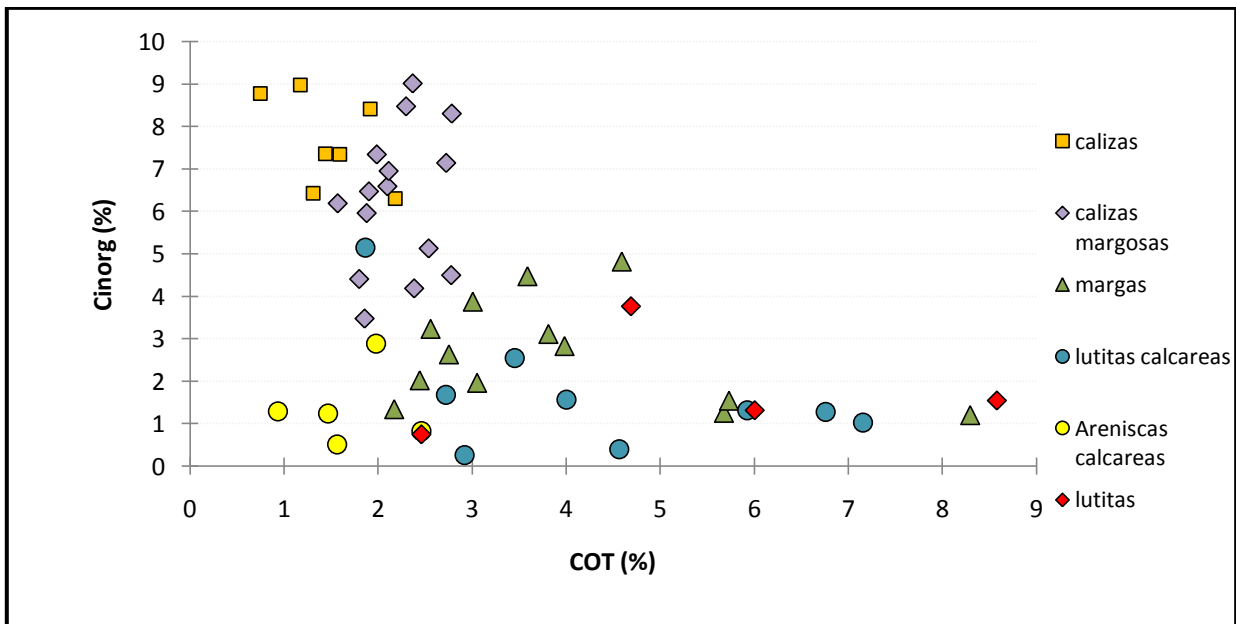
mencionó anteriormente, está compuesta por rocas con alto contenido de material clástico, mientras que las litologías de Querecual, están compuestas principalmente por carbonatos.

De manera general, los valores de bitumen y COT son mayores en la Formación San Antonio que en la Formación Querecual; lo que podría deberse a que la expulsión del bitumen fue más eficiente en la Formación Querecual que en la Formación San Antonio (López, 2010), lo que se complementa con las bajas concentraciones de COT determinadas en las areniscas (rocas reservorio) de la Formación San Antonio.



**Figura 13:** Distribución de Ct, Cinorg, COT y bitumen en la columna estratigráfica para la Formación Querecual (modificado de López *et al.*, 2010).

Cuando se realiza una correlación entre los valores de COT y los de Cinorg (figura 14), se observa que litologías con altas concentraciones de Cinorg, presentan bajas concentraciones de COT, lo que implica que este parámetro se encuentra influenciado por la litología. Las lutitas, si bien no presentan una distribución específica, se observa que en su mayoría, presentan bajas concentraciones de Cinorg y alto COT, esto se debe a la presencia de arcillas y a la relación de éstas con la materia orgánica; las lutitas calcáreas presentan valores de COT altos, excepto una muestra que presenta valores medios correspondiendo con la que mayor Cinorg contiene. En el caso de las calizas y las calizas margosas, se observan valores altos de Cinorg (cerca de 10%) y valores bajos de COT (0,5 - 2,5% para las calizas y 1,5 - 3,0% para las calizas margosas). Las margas por su parte, se encuentran divididas en dos grupos (al igual que en su distribución en la columna), quedando que aquellas que están ubicadas hacia la zona media de la sección, presentan mayores valores de Cinorg que las ubicadas hacia el tope de la misma, mientras que con el COT ocurre lo contrario (aumenta hacia el tope). Lo que confirma que si existe una distribución distinguible del contenido de materia orgánica en la columna, siendo más abundante hacia la parte media y el tope de la sección, mientras que el Cinorg es mayor en la parte media y en la base de la misma (figura 12).



**Figura 14:** Relación entre COT y Cinorg para las muestras de la Formación San Antonio.

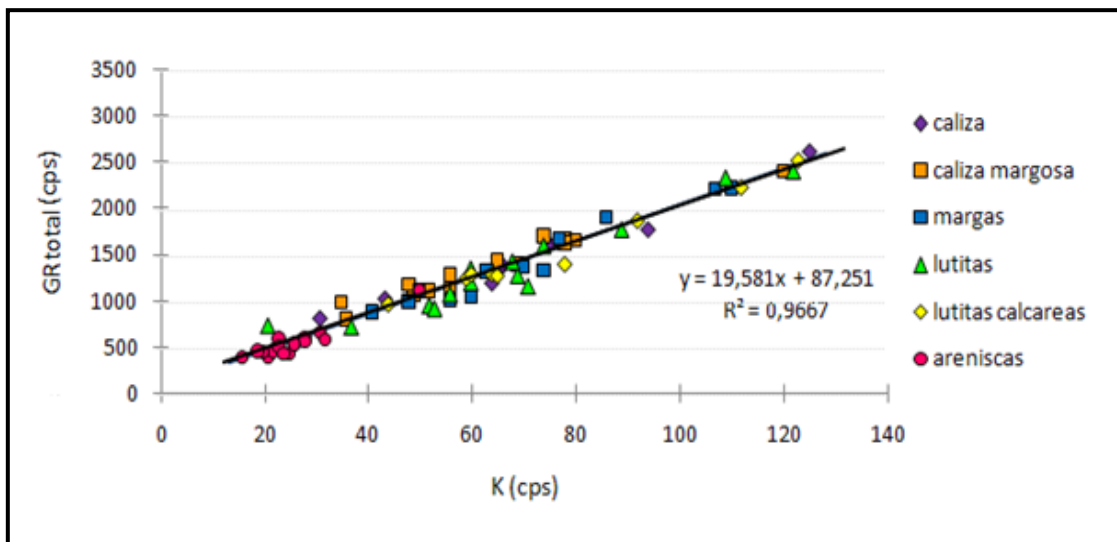
### 4.3. CARACTERIZACIÓN RADIOACTIVA DE LA FORMACIÓN SAN ANTONIO

En la Formación San Antonio existen diversos estudios geológicos y geoquímicos que han permitido conocer con detalle sus características. Sin embargo, en ella no se han realizado investigaciones sobre la radioactividad natural, comprendida por la radioactividad total y la discriminada por los elementos U, Th y K; por esta razón, tampoco ha sido estudiado el vínculo existente entre la radioactividad natural y datos geológicos (identificación litológica, estructuras y datación) y geoquímicos (determinación de COT, tipo y calidad de la materia orgánica, así como la madurez que presente la roca) realizados en la zona.

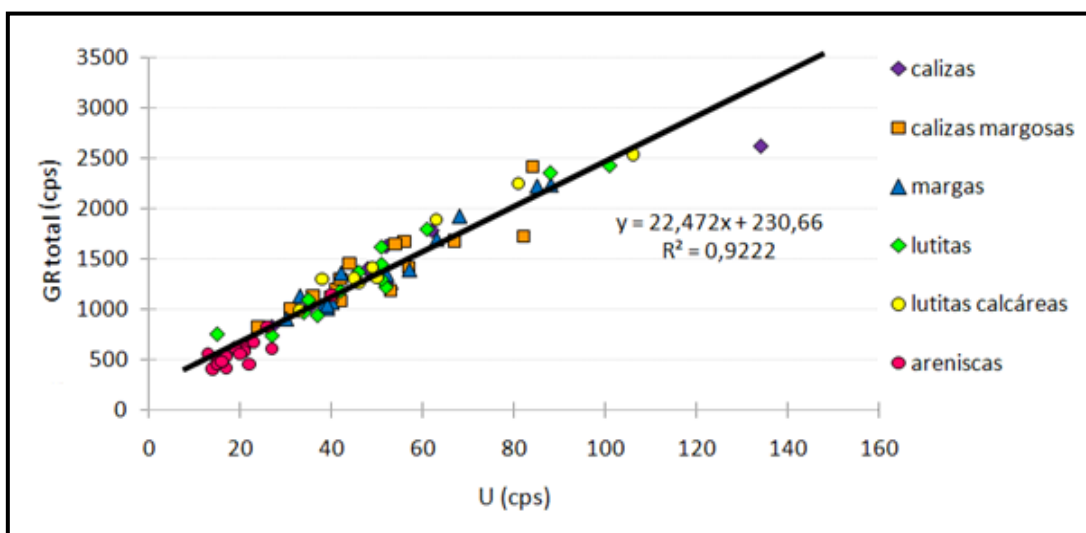
A continuación se presentan las correlaciones realizadas con las medidas de radioactividad obtenidas en la Formación San Antonio. Estas relaciones se realizan con el fin de caracterizar mas a detalle la formación, ya que con ellas, en conjunción con las litologías y minerales presentes, se puede determinar de manera efectiva, las condiciones redox del ambiente de sedimentación. Esto se debe a que los elementos radioactivos estudiados, dependen en gran medida de la mineralogía (Th y K) y de las condiciones que se presenten durante su acumulación (U) (Schnyder *et al.*, 2006; Ellis, 2007; Ghasemi-Nejad *et al.*, 2010).

En los gráficos de las figuras 15 a la 17, se presentan las relaciones establecidas entre los valores de GR<sub>total</sub> y de los elementos K, U y Th respectivamente, discriminados por litologías. Como se puede observar, en todos existe una correlación positiva, con valores de R superiores a 0,9; lo que implica, que son proporcionales entre sí, y por tanto, a medida que aumentan los valores de los tres elementos, aumentan los valores de GR<sub>total</sub> en la formación. Algunos trabajos (Tzortzis, 2003; Gómez, 2006), determinan que las concentraciones de estos tres elementos, son variables según la litología y el ambiente de formación de las mismas; por tanto, según sean estas variaciones composicionales, las distribuciones se verán afectadas. En comparación con los datos obtenidos en la Formación Querecual por Gómez (2006) (figuras 18 a la 21) se observa que las correlaciones de K y U respecto al GR<sub>total</sub> son similares; mientras que las obtenidas para el Th, a pesar de mostrar un aumento a medida que los valores de GR<sub>total</sub> son mayores, presentan una alta dispersión, a diferencia de la relación Th - GR<sub>total</sub> obtenida en la Formación San Antonio, cuya relación es excelente. Esto es debido a que el Th es un elemento litófilo (Enghag, 2004), por

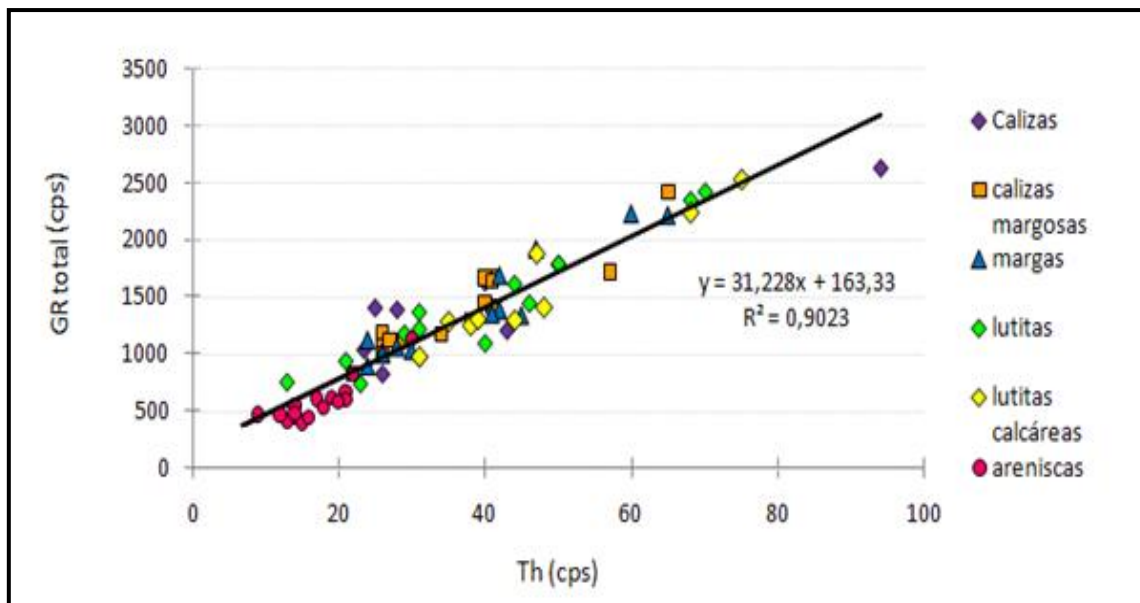
lo tanto, se espera, tal como ocurre en la Formación San Antonio, que al aumentar el contenido del material clástico en la cuenca, aumenten las concentraciones de este elemento, generando con esto, un aumento de los GRtotal de la formación.



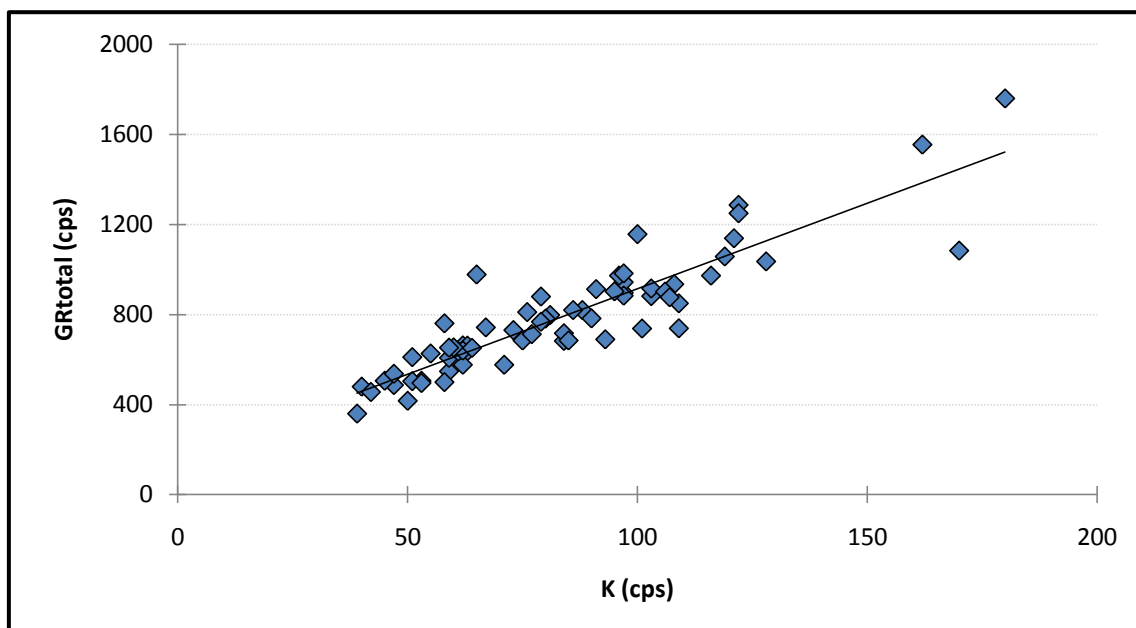
**Figura 15:** Relación K – GRtotal para la Formación San Antonio.



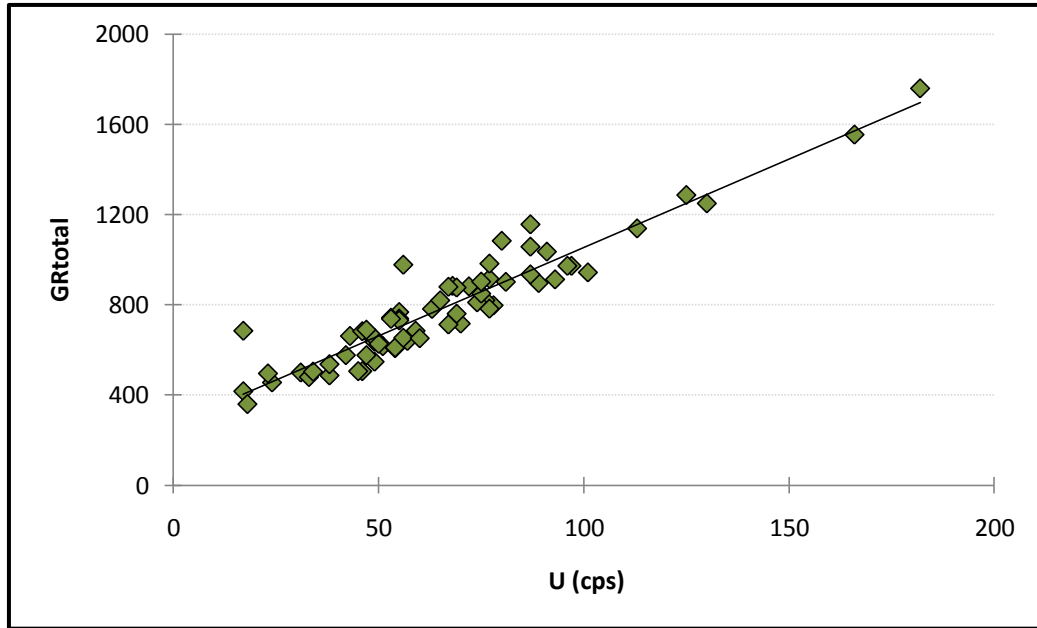
**Figura 16:** Relación U – Grtotal para la Formación San Antonio.



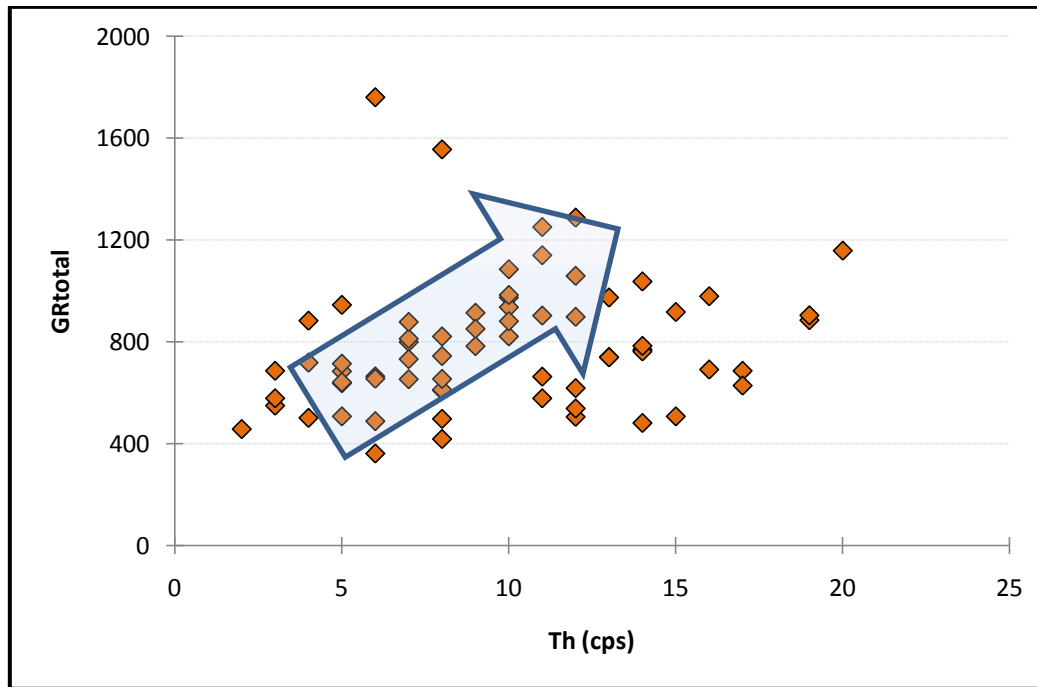
**Figura 17:** Relación Th – GRtotal para la Formación San Antonio.



**Figura 18:** Relación K – GRtotal para la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).



**Figura 19:** Relación U – GRtotal para la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).



**Figura 20:** Relación Th – GRtotal para la Formación Querecual (tomado de Gómez, 2006).

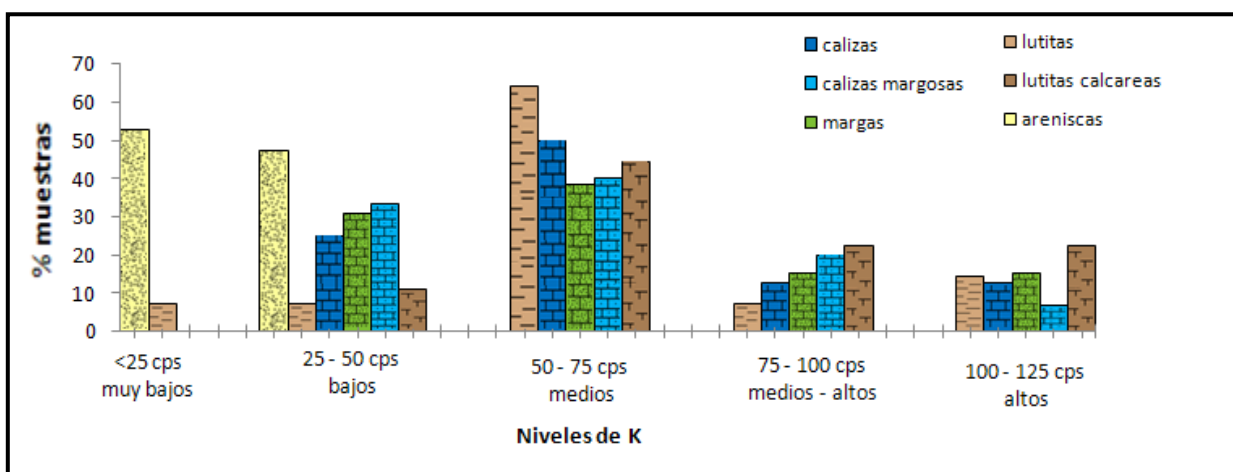


De acuerdo a los valores de radioactividad discriminada por elementos obtenidos y con el fin de relacionar las litologías presentes en la Formación San Antonio con dichos resultados, se realizaron una serie de gráficos, en los cuales se utilizó como 100% el total de muestras tomadas para cada litología. Con estos gráficos mostrados en las figuras 21 a la 23, se plantean los siguientes niveles, que ayudan a identificar cualitativamente a qué litología se relaciona cada elemento: muy bajos (<25cps), bajos (25 – 50cps), medios (50 – 75cps), medios – altos (75 – 100cps) altos (100 – 125cps) y muy altos (>125cps).

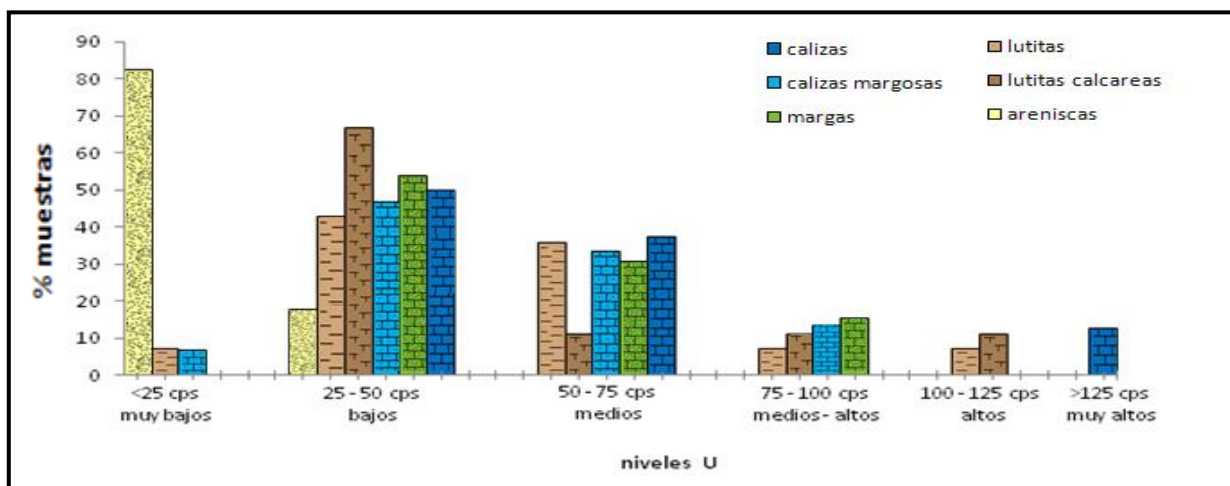
Según las distribuciones mostradas en estas figuras (21 a la 23), se observa que las areniscas muestran valores muy bajos o bajos de los elementos discriminados, donde la mayoría de las muestras no sobrepasan las 50 cps, indicando, que estas litologías son las que presentan los menores valores de radioactividad en toda la formación. Por otra parte, al hacer una revisión separada de los gráficos, se observa que el resto de las litologías identificadas presentan valores de los elementos muy variables, quedando que para el caso del K, la mayoría de las muestras se encuentran en niveles que van desde valores bajos (25 – 50cps) hasta niveles altos (100 – 125cps), indicando que este elemento se encuentra principalmente en los minerales de arcilla presentes en las rocas.

En el caso de la distribución del U, se observa que las muestras correspondientes a las lutitas, lutitas calcáreas, margas, calizas y calizas margosas, en su mayoría, se encuentran distribuidas entre los niveles bajos (25 – 50 cps) y medios (50 – 75 cps), aunque también se encuentran pocas muestras en los niveles superiores (75 – 125cps), quedando que aquellas litologías donde se observan altas concentraciones de COT presentan altas medidas de U en la formación; excepto una muestra de caliza que presenta valores muy altos de U (~135 cps), la cual, al ser comparada con el resto de las calizas, cuyos valores U no sobrepasan las 75 cps, permite inferir, que sus valores de U podrían deberse, además de a su COT, a la formación de complejos entre el carbonato y el ion  $\text{UO}_2^{2+}$  o a la asociación con fosfatos; lo cual, puede ser la causa de que los valores de U sean altos en estas litologías (Adams and Weaver, 1958; Jerden *et al.*, 2003; McSween *et al.*, 2003; Banner, 2004; Ellis, 2007). Sin embargo, estas asociaciones minerales del U, no pudieron ser comprobadas en la muestra.

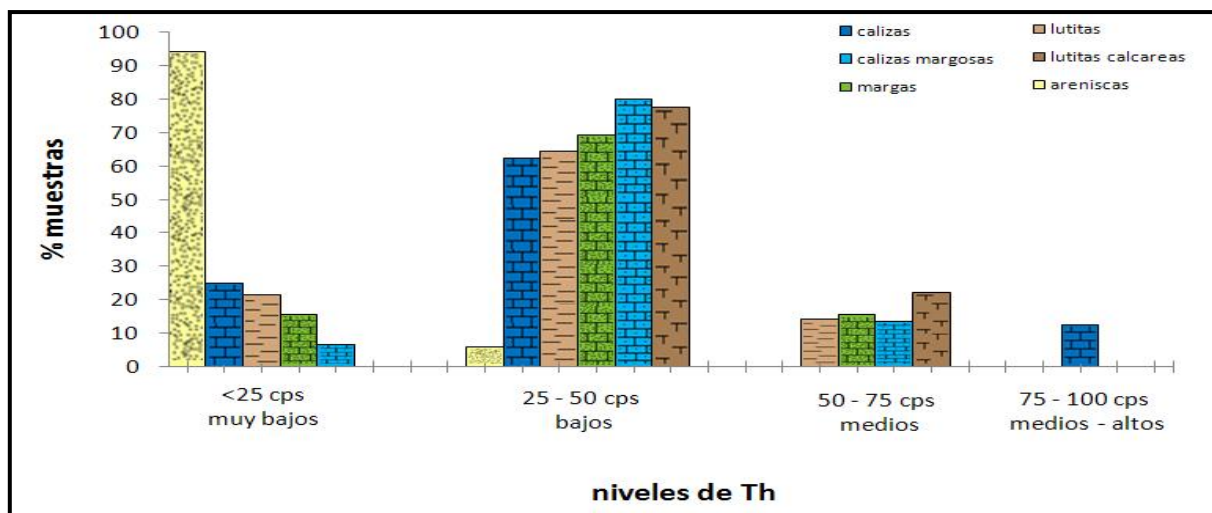
Por otra parte, en la distribución de Th se observa que la mayoría de las lutitas, lutitas calcáreas, margas, calizas y calizas margosas, se encuentran principalmente en el intervalo de valores muy bajos (<25 cps) y bajos (25 – 50 cps), excepto una muestra de caliza que presenta valores altos de Th (94cps). Debido a la asociación de este elemento con la fracción clástica o mineral de las rocas, estos valores obtenidos pueden estar relacionados con la presencia de los minerales de arcillas y a otras especies minerales a las que generalmente también puede asociarse el Th, como es el caso de algunos fosfatos (Fujino, 2000). Sin embargo, como ya se dijo, las asociaciones minerales presentes en esta muestra no pudieron comprobarse.



**Figura 21:** Distribución porcentual de muestras de la Formación San Antonio según los valores de K discriminando por litología.

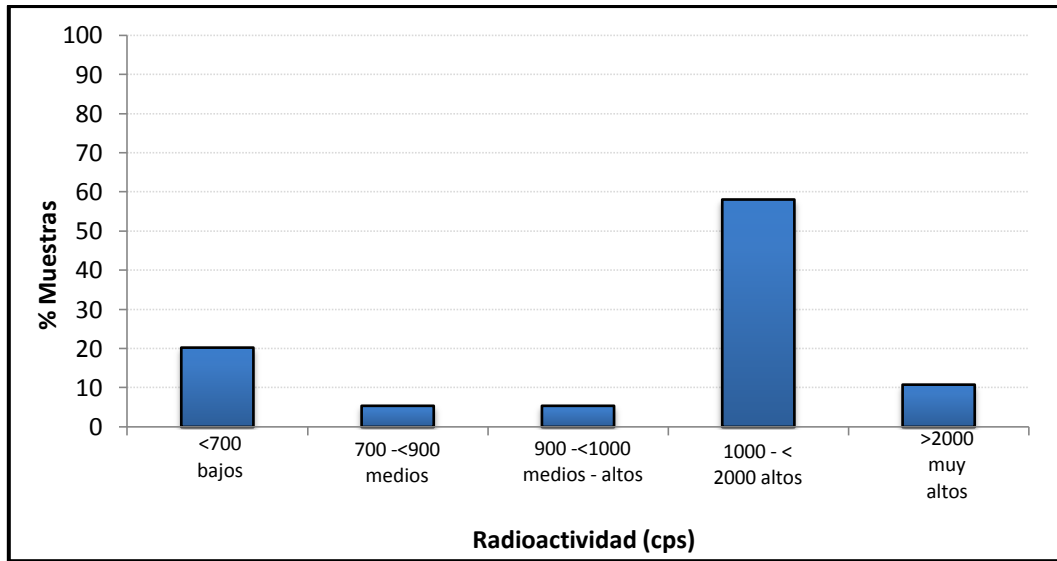


**Figura 22:** Distribución porcentual de muestras de la Formación San Antonio según los valores de U discriminando por litología.



**Figura 23:** Distribución porcentual de muestras de la Formación San Antonio según los valores de Th discriminando por litología.

Luego de observar que existe una relación aceptable entre las medidas de GRtotal, los elementos U, Th y K y entre la litología y dichos elementos, se realizaron una serie de gráficos para relacionar estas litologías presentes en la Formación San Antonio con los resultados de GRtotal obtenidos en este estudio. Estos gráficos se realizan agrupando las muestras según sus valores de GRtotal, utilizando los niveles de radioactividad planteados por López *et al.* (2010), donde los niveles bajos (<700 cps), medios (700 – 900 cps), medios - altos (900 – 1000 cps), altos (1000 – 2000 cps) y muy altos (>2000 cps). Estos niveles de radioactividad facilitan la interpretación de los resultados, ya que derivan de los reportados por Gómez (2006) para la Formación Querecual, permitiendo que se pueda realizar una comparación entre ambas formaciones. En la figura 24 se presenta la distribución de la radioactividad total obtenida para las muestras de la Formación San Antonio (considerando como 100% el total de muestras recolectadas en la formación).



**Figura 24:** Distribución de la radioactividad total en las muestras de la Formación San Antonio.

En la distribución de la figura 24, se observa que en los niveles medios, medios - altos y muy altos de  $GR_{total}$ , se encuentra el menor número de muestras, mientras un 20,27% de ellas presentan valores bajos y el 58,11% de las muestras, presentan valores altos de radioactividad. Aunque este gráfico permite conocer como es la distribución general de los  $GR_{total}$  de la Formación San Antonio, en la figura 25, se presenta la distribución de los  $GR_{total}$  de la formación, discriminada por litología, la cual se realizó considerando como 100% el número de muestras recolectadas para cada tipo litológico.

Como se puede observar en el gráfico de la figura 25, las lutitas, lutitas calcáreas, calizas, calizas margosas y margas, presentan valores entre altos (1000 - 2000 cps) y muy altos (>2000 cps) de  $GR_{total}$ , mientras que las areniscas, presentan en niveles bajos (<700 cps); comparando estos valores con los obtenidos por Gómez (2006) para la Formación Querecual (figura 26), se observa que los de esta última formación son menores a los de San Antonio, esto se relaciona con el aumento en los valores de Th obtenidos en la Formación San Antonio, debido al aumento del material clástico en la cuenca durante su sedimentación, generando, que debido a la relación entre los valores de los elementos y los  $GR_{total}$ , se produzca un aumento de las medidas de radioactividad de San Antonio con respecto a las de Querecual.

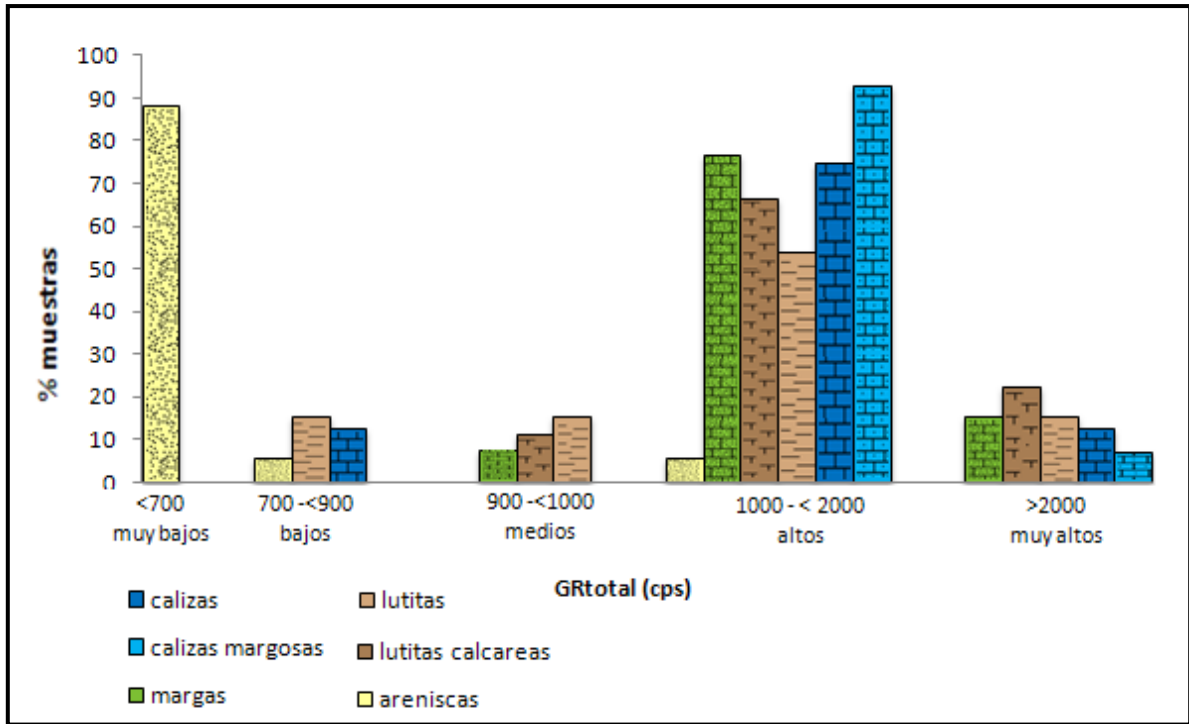


Figura 25: Distribución de la radioactividad total de la Formación San Antonio, discriminada por litología.

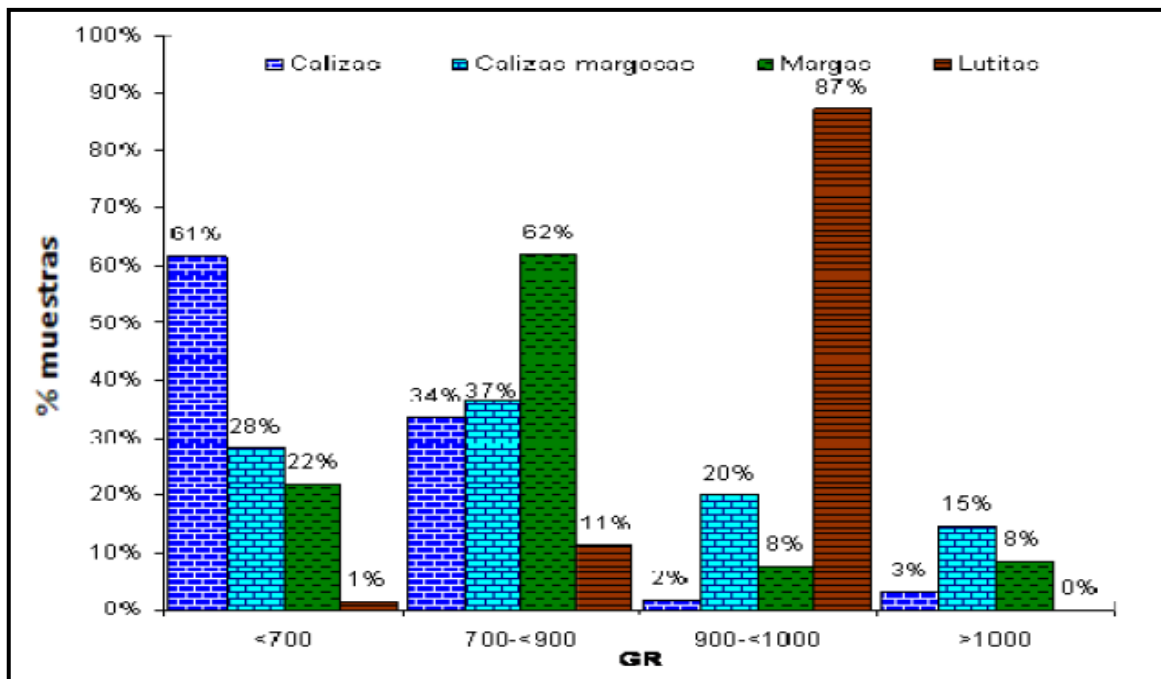
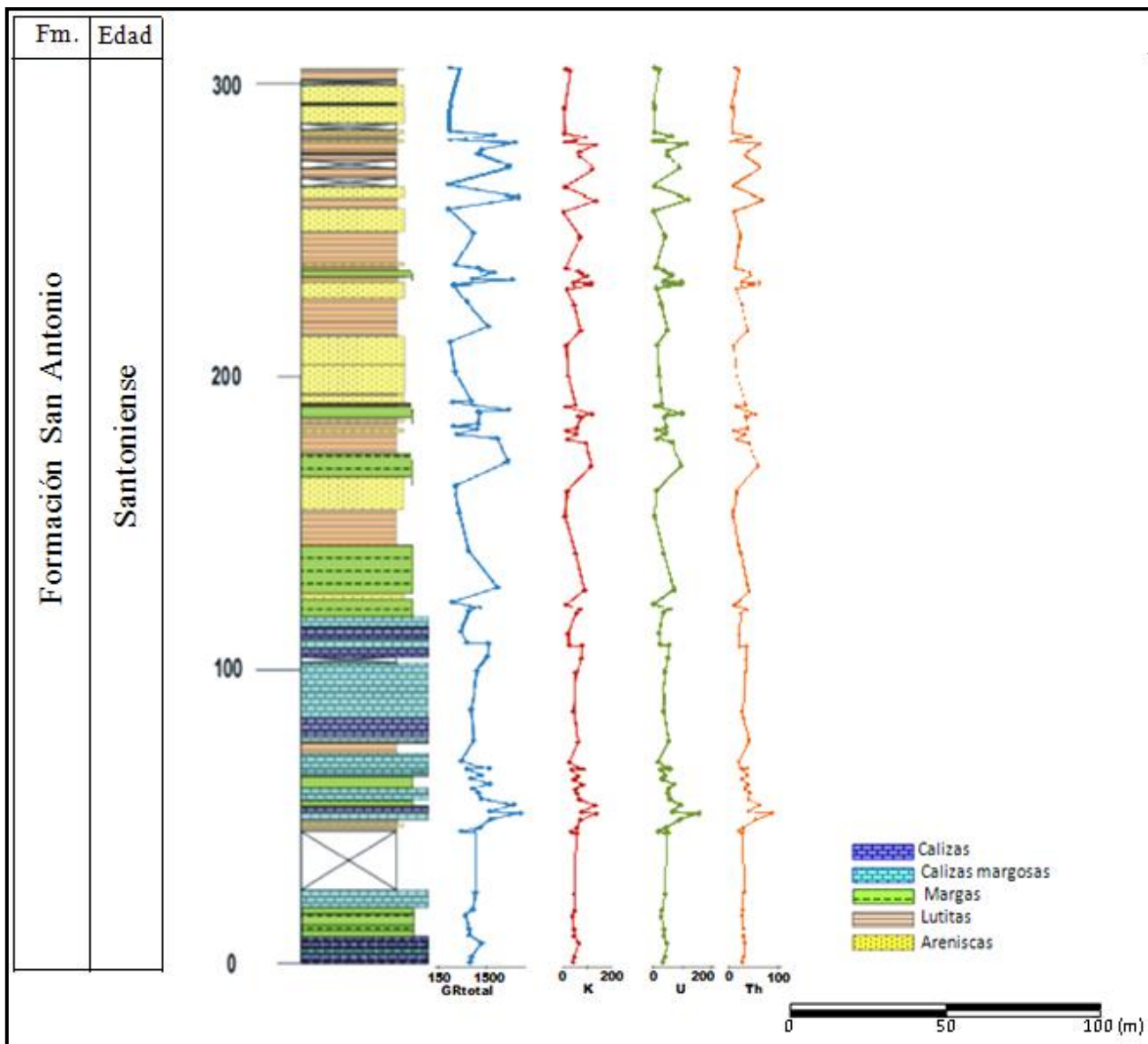


Figura 26: Distribución de la radioactividad total de la Formación Querecual, discriminada por litología (modificado de Gómez, 2006).

En el gráfico de la figura 27, se observa la ubicación de las muestras dentro de la sección tipo de la Formación San Antonio, lo que permite visualizar mejor como son las distribuciones de GRtotal y de los elementos U, Th y K a lo largo de la misma.



**Figura 27:** Resultados Radioactivos (GRtotal, K, U y Th) ubicados en la columna estratigráfica de la sección tipo de la Formación San Antonio (modificado de López *et al.*, 2010).

En el gráfico de la figura 27, se observa que los valores de radioactividad total y discriminada por elementos, aumentan hacia el tope de la columna, lo cual está asociado al aumento del aporte de material clástico en la cuenca. Sin embargo, en la zona cercana a la base de la columna, se observan valores altos de las cuatro variables consideradas ( $GR_{total}$ , K, U y Th), esto es debido a la presencia de la muestra de caliza ARQKSA-13 mencionada anteriormente, y a la presencia de margas y lutitas cercanas a ella, las cuales generan esa variación de las distribuciones en las capas inferiores de la sección, caracterizadas generalmente por presentar valores bajos de radioactividad.

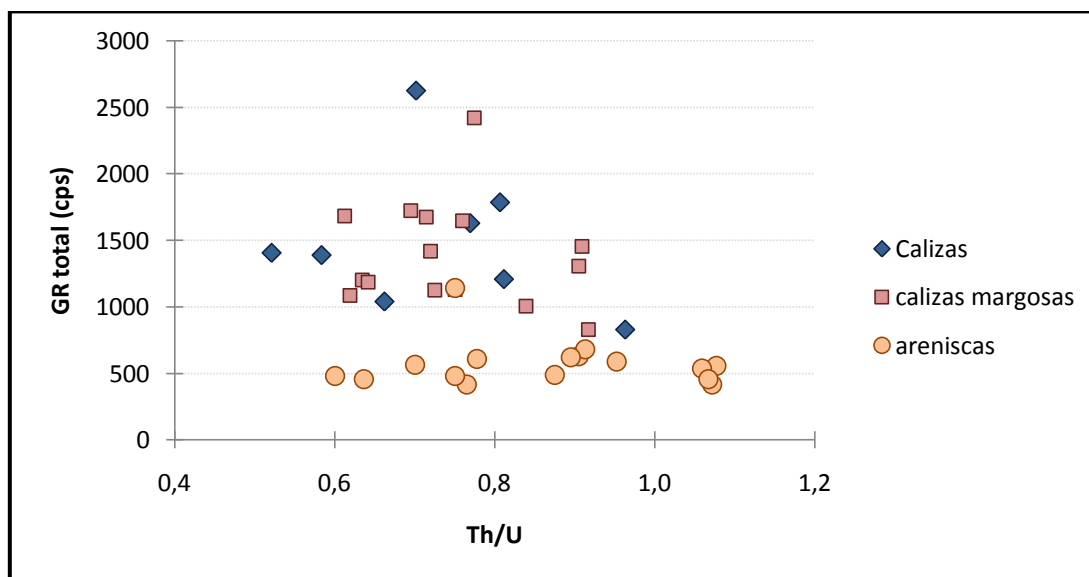
Luego de observar que sí existe relación entre las litologías y los valores de radioactividad obtenidos en la formación, es necesario relacionar los  $GR_{total}$  con los valores correspondientes a Th/U y Th/K (Ghasemi-Nejad *et al.*, 2010), con el fin de conocer el ambiente de sedimentación en el que se depositó la Formación San Antonio (Th/U) e inferir los minerales a los que pueden estar asociados los elementos (Th/K). Estas relaciones se realizan ya que un enriquecimiento relativo de U, implica condiciones anóxicas en el ambiente de sedimentación; mientras que el enriquecimiento de K, sirve como indicador de especies de minerales de arcilla presentes en la roca (Doveton y Prenskey, 1992). Si bien estas relaciones no son utilizadas únicamente empleando los valores de radioactividad natural, diversos autores han comprobado su efectividad y confianza cuando se utilizan los valores de rayos gamma generados a partir de estos elementos radioactivos para la determinación de estas variables (Chaker *et al.*, 2005; Schnyder *et al.*, 2006; Gómez, 2006). Por esta razón, utilizando de manera cualitativa las cuentas obtenidas, se puede realizar un reconocimiento de la presencia de materia orgánica en la zona estudiada (Schnyder *et al.*, 2006).

Los gráficos presentados en las figuras 28 a la 31, muestran que no existe correlación entre  $GR_{total}$  y las relaciones de Th/U y Th/K; sin embargo, se observa que ambas relaciones aportan gran información sobre las condiciones del ambiente de sedimentación de la formación. Los gráficos de Th/U (figuras 28 y 29), proporcionan una idea acerca del grado de oxigenación bajo el cual se sedimentó la Formación San Antonio; es decir, ayudan a determinar si su sedimentación ocurrió en un ambiente óxico, subóxico o anóxico. Como los valores obtenidos son menores a 2, se infieren condiciones anóxicas (Adams y Weaver, 1958; Dypvik, 2001), sin

embargo, ya que en algunos casos los valores están entre 0,6 y 1,2; se podría decir que durante la sedimentación de la formación hubo variaciones en las condiciones redox del ambiente de sedimentación, haciéndose en algunos casos menos anóxica.

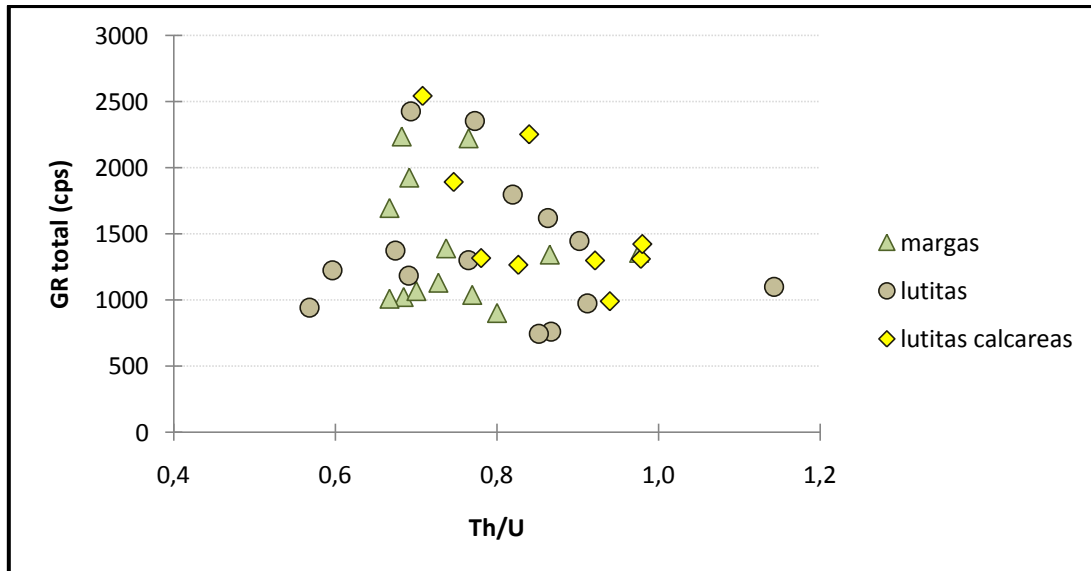
En el caso de las areniscas, se presentan valores de la relación Th/U muy variables, indicando que aunque todas se sedimentaron en un ambiente anóxico, las condiciones fueron haciéndose en algunos casos menos anóxicas (valores cercanos a 1,2), generando con esto un aumento relativo en los valores de Th, y por tanto un aumento de la relación.

Por su parte, en el resto de las litologías, no se observa ninguna distribución específica. Sin embargo en todas, los valores de la relación, al igual que en las areniscas, son variables entre 0,5 y 1,2 comprobando que las condiciones redox del ambiente de sedimentación fueron cambiando y haciéndose en algunas secciones menos anóxicas, en las cuales ocurre una disminución de los valores de U.



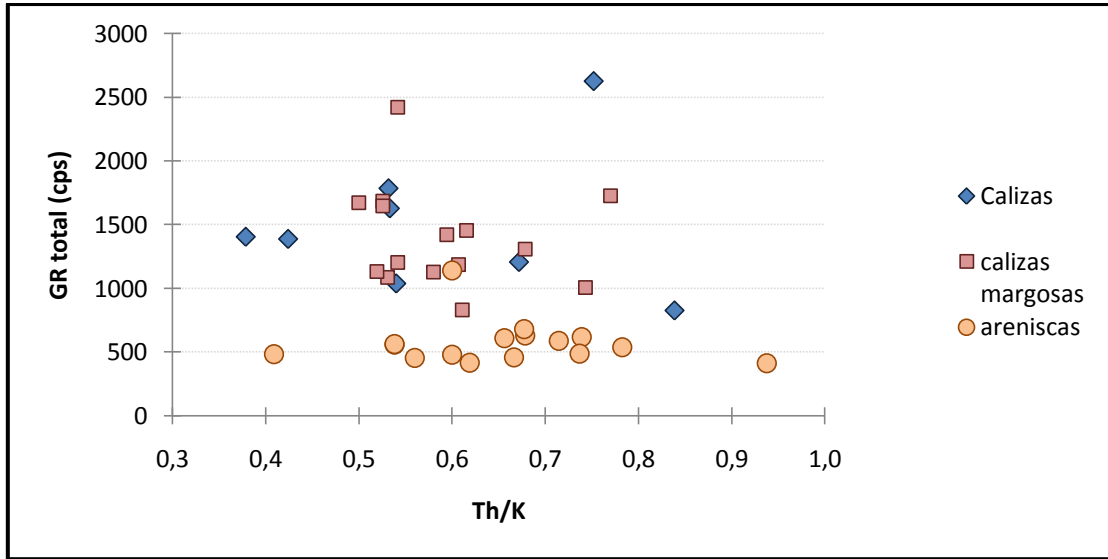
**Figura 28:** Distribución de las areniscas, calizas y calizas margosas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/U.



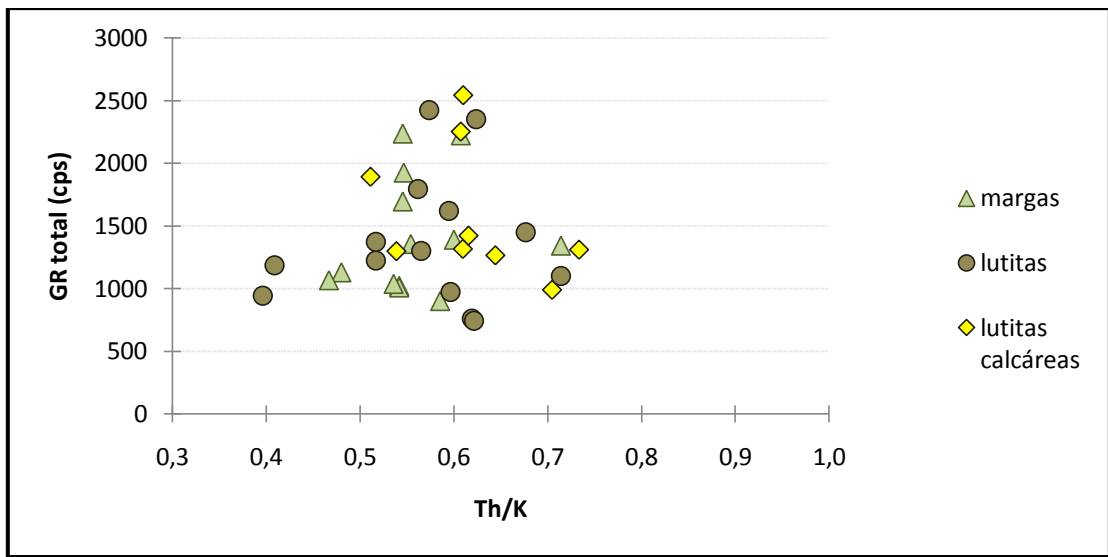


**Figura 29:** Distribución de las lutitas, lutitas calcáreas y las margas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/U.

De los gráficos donde se relacionan los GRtotal con la relación Th/K (figuras 30 y 31), se extrae el grado de aporte clástico a la cuenca, y por tanto los minerales a los que pueden estar asociados estos dos elementos. En estas figuras, se presentan las distribuciones obtenidas de esta relación (Th/K), donde se observa, que las muestras de areniscas presentan valores muy variables ( $\sim 0,4 - \sim 1,0$ ), lo que indica, un enriquecimiento relativo del Th. En el resto de las litologías, los valores de la relación son muy variables ( $\sim 0,4 - \sim 0,8$ ), lo cual, considerando que ambos elementos están asociados principalmente a la fracción clástica, permitiría inferir que los valores obtenidos pueden deberse a las variaciones en el contenido de este material en cada muestra.



**Figura 30:** Distribución de las areniscas, calizas y calizas margosas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/K.

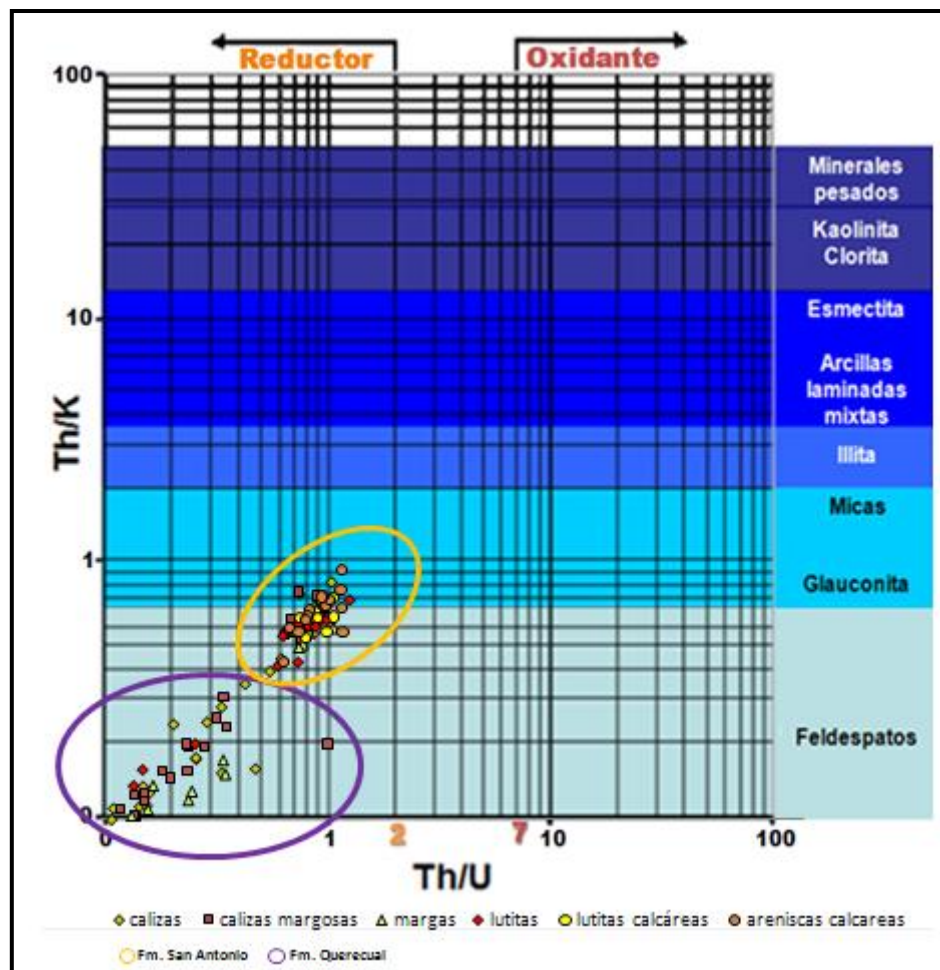


**Figura 31:** Distribución de las lutitas, lutitas calcáreas y las margas de la Formación San Antonio para la relación GRtotal y Th/K.

Utilizando el diagrama presentado por Doveton (1994 en Gómez, 2006), mostrado en la figura 32, en el cual se integran las relaciones de Th/U y Th/K, se observa que todas las muestras tomadas en la Formación San Antonio se encuentran en el intervalo de Th/U menor a 2, lo que implica que las condiciones durante la sedimentación de la formación fueron anóxicas en los

sedimentos, lo cual está representado por la cercanía de los valores al límite marcado por el Gráfico y por la interfase O<sub>2</sub>- H<sub>2</sub>S reportada por Lugo (2002).

Al comparar los valores de la relación Th/U obtenidos en este estudio (0,5 – 1,2), con los obtenidos en la Formación Querecual (Gómez, 2006) (figura 32) donde en su mayoría, los valores reportados están entre 0,1 y 0,5; se demuestra que las condiciones al momento de la sedimentación de la Formación San Antonio fueron menos anóxicas que las ocurridas durante la sedimentación de Querecual, para la cual, se reportan condiciones anóxicas euxínicas (Lugo, 2002).



**Figura 32:** Distribución de las muestras de las Formaciones San Antonio y Querecual en el diagrama presentado por Doveton (1994 en Gómez, 2006).

Al observar la posición que ocupan las muestras de la Formación San Antonio, en la sección del gráfico correspondiente a la relación de Th/K (figura 32), se podría inferir que los minerales asociados a estas muestras, son principalmente feldespatos-K y glauconita ((K,Ca,Na)(Al,Fe,Mg)<sub>2</sub>(Si, Al<sub>4</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) (Gornitz, 2009), aunque, no se descarta la presencia de algunas micas. Al comparar estos resultados con los obtenidos por Gómez (2006) en Querecual (figura 32), se observa que los valores de la relación Th/K para Querecual son menores, implicando litologías mas enriquecidas en K que en Th, lo que explica la dispersión que existe entre los valores de GRtotal y el Th para esa formación.

Los análisis de DRX realizados por Heras (2010) en las muestras de San Antonio, indican que la mineralogía de la formación, está compuesta principalmente por: calcita (CaCO<sub>3</sub>), cuarzo (SiO<sub>2</sub>), caolinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), pirita (FeS<sub>2</sub>), illita (KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)), apatito (Ca(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(F,Cl,OH)), halloysita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), siderita (FeCO<sub>3</sub>) y moscovita (KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>). Las diferencias observadas entre los resultados de este estudio y los obtenidos por Heras (2010), se deben a que con el uso de la relación Th/K obtenida con las medidas de radioactividad natural, solo se están considerando los minerales más comunes a los que pueden asociarse los elementos radioactivos, por tanto, solo se puede inferir la mineralogía según la respuesta obtenida por el espectrómetro; mientras que con DRX, se pueden conocer exactamente las fases minerales presentes en la muestra, con lo que se logra determinar a cuales de ellas se encuentran asociados los elementos radioactivos estudiados (U, Th y K). Encontrando que según las características y propiedades de dichos elementos, estos pueden acumularse ya sea adsorbidos o como parte fundamental de la estructura de las arcillas (Th y K) o junto a los minerales pesados, carbonatos y fosfatos (U y Th) (Adams and Weaver, 1958; Jerden *et al.*, 2003; McSween *et al.*, 2003; Banner, 2004; Ellis, 2007), explicando así su ocurrencia en la formación.

#### **4.4.RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE Ct, Cinorg, COT Y LAS MEDIDAS DE RADIOACTIVIDAD**

En esta etapa se mostrarán las relaciones entre los datos geoquímicos (COT, Ct y Cinorg) y los datos de radioactividad total y discriminada por elementos, en especial con las medidas obtenidas

para el U (total y autigénico). Esperando que a mayores concentraciones de U, se encuentren mayores concentraciones de COT, debido a la estrecha relación que existe entre ambos (Schnyder *et al.*, 2006). Las relaciones entre ambos conjuntos de resultados (geoquímicos y radioactivos), se realizan con el fin de observar las tendencias resultantes de las relaciones existentes entre ellos.

En la relación COT – GRtotal (figura 33), se distinguen claramente dos grupos, el señalado por las litologías carbonáticas y por las areniscas (tonalidades verdes de la figura), en las que se presentan valores de COT entre 0,1 y 0,3 e intervalos de valores de GRtotal bajos - altos (400 – 1800 cps) y el grupo de las lutitas, lutitas calcáreas y las margas (tonalidades naranjas de la figura), las cuales, presentan valores de GRtotal en el intervalo medios - muy altos (800- 2600 cps) y valores de COT entre 2,0 y 9,0 %. Con estas distribuciones, se logra determinar que si existe una relación aceptable entre el COT de las muestras y las medidas de radioactividad obtenidas.

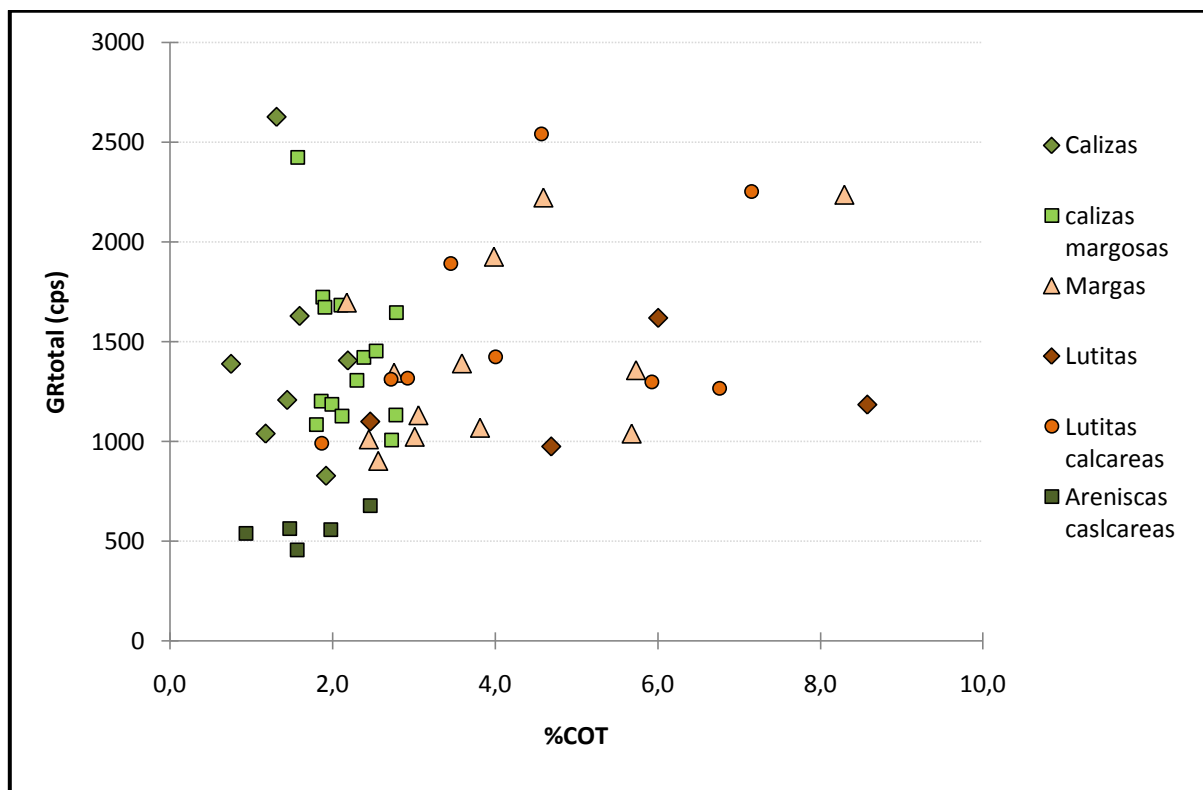
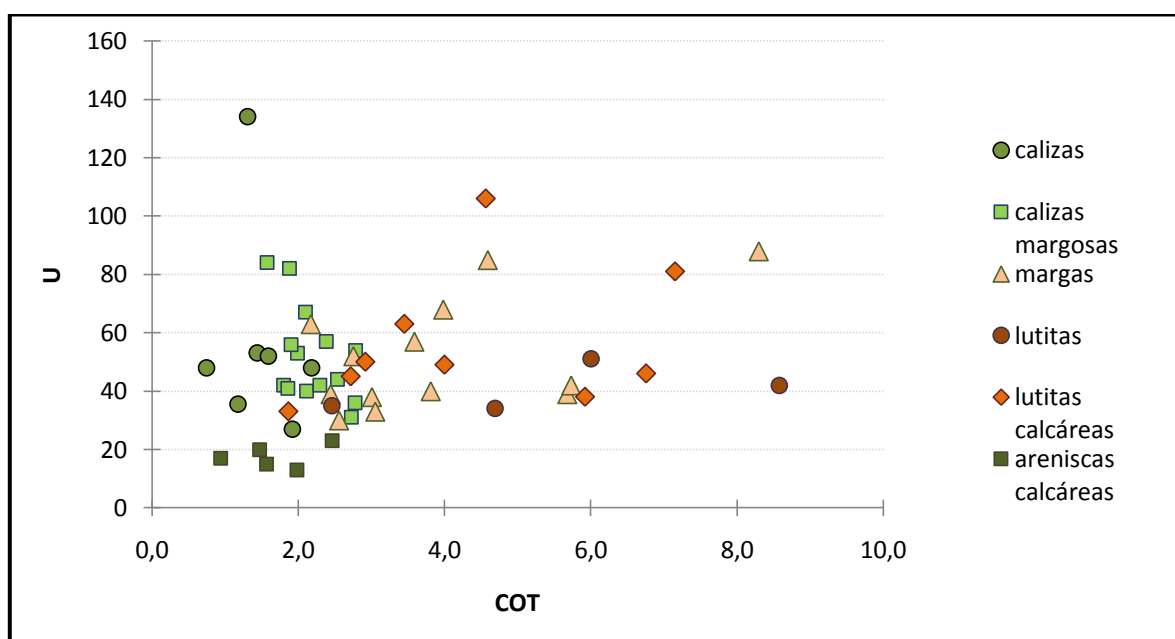


Figura 33: Relación entre GRtotal y COT para las muestras de la Formación San Antonio.

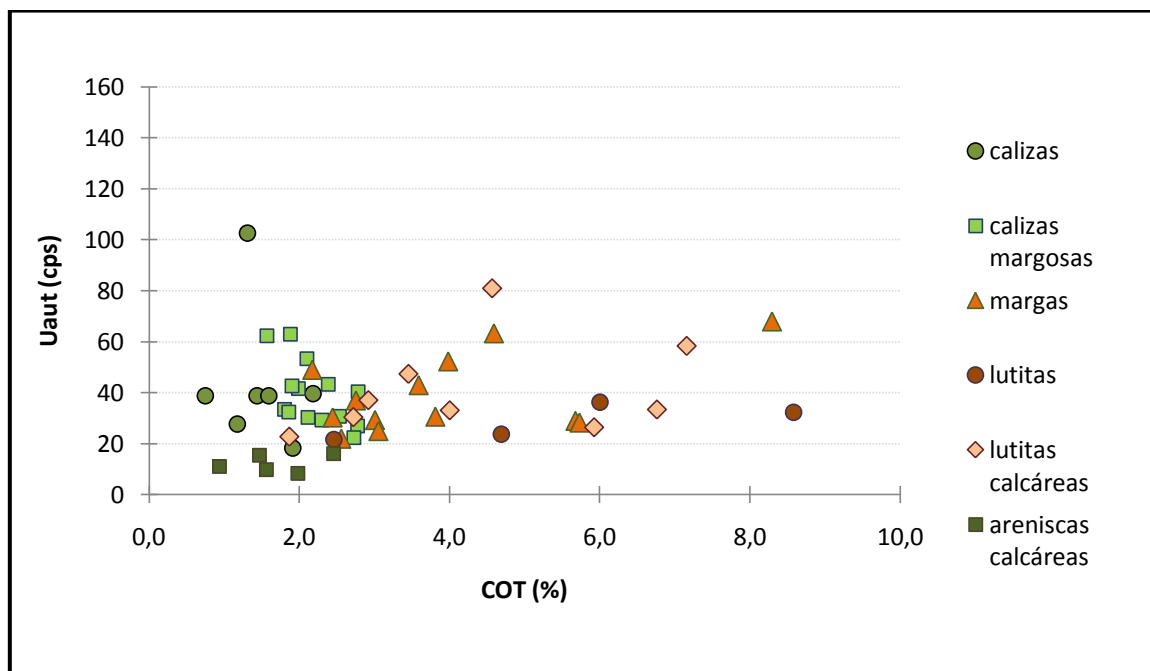
A continuación se presentan las relaciones entre los valores de COT y las medidas de U y Uautigénico (Uaut) obtenidas para la Formación San Antonio, discriminadas por litología (figuras 34 y 35). En la figura 34 se observa que las rocas madre clásticas (colores naranjas de la figura) presentan mayores valores de U, relacionándose con que sus concentraciones de COT son mayores que las presentadas por las carbonáticas y las areniscas (colores verdes de la figura); excepto una muestra de caliza, la cual, presenta valores de GRtotal y de U altos en comparación al resto de las muestras correspondientes a esta litología. Sin embargo, como ya se ha dicho, en esta muestra no pudieron ser determinadas las fases minerales a las cuales podrían estar asociados sus valores de radioactividad.



**Figura 34:** Relación entre COT y U para las muestras de la Formación San Antonio.

La relación existente entre el Uaut y el COT, se debe a que en condiciones anóxicas el U por reducción precipita para generar fases minerales propias (Wignall y Myers, 1988 en Jones y Manning 1994). En la figura 35 se presenta dicha relación para las muestras de la Formación San Antonio, cuyos valores de Uaut, fueron calculados utilizando la ecuación planteada por Jones y Manning (1994) (ecuación 1). Aunque no se detectaron fases minerales de U en los difractogramas de RX, no puede descartarse su presencia debido a que las condiciones bajo las cuales ocurrió la sedimentación de la Formación San Antonio fueron anóxicas (con una interfase

O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S en los sedimentos). En esta figura también se observa, que si bien los valores de U<sub>aut</sub> son menores a los valores de U<sub>total</sub> (figura 34), la distribución general se mantiene, quedando que aquellas rocas que presentan mayores valores de COT presentan mayores valores de U<sub>aut</sub>, lo que implica que sí existe relación entre ambos y por tanto se confirman las condiciones anóxicas determinadas utilizando las relación elemental de Th/U.



**Figura 35:** Relación entre COT y U<sub>aut</sub>igénico para las muestras de la Formación San Antonio.

La conjunción de los datos geoquímicos y radioactivos obtenidos en para la Formación San Antonio, se presenta en la figura 36, en ella se muestra la distribución de GR<sub>total</sub>, rayos gamma discriminados por elementos (K, Th y U), las relaciones Th/U y Th/K y los valores correspondientes a Ct, Cinorg, COT, bitumen y bitumen/COT a lo largo de la sección tipo de la Formación San Antonio, con el fin de observar las secciones de la columna donde existen las mismas tendencias que demuestran la relación existente entre estos parámetros.

En la figura 36 se encuentran señaladas cinco zonas (A, B, C, D y E), con el fin de demostrar las diferentes relaciones existentes entre los parámetros estudiados. Para la selección de las mismas

se tomaron en consideración los valores de radioactividad total y discriminada, los valores de las relaciones (Th/U y Th/K), los valores de COT, Cinorg y bitumen que mostraban.

La zona A (caliza) de acuerdo a sus valores de COT (1,3%) es considerada una buena roca madre presenta los mayores valores de  $GR_{total}$  medidos en la formación (2626cps), además de alto U (134cps), Th (94cps) y K (125cps); en ella también se observan valores de la relación Th/U bajos, los cuales demuestran que las condiciones de sedimentación de esta caliza fueron más anóxicas que las ocurridas en las litologías que se encuentran supra e infrayacentes a ella. Sin embargo, debido a que se desconocen los minerales que la componen, no puede determinarse con exactitud a que se deben las medidas de radioactividad que presenta.

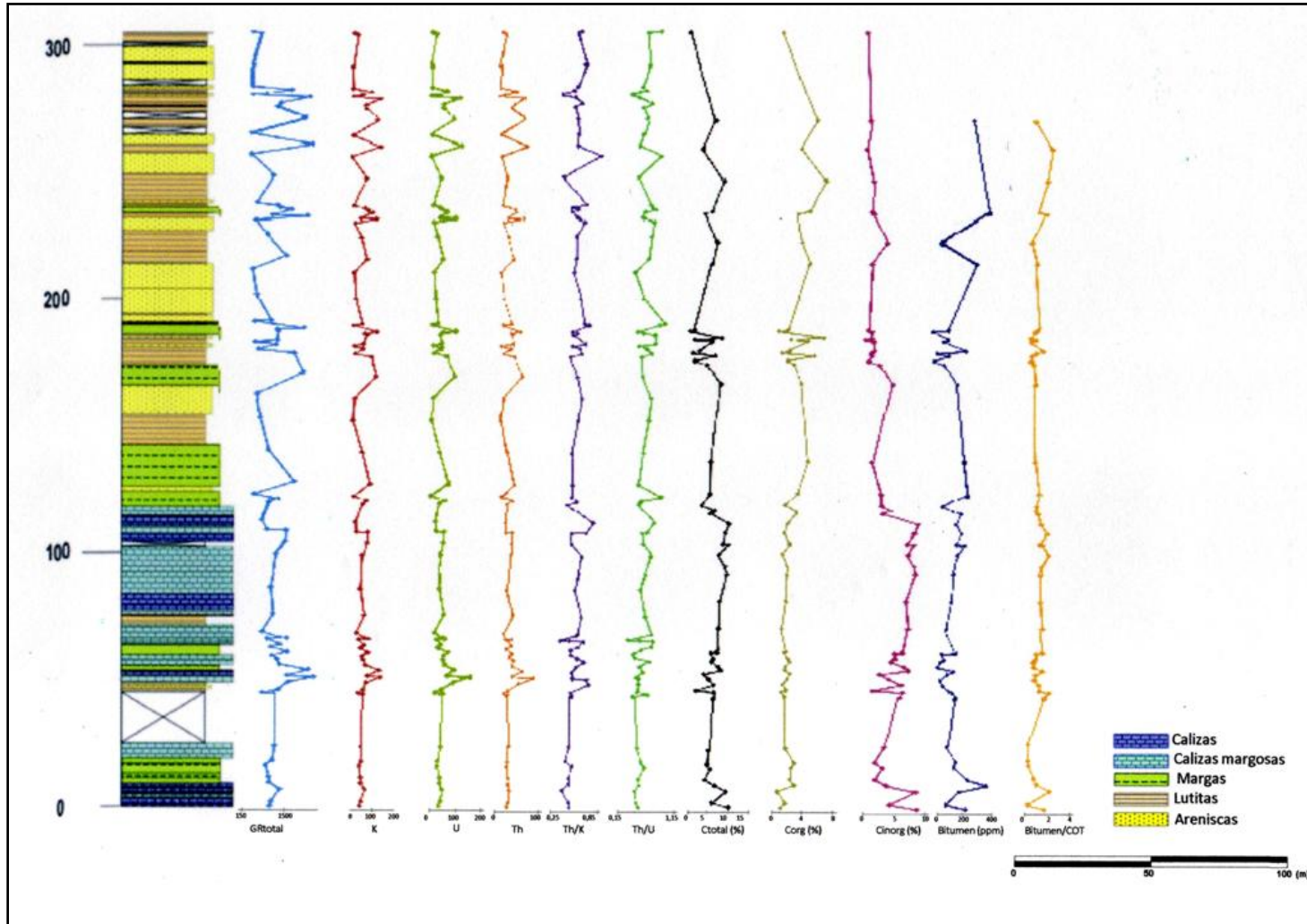
En las zonas B (caliza margosa) y E (lutita), se observan valores de  $GR_{total}$  altos y muy altos (1646 y 2542cps respectivamente), valores de U medios y altos (40 y 106cps respectivamente) y de COT (2,8 y 4,6%), que las clasifican como buenas rocas madre; indicando la estrecha relación existente entre la radioactividad total y discriminada (especialmente el U) y el COT. Ambas muestras presentan relaciones Th/U (~0,7) similares, indicando que durante su sedimentación las condiciones fueron anóxicas; sin embargo en la relación Th/K si se observan grandes diferencias entre ambas, la zona B presenta valores cercanos a 0,5; mientras que E presenta valores cercanos a 0,7; lo que indica que la muestra de lutita presenta una mineralogía enriquecida en Th, confirmando la relación entre la fracción mineral de las rocas y este elemento radioactivo. Otro parámetro en el que difieren ambas muestras, es el porcentaje de bitumen, en el cual la lutita, contrario a la caliza, presenta valores altos, lo que se relaciona con el COT de ambas, quedando que por esta razón la relación bitumen/COT es elevada.

La zona C (arenisca) presenta valores bajos de  $GR_{total}$  (538cps) y de U (17cps), Th (18cps) y K (23cps), y valores de Th/U altos (1,1), lo que indica que las condiciones del ambiente de sedimentación de esta muestra fueron menos anóxicas que las de las muestras cercanas a ella. En el caso de los valores de COT y de bitumen, se observa que esta muestra presenta valores bajos (1,3% y 39,9ppm), lo cual puede relacionarse con los bajos valores de radioactividad y a su vez, con la baja eficiencia de expulsión de las rocas de la Formación San Antonio reportada por López (1997).



La zona D (lutita), presenta los mayores valores de bitumen (1031.2ppm) y de COT (~8,6%) encontrados en la formación, podrían estar correspondiendo nuevamente a la baja eficiencia de expulsión de hidrocarburos reportada por López (1997). Lo que se relaciona con su alto GRtotal (1184cps) y sus valores de U (42cps). Además sus valores de Th/U (~0,69), implican que esta muestra se sedimentó en condiciones más anóxicas que las litologías cercanas a ella. Esta muestra al igual que las anteriores demuestra la relación existente entre los valores de radioactividad, la litología y el COT.

De manera general, los resultados obtenidos del estudio de la Formación San Antonio son muy variables a lo largo de la misma, sin embargo, se distinguen ciertas relaciones entre las variables estudiadas; quedando, que a medida que aumenta el COT, la concentración bitumen y la relación bitumen/COT, los valores de radioactividad (especialmente U), son mayores, coincidiendo a su vez con la presencia de las lutitas, lo que permite establecer e identificar la relación existente entre la radioactividad (total y discriminada), el COT y la litología. Adicionalmente, se observa que si bien, los valores de la relación Th/U son variables a lo largo de la sección, hacia el tope aumentan, indicando que las condiciones redox del ambiente de sedimentación de las rocas ubicadas en esta zona de la sección, fueron menos anóxicas que las de la base. Sin embargo, de manera general, se puede decir que las condiciones de sedimentación de la Formación San Antonio, fueron anóxicas en los sedimentos y por ello se presenta la interfase O<sub>2</sub>- H<sub>2</sub>S en los sedimentos reportada por Lugo (2002). Por su parte la relación Th/K es variable a lo largo de la sección, sin embargo, hacia el tope sus valores aumentan, indicando el aumento del aporte de material clástico a la cuenca durante su sedimentación, además de un enriquecimiento de Th en la formación. En el caso del Cinorg se observa que aumenta hacia la base de la sección, esto se debe a que la concentración de carbonatos es menor hacia el tope, debido a la ocurrencia de corrientes periódicas, que transportaron clásticos a la cuenca y generaron circulación de oxígeno a las aguas estancadas del fondo (González de Juana, 1980; Talukdar *et al.*, 1988; Lécico Estratigráfico, 2010).



**Figura 36:** Resultados radioactivos (totales y discriminados) y resultados geoquímicos (Ct, Cinorg, COT, concentración de bitumen) en la columna estratigráfica de la sección tipo de la Formación San Antonio (modificado de López *et al.*, 2010).

## 5. CONCLUSIONES

La localidad tipo de la Formación San Antonio está conformada por seis tipos litológicos: lutitas, lutitas calcáreas, margas, calizas, calizas margosas y areniscas calcáreas.

A modo general las medidas de radioactividad total y discriminada, aumentan hacia el tope de la sección.

La relación Th/U indica que si bien las condiciones de sedimentación de la Formación San Antonio fueron anóxicas, estas fueron menos anóxicas que las de Querecual, implicando variaciones en las condiciones redox de sedimentación del Grupo Guayuta (Formaciones Querecual y San Antonio).

La relación Th/K indica un aumento en el aporte clástico en la cuenca durante la sedimentación de la Formación San Antonio.

El contenido de material clástico aumenta hacia el tope de la sección, observando que las lutitas, lutitas calcáreas y areniscas se encuentran en esta zona; mientras que las calizas y las calizas margosas se encuentran hacia la base de la sección: por su parte, las margas están ubicadas hacia la base y zona media de la sección.

Las medidas de Th y K están relacionados con la fracción mineral de las rocas y muestran un aumento hacia el tope de la sección, relacionándose que el aumento del contenido de material clástico en la formación.

Las concentraciones de bitumen y de COT aumentan hacia el tope de la sección, coincidiendo con la presencia de las lutitas y las lutitas calcáreas, implicando una relación con la litología

Como se pudo observar a lo largo de la localidad tipo de la Formación San Antonio, altas concentraciones de COT se relacionan con valores altos de GR<sub>total</sub>, demostrando que esta técnica es aplicable en el reconocimiento de rocas madre.

De acuerdo con los resultados obtenidos para la localidad tipo de la Formación San Antonio, altas medidas de U se relacionan con altos valores de COT, implicando una estrecha relación entre la materia orgánica y este elemento.

Las concentraciones de Cinorg aumentan hacia la base de la sección, reflejando la litología ubicada en esta zona, la cual está compuesta por calizas y calizas margosas.

## **6. RECOMENDACIONES**

Aplicar esta técnica en otras formaciones para demostrar su efectividad en el reconocimiento de las características del ambiente de sedimentación de las rocas madre.

Realizar análisis químicos a las muestras, como ICP para determinar las concentraciones de U, Th y K en las muestras, para complementar el conocimiento de las mismas en cuanto a las concentraciones de los elementos radioactivos en ellas, con el fin de validar los resultados obtenidos en campo.

Realizar análisis de FRX para conocer mejor la composición elemental de las muestras de la Formación San Antonio.

Realizar mayor cantidad de análisis de DRX en las muestras de la formación, para conocer mejor la composición mineralógica de las muestras de la Formación San Antonio.

Utilizar el análisis de activación neutrónica para conocer la concentración de U en las muestras de la Formación San Antonio.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams J. S. and Weaver C. E. 1958. Thorium to Uranium ratio as indicator of sedimentary processes: examples of concept of geochemical facies. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 42, 387-430.
- Alberdi, M. and Lafargue, E. 1993. Vertical variations of organic matter content in Guayuta Group (upper Cretaceous) Interior Mountain belt eastern Venezuela. *Organic Geochemistry* 20, 425-436.
- Banner J.L. 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 65, 141–194
- Barrios, C., 2004. Estudio geoquímico de rocas de las formaciones Querecual y San Antonio (localidad tipo), estado Anzoátegui – Venezuela, mediante Microsonda Electrónica (EPMA). Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geoquímica, Escuela de Química, Universidad Central de Venezuela.
- Bloxam T. W. 1964. Uranium, thorium, potassium and carbon in some black shales from the South Wales coalfield. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 3, 1177 – 1185.
- Chaker Raddadi M., Arnaud Vanneau A., Poupeau G., Carrio-Schaffhauser E., Arnaud H., Rivera A. 2005. Interpretation of gamma-ray logs: The distribution of uranium in carbonate platform. *C. R. Geoscience* 337, 1457–1461.
- Doveton, J.H y Prenskey, S.E. 1992. Geological Applications of wireline logs: a synopsis of Developments and Trends. *The log analyst* 33, 286-303.
- Dow, W.G. 1977. Kerogen studies and geological interpretations. *Journal of Geochemical Exploration* 7, 79—99.
- Durand, B. 1980. Kerogen, Insoluble Organic Matter from Sedimentary Rocks. Editions Technip, Paris.
- Dypvik H., Harris N. B., 2001. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr+Rb)/Sr ratios. *Chemical Geology* 181, 131–146.
- Einsele G. 2000. Sedimentary Basin. Evolution, Facies and Sediment Budget, segunda ed. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Enghag P., 2004. Encyclopedia of the elements: technical data, history, processing, applications, tercera ed. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemania.

- Ellis, D.V. 2007. Well logging for earth scientists: Elsevier, segunda ed. Springer, New York.
- Fairbridge R. W. 1972. The Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Sciences, volumen IV. Downen, Hutchinson & Ross, Inc, New York.
- Fisher, Q.J., Wignall, P.B. 2001. Palaeoenvironmental controls on the uranium distribution in an Upper Carboniferous black shale (*Gastrioceras listeri* Marine Band) and associated strata; England. *Chemical Geology* 175, 605-621.
- Fujino, O., 2000. Determination of Thorium in apatite minerals by solvent extraction-ICP-AES. Research Institute for Science and Technology, Kinki University, Kowakae, Higashi-Osaka 577-8502.
- Galindo, C., Mougin, L., Fakhi, S., Nourreddine, A., Lamghari, A., Hannache, H. 2007. Distribution of naturally occurring radionuclides (U, Th) in Timahdit black shale (Morocco). *Journal of Environmental Radioactivity* 92, 41-54.
- Ghasemi-Nejad E., Poureslami Ardakani E., Ruffell A., 2010. Palaeoclimate change recorded in Upper Cretaceous (Albian–Cenomanian) Kazhdumi Formation borehole spectral Gamma-Ray Logs, South Pars Gas field, Persian Gulf. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291, 338–347.
- Glennie K.W. 1998. *Petroleum Geology of the North Sea: Basic Concepts and Recent Advances*, cuarta ed. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK.
- Gómez, M. 2006. Caracterización geoquímica y radiactiva de la Formación Querecual, en su localidad tipo. Trabajo Especial de Grado. Especialización en Geoquímica de Hidrocarburos. Postgrado en Geoquímica. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.
- González de Juana C., Iturralde J. y Picard X. 1980. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*, tomo II. Ediciones Foninves, Caracas.
- Gornitz V., 2009. *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, Springer, Netherland.
- Gluyas J., Swarbrick, R. 2004. *Petroleum Geoscience*. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK.
- Heras J. C., 2010. Caracterización mineralógica y magnética de muestras de rocas de la Formación San Antonio, Edo. Anzoategui, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo.
- Hesse, P. R. 1971. *A Textbook of Soil Chemicals Analysis*. John Murray Publishers, London.

- Hunt, J. 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. New York. W. H. Freeman and Company, 617 p.
- J. R. Associates Civil and Environmental Geophysics. [Página web en línea]. Disponible: <http://www.greatgeophysics.com/logginginfo.html> [Consulta: 2010, Marzo].
- Jerden J.L., Sinha A.K., Zelazny L. 2003. Natural immobilization of uranium by phosphate mineralization in an oxidizing saprolite–soil profile: chemical weathering of the Coles Hill uranium deposit, Virginia. *Chemical Geology* 199, 129– 157.
- Jones B and Manning D. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretations of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology* 111, 111 – 129.
- Killops, S.D, Killops V.J. 1993. *An Introduction to Organic Geochemistry*. John Wiley & Sons, New York.
- Klein, C., Hurlbut, C.S., 1998. *Manual de Mineralogía*, volumen 2, cuarta ed. Editorial Reverté S.A., España.
- Klinkhammer G.P., y Palmer M.R. 1991. Uranium in the oceans: Where it goes and why. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 1799-1806.
- Léxico Estratigráfico de Venezuela. [Página web en línea]. Disponible: <http://www.pdvsa.lexico.com> [Consulta: 2010, Marzo].
- López L., 1997. Comparación de evidencias geológicas y geoquímicas de migración primaria en rocas fuentes carbonáticas y lutíticas. *Revista Latino Americana de Geoquímica Orgánica* 3, 19 – 32.
- López, L., Gómez, M.C., Lo Mónaco, S., Lugo, P., Truskowski, I. y Rey, O., 2010. “Use of gamma ray logs in source rocks characterization, Eastern Venezuelan Basin. 12 Congreso Latinoamericano de Geoquímica Orgánica. Montevideo –Uruguay.
- Lugo, P., 2002. Distribución de elementos mayoritarios y traza en rocas del Grupo Guayuta (formaciones Querecual y San Antonio): Implicaciones Paleoambientales. Trabajo de Grado de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.
- McManus, J., Berelson, W.M., Klinkhammer, G.P., Hammond, D.E., Holm C. 2004. Authigenic uranium: relationship to oxygen penetration depth and organic carbon rain. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 95-108.



- McSween H., Richardson S., Uhle M., 2003. *Geochemistry. Pathways and Processes*, second ed. Columbia University Press. New York.
- Mineralienatlas, Fossilienatlas. [Página web en línea]. Disponible: <http://www.mineralienatlas.de> [Consulta: 2010, Junio].
- Milson J. 2003. *Field Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd. England.
- Munsell. 1973. *Munsell Color Chart*. School of Environmental Science, University of Bradford Baltimore, Maryland.
- Natural Resources Canada. [Página web en línea]. Disponible: [http://gsc.nrcan.gc.ca/gamma/hist\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/gamma/hist_e.php) [Consulta: 2010, Marzo].
- Parnaud, F., Gou, I., Pascual, J., Truskowski, I., Gallango, O., Passalacqua, H. y Roure, F. 1995. Petroleum geology of the central part of the Eastern Venezuelan basin. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*. Memoir 62, 762.
- Peters, K. E., Walters, C. C., Moldowan, J. M. 2005. *The Biomarker Guide. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History*, volumen 2, segunda ed. University Press, Cambridge, UK.
- Rey, O. 2004. *Cicloestratigrafía del EAO3: Controles climáticos y cíclicos sobre la sedimentación del Santoniense, quebrada San Miguel, estado Mérida*. Facultad de Ingeniería, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
- Rosales, H., 1967. *Geología del area Barcelona – Río Querecual (estado Anzoátegui) (Excursión)*. Creole Petroleum Corporation. Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo.
- Schnyder J., Ruffell A., Deconinck J., Baudin F. 2006. Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic–early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.) *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 22, 303-320.
- Skoog D., Holler J. y Nieman T. 2001. *Principios de Análisis Instrumental*, quinta. ed. Mc Graw Hill, Madrid.
- Talukdar S., Gallango O., Ruggiero A. 1988. Generation and migration of oil in the Maturin Subbasin, Eastern Venezuelan basin. *Organic Geochemistry* 13, 537-547.
- Tissot, B. P. y Welte, D. H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*, segunda ed. Springer – Verlag, New York.

Truskowski I. (2006) Calibración bioestratigráfica y correlación con datos geoquímicos de la Formación Querecual en su localidad tipo. Trabajo Especial de Grado. Especialización en Geoquímica de Hidrocarburos. Postgrado en Geoquímica. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.

Tzortzisa M., Tsertosa H., Christofides S., Christodoulides G., 2003. Gamma – ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks. *Radiation Measurements* 37, 221 – 229.

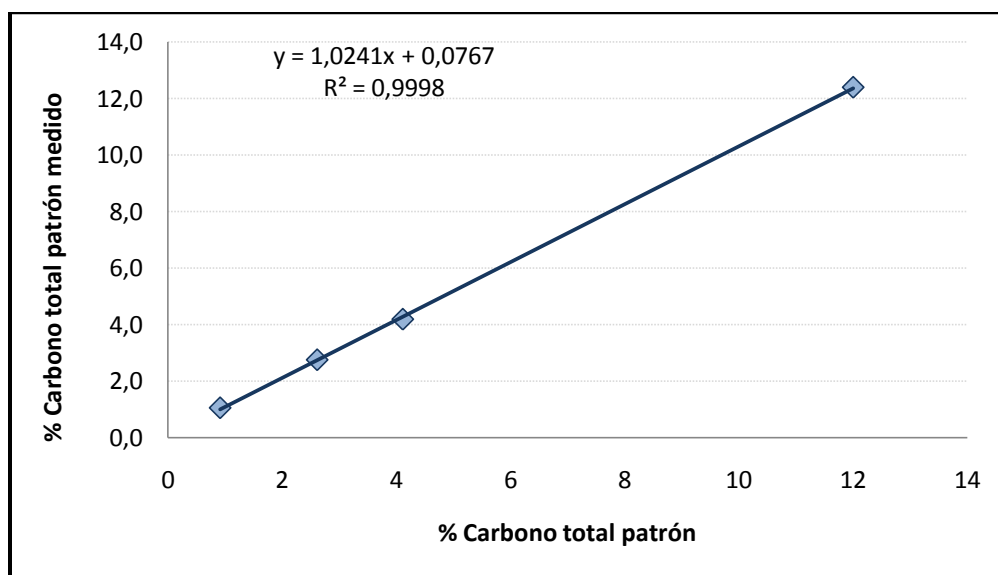
Vandenbroucke M., Largeau C. 2007. Kerogen origin, evolution and structure. *Organic Geochemistry* 38, 719-833.

WEC. (1997) Evaluación de Pozos. Schlumberger, Well Evaluation Conference.

## 8. APÉNDICES

**Apéndice 1:** Patrones y curva de calibración para el Ct realizada con el LECO:

Patrón		% Carbono total
502-062	C=0,91	1,1
502-308	C=2,61	2,8
502-320	C=4,11	4,2
501-034	C=12	12,4



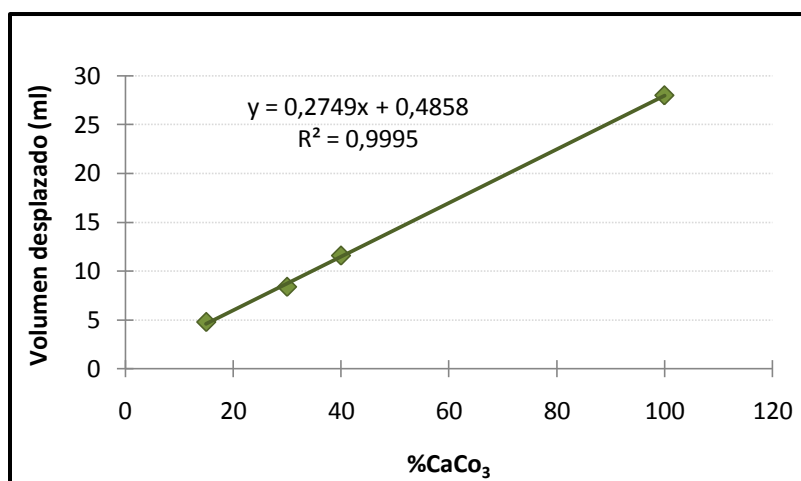
**Apéndice 2:** Curva de calibración para el Cinorg y fórmulas para determinar la concentración de Cinorg en las muestras

$$(1) \text{gCaCO}_3 \text{ en la muestra} = \frac{(\text{masa de CaCO}_3 \text{ puro} * \text{vol CO}_2 \text{ desplazado})}{\text{vol CO}_2 \text{ desplazado por CaCO}_3}$$

$$(2) \% \text{CaCO}_3 \text{ en la muestra} = \frac{(\text{gCaCO}_3 \text{ en la muestra} * 100)}{\text{g iniciales de la muestra}}$$

$$(3) \% \text{Cinorg} = \frac{(\% \text{CaCO}_3 * \text{Masa Atómica del C})}{\text{Masa Molecular}}$$

%Cinorg	Cinorg (g)	V desplazado
15	1,8	4,4
	1,8	5,2
	1,8	4,8
30	3,6	8,2
	3,6	8,4
	3,6	8,6
40	4,8	11,4
	4,8	11,4
	4,8	12
100	12	28
	12	-
	12	-



**Apéndice 3:** Resultados radioactivos (totales y discriminados) y geoquímicos de la localidad tipo de la Formación San Antonio.

Muestras recolectadas en la seccion tipo de la formación San Antonio (Mayo/2008)	Espesor (m)	Espesor Acumulado(m)	Total (Medido y derivado)	K (cps) m+d	U (cps) m+d	Uaut	Th (cps) m+d	Th/K	Th/U	Ctotal (%)	Corg (%)	Cinorg (%)	%CaCO <sub>3</sub>	Bitumen (ppm)	Bitumen/COT (%)	Escala de colores según la tabla de Munsell		Clasificación de Calizas (Rey,2004) >80% Calizas, 80-60: Calizas margosas, >60% Margas
ARQKSA-1a,1b (GR promedio)	3,5	3,50	1039	43,5	35,5	28	23,5	0,540	0,662	10,2	1,2	9,0	88,45	222	1,89	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas lam
ARQKSA-2	1,6	5,10	1085	49	42	33	26	0,531	0,619	6,2	1,8	4,4	71,01	84	0,47	10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	Calizas margosas lam
ARQKSA-3	4,1	9,20	1388	66	48	39	28	0,424	0,583	9,5	0,7	8,8	92,15	173	2,31	10YR 5/1	Gris	Calizas
ARQKSA-4	2,2	11,40	1023	48	38	29	26	0,542	0,684	6,9	3,0	3,9	56,25	362	1,20	5YR 3,5/1	Gris oscuro - Gris muy oscuro	Margas lam
ARQKSA-5	2	13,40	1010	48	39	30	26	0,542	0,667	4,5	2,4	2,0	45,24	233	0,95	10YR 4/1	Gris oscuro	Margas lam
ARQKSA-6	3,9	17,30	902	41	30	22	24	0,585	0,800	5,8	2,6	3,2	55,78	139	0,54	10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	Margas lam
ARQKSA-7	1,75	19,05	1131	50	33	25	24	0,480	0,727	5,0	3,1	2,0	39,08	153	0,50	10YR 4/1	Gris oscuro	Margas lam
ARQKSA-8	5,05	24,10	1201	48	41	32	26	0,542	0,634	5,3	1,9	3,5	65,20	91	0,49	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas
ARQKSA-9	1,05	25,15	1224	60	52	42	31	0,517	0,596							-	-	Lutitas-areniscas
ARQKSA-10	0,5	25,65	830	41	26	19	22	0,537	0,846							-	-	Areniscas
ARQKSA-11	1,05	26,70	1372	60	46	36	31	0,517	0,674							-	-	Lutitas

<b>ARQKSA-12</b>	2,8	29,50	1724	74	82	63	57	0,770	0,695	7,8	1,9	6,0	76,02	192	1,02	10YR 5/1	Gris	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-13</b>	2	31,50	2626	125	134	103	94	0,752	0,701	7,7	1,3	6,4	83,10	170	1,30	5Y 4/1	Gris oscuro	Calizas mas
<b>ARQKSA-14</b>	0,55	32,05	1696	77	63	49	42	0,545	0,667	3,5	2,2	1,3	38,13	149	0,68	10YR 4/1	Gris oscuro	Margas lam
<b>ARQKSA-15</b>	2,1	34,15	2422	120	84	62	65	0,542	0,774	7,8	1,6	6,2	79,75	105	0,67	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-16</b>	2	36,15	1420	69	57	43	41	0,594	0,719	6,6	2,4	4,2	63,74	88	0,37	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-17</b>	1,95	38,10	1344	63	52	37	45	0,714	0,865	5,4	2,8	2,6	48,83	134	0,49	10YR 3,5/1	Gris oscuro - Gris muy oscuro	Margas lam
<b>ARQKSA-18</b>	1,37	39,47	1185	56	53	42	34	0,607	0,642	9,3	2,0	7,3	78,69	178	0,90	10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-19</b>	1,43	40,90	1683	78	67	53	41	0,526	0,612	8,7	2,1	6,6	75,84	73	0,35	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas Margosas lam
<b>ARQKSA-20</b>	1,75	42,65	1131	52	36	27	27	0,519	0,750	7,3	2,8	4,5	61,84	89	0,32	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-21</b>	1	43,65	1454	65	44	31	40	0,615	0,909	7,7	2,5	5,1	66,91	115	0,45	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-22</b>	2,17	45,82	991	44	33	23	31	0,705	0,939	7,0	1,9	5,2	73,39	97	0,52	10YR 4/1	Gris oscuro	Lutitas calc
<b>ARQKsa-23b</b>	0,2	46,02	1673	80	56	43	40	0,500	0,714	8,5	1,9	6,5	76,26	180	0,95	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas lam
<b>ARQKsa-23a</b>	0,25	46,27	1405	66	48	40	25	0,379	0,521	8,5	2,2	6,3	74,48	194	0,89	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas
<b>ARQKsa-23c</b>	2	48,27	830	36	24	17	22	0,611	0,917							-	-	Caliza arenosa lam
<b>ARQKSA-24</b>	6,7	54,97	1207	64	53	39	43	0,672	0,811	8,8	1,4	7,4	83,64	128	0,89	10YR 5/1	Gris	Calizas mas
<b>ARQKSA-25</b>	9,97	64,94	1126	50	40	30	29	0,580	0,725	9,1	2,1	7,0	76,69	164	0,78	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas lam
<b>ARQKSA-26</b>	10,02	74,96	1307	56	42	29	38	0,679	0,905	10,8	2,3	8,5	78,66	179	0,78	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas mas

<b>Cubierto</b>	2	76,96														10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	cubierto
<b>ARQKSA-27</b>	2,56	79,52	1628	75	52	39	40	0,533	0,769	8,9	1,6	7,3	82,19	205	1,29	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas mas
<b>ARQKSA-28</b>	3,7	83,22	1646	78	54	40	41	0,526	0,759	11,1	2,8	8,3	74,89	250	0,90	10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	Calizas Margosas mas
<b>ARQKSA-29</b>	0,2	83,42	1006	35	31	22	26	0,743	0,839	9,9	2,7	7,1	72,39	196	0,72	10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-30</b>	3,7	87,12	827	31	27	18	26	0,839	0,963	10,3	1,9	8,4	81,44	230	1,20	10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	Calizas mas
<b>ARQKSA-31</b>	3,36	90,48								11,4	2,4	9,0	79,19	194	0,82	10YR 4/1	Gris oscuro	Calizas margosas mas
<b>ARQKSA-32</b>	4	94,48	1068	60	40	31	28	0,467	0,700	6,9	3,8	3,1	44,92	227	0,59	10YR 4/1	Gris oscuro	Margas mas
<b>ARQKSA-33</b>	1,23	95,71	1391	70	57	43	42	0,600	0,737	8,1	3,6	4,5	55,45	176	0,49	10YR 5/1	Gris	Margas mas
<b>ARQKSA-34</b>	2	97,71	557	26	13	8	14	0,538	1,077	4,9	2,0	2,9	59,27	103	0,52	5Y 3/1	Gris muy oscuro	Areniscas
<b>ARQKSA-35</b>	4,7	102,41	1926	86	68	52	47	0,547	0,691	6,8	4,0	2,8	41,49	270	0,68	5YR 2,75/1	Gris muy oscuro - Negro	Margas mas
<b>ARQKSA-36</b>	12	114,41	1039	56	39	29	30	0,536	0,769	6,9	5,7	1,3	18,09	245	0,43	-	-	Margas mas
<b>ARQKSA-37</b>	12,1	126,51	760	21	15	11	13	0,619	0,867							-	-	Lutitas
<b>ARQKSA-38</b>	11	137,51	628	28	21	15	19	0,679	0,905							10YR 3/1	Gris muy oscuro	Areniscas
<b>ARQKSA-39</b>	8,16	145,67	2223	107	85	63	65	0,607	0,765	9,4	4,6	4,8	51,17	200	0,44	5Y 4/1	Gris oscuro	Margas mas
<b>ARQKSA-40</b>	7	152,67	1892	92	63	47	47	0,511	0,746	6,0	3,5	2,5	42,37	113	0,33	10YR 7/1	Gris claro	lutitas calc
<b>ARQKSA-41</b>	1,3	153,97	679	31	23	16	21	0,677	0,913	3,3	2,5	0,8	25,16	46	0,19	10YR 4/1	Gris oscuro	Areniscas calc
<b>ARQKSA-42</b>	1,8	155,77	1266	59	46	33	38	0,644	0,826	8,0	6,8	1,3	15,92	147	0,22	10YR 8/1	Blanco	lutitas calc
<b>ARQKSA-43</b>	1	156,77	563	26	20	15	14	0,538	0,700	2,7	1,5	1,2	45,76	67	0,46	10YR 4,5/1	Gris - Gris oscuro	Areniscas calc
<b>ARQKSA-44</b>	0,8	157,57	1311	60	45	30	44	0,733	0,978	4,4	2,7	1,7	38,23	257	0,95	10YR 4/1	Gris oscuro	Lutitas calc

<b>ARQKSA-45</b>	3,4	160,97	1357	74	42	28	41	0,554	0,976	7,3	5,7	1,5	21,17	109	0,19	10YR 4/1	Gris oscuro	Margas
<b>ARQKSA-46</b>	0,6	161,57	1317	64	50	37	39	0,609	0,780	3,2	2,9	0,3	8,18	141	0,48	10YR 4/1	Gris oscuro	lutitas poco calc
<b>ARQKSA-47</b>	0,6	162,17	2237	110	88	68	60	0,545	0,682	9,5	8,3	1,2	12,64	131	0,16	10YR 8/1	Blanco	Margas
<b>ARQKSA-48</b>	2,47	164,64	538	23	17	11	18	0,783	1,059	2,2	0,9	1,3	57,88	40	0,43	10YR 4/1	Gris oscuro	Areniscas calc
<b>ARQKSA-49</b>	0,5	165,14	1099	56	35	22	40	0,714	1,143	3,2	2,5	0,7	23,18	145	0,59	-	-	lutitas calc
<b>ARQKSA-50</b>	9,7	174,84	608	32	27	20	21	0,656	0,778							-	-	Areniscas
<b>ARQKSA-51</b>	9,7	184,54	455	25	22	17	14	0,560	0,636							10YR 3/1	Gris muy oscuro	Areniscas
<b>ARQKSA-52</b>	5	189,54	1619	74	51	36	44	0,595	0,863	7,3	6,0	1,3	17,92	328	0,55	10YR 4/1	Gris oscuro	lutitas calc
<b>ARQKSA-53</b>	7,8	197,34	974	52	34	24	31	0,596	0,912	8,5	4,7	3,8	44,54	102	0,22	-	-	lutitas calc mas y lam
<b>ARQKSA-54</b>	5,7	203,04	588	28	21	14	20	0,714	0,952							-	-	Areniscas
<b>ARQKSA-55</b>	1,5	204,54	2352	109	88	65	68	0,624	0,773							-	-	Lutitas
<b>ARQKSA-56</b>	0,22	204,76	1142	50	40	30	30	0,600	0,750							-	-	Areniscas
<b>ARQKSA-57</b>	2,07	206,83	1785	94	62	45	50	0,532	0,806							10YR 3/1	Gris muy oscuro	Caliza sin muestra
<b>ARQKSA-58</b>	0,8	207,63	1423	78	49	33	48	0,615	0,980	5,6	4,0	1,6	28,18	455	1,14	10YR 3/1	Gris muy oscuro	lutitas calc
<b>ARQKSA-59</b>	0,8	208,43	1299	65	38	26	35	0,538	0,921	7,2	5,9	1,3	18,14	403	0,68	-	-	lutitas calc
<b>ARQKSA-60</b>	0,94	209,37	619	23	19	13	17	0,739	0,895							10YR 4/1	Gris oscuro	Areniscas
<b>ARQKSA-61</b>	10,55	219,92	1184	71	42	32	29	0,408	0,690	10,1	8,6	1,5	15,23	1031	1,20	-	-	lutitas calc
<b>ARQKSA-62</b>	7,8	227,72	414	16	14	9	15	0,938	1,071							10YR 3/1	Gris muy oscuro	Areniscas
<b>ARQKSA-63</b>	3,66	231,38	2542	123	106	81	75	0,610	0,708	5,0	4,6	0,4	8,06	676	1,48	-	-	lutitas poco calc



<b>ARQKSA-64</b>	4	235,38	416	21	17	13	13	0,619	0,765							10YR 3,5/1	Gris oscuro - Gris muy oscuro	Areniscas
<b>Cubierto</b>	3	238,38														-	-	cubierto
<b>ARQKSA-65</b>	3	241,38	2252	112	81	58	68	0,607	0,840	8,2	7,2	1,0	12,56	306	0,43	-	-	lutitas calc
<b>Cubierto</b>	2,1	243,48														-	-	cubierto
<b>ARQKSA-66</b>	1,98	245,46	1300	69	51	38	39	0,565	0,765							-	-	Lutitas
<b>Cubierto</b>	0,3	245,76														-	-	cubierto
<b>ARQKSA-67</b>	1,2	246,96	1448	68	51	36	46	0,676	0,902							-	-	Lutitas
<b>ARQKSA-68</b>	2,3	249,26	2424	122	101	78	70	0,574	0,693							-	-	<i>Lutitas + diques de areniscas</i>
<b>ARQKSA-69</b>	0,9	250,16	482	22	15	12	9	0,409	0,600							-	-	Areniscas
<b>ARQKSA-70</b>	0,48	250,64	944	53	37	30	21	0,396	0,568							-	-	Lutitas masivas
<b>ARQKSA-71</b>	1,5	252,14	1795	89	61	44	50	0,562	0,820							-	-	Lutitas laminadas
<b>ARQKSA-72</b>	1,34	253,48	480	20	16	12	12	0,600	0,750							10YR 5/1	Gris	Areniscas
<b>Cubierto</b>	2,25	255,73														-	-	cubierto
<b>ARQKSA-73</b>	6,24	261,97	487	19	16	11	14	0,737	0,875							-	-	Areniscas
<b>Cubierto</b>	0,64	262,61														-	-	cubierto
	6,19	268,80														-	-	Areniscas
<b>Cubierto</b>	1,46	270,26														-	-	cubierto
<b>ARQKSA-74</b>	3,26	273,52	745	37	27	19	23	0,622	0,852							-	-	Lutitas
<b>ARQKSA-75</b>	0,49	274,01	457	24	15	10	16	0,667	1,067	2,1	1,6	0,5	24,60			-	-	Areniscas calc
<b>ARQKSA-76</b>	0,49	274,50														-	-	Lutitas

