

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA AFTA® (APATITE FISION TRACK ANALISIS) PARA LA EVALUACIÓN DE LA HISTORIA TERMAL Y EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE UN SECTOR DEL MACIZO DE SANTANDER

CARLOS ARTURO PIMENTEL TRUJILLO
CODIGO. 1993461



FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2009

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA AFTA® (APATITE FISION TRACK ANALISIS) PARA LA EVALUACIÓN DE LA HISTORIA TERMAL Y EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE UN SECTOR DEL MACIZO DE SANTANDER



CARLOS ARTURO PIMENTEL TRUJILLO
Proyecto de Grado para optar por el título de geólogo
Modalidad *Práctica Empresarial*



Tutor GEMS Ltda
Geol. Pedro Parra Mantilla

Director UIS.
Phd. Mario García Gonzáles

**FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2009**

AGRADECIMIENTOS

La culminación de esta práctica empresarial no hubiese sido posible sin el respaldo y apoyo técnico, económico y humano brindado por parte de la empresa GEMS Ltda, Mis más sinceros agradecimientos para todas esas personas que pusieron su granito de arena en el desarrollo de este trabajo. De igual forma quisiera expresar agradecimientos a la empresa GEOTRACK Internacional por llevar a cabo los análisis de laboratorio y por interesarse en desarrollar proyectos en Colombia, especialmente en Bucaramanga.

Profundos e infinitos agradecimientos para Pedro Parra, por sus sabias enseñanzas de maestro, por confiar en mis capacidades y sobre todo por permitirme hacer parte de la gran familia GEMS Ltda.

A Ian Duddy, por sus interesantes comentarios y aportes a este trabajo.

Al profesor Mario García por aceptar ser el director de este trabajo.

A la escuela de geología por la formación de alta calidad académica recibida durante toda la carrera y de la cual me siento orgulloso de haber sido egresado.

A mis compañeros Cesar Tarazona y Julián Vargas, también al geólogo Diego Díaz por su acompañamiento en la etapa de muestreo.

A mis padres, quiero agradecerles por enseñarme todos los valores de la vida y por estar siempre apoyándome con su paciente y tranquila espera. A toda mi familia les agradezco por su apoyo incondicional.

Estas palabras de agradecimiento no tendrían sentido y valor alguno, sin la bendición del Dios que está siempre a nuestro lado, gracias a Él, es posible que la armonía del universo se haga realidad.

Y para todas las personas que se me quedan en el tintero, les ruego me perdonen si no están en estas palabras, pero de algo quiero que estén completamente seguros, les agradezco todo el tiempo que compartieron conmigo.

DEDICATORIA

Es mi intención dedicar este trabajo a dos increíbles personas que desinteresada y amorosamente formaron la persona que ahora soy, a mis padres; que después de todo su esfuerzo pueden ver como empieza a tomar forma sus sueños. Por lo anterior es motivo de orgullo y alegría dedicar este trabajo a ustedes, Cecilia y Benigno.



*Con amor,
Carlos Arturo Pimentel Trujillo*



ABREVIATURAS UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO

AFTA®: (Apatite Fission Track Analysis)

BTT: (Borrado Total de las Trazas)

E.T.F: (Edad de las trazas de Fisión). Ecuación 1.

DTH: (Default Thermal History)

Ma: Millones de años

THR: (Thermal History Reconstruction)

TINT: (Track in Track)

TINCLE: (Track in Cleavage)

Nm: Nanómetro.

µm: Micrómetros

U²³⁸: Uranio 238

U²³⁵: Uranio 235



DEFINICION DE TERMINOS:

Annealing: Borrado Total de las Trazas de Fisión

Etching: Lavado con ácido para reabrir las trazas confinadas y/o superficiales.

Fisión: Es un tipo específico de desintegración nuclear.

Ionización. Es el proceso físico por el cual un átomo pierde o gana electrones, convirtiéndose de esta manera en iones positivos o negativos respectivamente.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS Y ANEXOS

RESUMEN

1. INTRODUCCION	1
2. PROYECTO DE LA ALIANZA GEMS LTDA Y GEOTRACK INTERNACIONAL	2
2.1 TÍTULO DEL PROYECTO	2
2.1.1 Objetivo General	2
2.1.1 Objetivos Específicos	2
2.2 PARTICIPACION EN EL PROYECTO	3
2.2.1 Objetivo General	3
2.2.2 Objetivos Específicos	3
3. JUSTIFICACION	5
4. MARCO GEOLOGICO REGIONAL	6
5. ESTRATIGRAFÍA REGIONAL	10
6. METODOLOGIA	12
6.1 Recopilación bibliográfica y análisis de la información Geológica	12
6.2 Campaña de muestreo	12
6.3 Análisis macroscópico de las muestras recolectadas para los análisis AFTA®	13
6.4 Resultado de los análisis de laboratorio	15
6.5 Integración de los resultados	16
6.6 Redacción de los reportes finales	17

7. LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO	18
7.1 Localización geográfica y rutas de muestreo	19
7.2 Localización geológica	20
8. MARCO TEORICO	21
8.1 Aspectos generales de las Trazas de Fisión	21
8.1.1 Ocurrencia Natural del Apatito	21
8.1.2 Características mineralógicas y cristalinas	23
8.1.3 Propiedades físicas del apatito	23
8.1.3 Química de elementos mayores y menores	24
8.2 Las trazas de fisión	25
8.3 Apatite Fission Track Analysis (AFTA®)	27
8.3.1 AFTA en el laboratorio	27
8.3.1.1 Proceso de etching	27
8.3.1.2 Medición de las trazas	27
8.3.1.3 Borrado total de las trazas de fisión (annealling)	28
8.3.2 Determinación de la edad	31
8.3.3 Estrategia para la interpretación	32
8.3.3.1 Interpretación de la Historia Termal de los Datos AFTA®	32
9. APLICACIONES DEL THR	35
9.1 AFTA® en la exploración mineral	35
9.2 Aplicación de afta en la geomorfología	36
9.3 AFTA® en la industria del petróleo	37
10. OTROS PALEOTERMOMETROS	39
10.1 Determinación de paleotemperaturas a partir de constituyentes inorgánicos.	39
10.1.1 Series de Transformación I/S	40
10.1.2 Inclusiones Fluidas	42
10.1.3 Termocronología (U-Th)/He	43

10.1.4 Determinación de paleotemperaturas a partir de constituyentes orgánicos	45
10.1.4.1 Reflectancia de la Vitrinita	46
10.1.4.2 Índice de Alteración de Conodontes (CAI)	48
11. ANALISIS Y RESULTADOS	50
11.1 Identificación de los Episodios Paleotermales	51
11.2 Reconstrucción de la historia termal para cada muestra seleccionada en este trabajo	55
12. CONCLUSIONES	61
13. RECOMENDACIONES	62
14. BIBLIOGRAFIA	63
15. ANEXOS	68



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio	7
Figura 2. Evolución tectónica sugerida para la Cordillera Oriental	9
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada para el área de estudio	14
Figura 4. Localización geográfica	18
Figura 5. Ubicación de la Transecta Valle Medio – Macizo de Santander	20
Figura 6. Grado de estabilidad de varios minerales pesados en la interacción con fluidos asociados con el enterramiento	22
Figura 7. Representación esquemática del modelo de pico explosivo, en la formación de trazas de fisión	26
Figura 8. Esquema en el que se resumen los pasos que se siguen en el laboratorio, para medir las trazas de fisión	29
Figura 9. Esquema ilustrativo de la historia termal de una Cuenca reconstruida con la ayuda de termocronómetros	38

Figura 10. Diagrama esquemático de una curva de paleotemperatura hipotética medida a partir de varias técnicas con componentes inorgánicas comúnmente empleadas en la determinación de las máximas paleotemperaturas 40

Figura 11. Correlación entre las reacciones diagenéticas y la temperatura 41

Figura 12. Inclusiones fluidas primarias adecuadas para la determinación de máximas paleotemperaturas 43

Figura 13. Temperaturas de cierre para varios termocronómetros 44

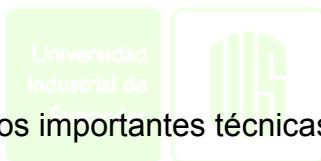


Figura 14. Correlación de dos importantes técnicas para determinar paleotemperaturas e índices de maduración. 46

Figura 15. Comparación de varios modelos cinéticos de reflectancia de Vitrinita que relacionan tiempo y temperatura. 47

Figura 16. Resumen de los episodios termales registrados en las muestras cretácicas y más antiguas. 53

Figura 17. Resumen de los episodios termales registrados en las muestras Terciarias y más recientes 54

Figura 18. Reconstrucción de la historia Termal del Neis de Bucaramanga 56

Figura 19. Reconstrucción de la historia Termal de la formación Tambor 57

Figura 20. Reconstrucción de la historia Termal de la Terraza de Bucaramanga. 58

Figura 21. Reconstrucción de la historia Termal de la formación Lisama 59

Figura 22. Reconstrucción de la historia Termal de la formación Bocas 60

Figura 23. Reconstrucción de la historia Termal de la formación Silgará 61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Índices de Alteración en Conodontes y sus correspondientes Paleotemperaturas. 49

Tabla 2. Datos AFTA® obtenidos en los laboratorios de Geotrack Internacional 50

Tabla 3. Datos obtenidos del modelamiento AFTA®, empleando software propietario de la empresa Geotrack Internacional. 55



LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Descripción macroscópica de las muestras recolectadas en el estudio.

Anexo 2. Catálogo de afloramientos de las secciones en las cuales se tomaron muestras.

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE LA TÉCNICA AFTA® (APATITE FISION TRACK ANALISIS) PARA LA EVALUACIÓN DE LA HISTORIA TERMAL Y DE LA EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE UN SECTOR DEL MACIZO DE SANTANDER *

AUTOR:

CARLOS ARTURO PIMENTEL TRUJILLO **

Palabras Clave: Análisis de Trazas de Fisión en Apatitos AFTA®, Reconstrucción de Historias Termal THR, Paleotemperatura máxima, Cuenca del Valle Medio del Magdalena, Macizo de Santander.

El análisis de trazas de fisión en Apatito es un método que permite obtener información sobre la historia termal de los sedimentos. En secciones estratigráficas que han estado sometidas a mayores temperaturas en el pasado, **AFTA®** provee información sobre la magnitud y la edad de los calentamientos máximos y a partir de este, el tiempo para el cual la sección comenzó a enfriarse.

En este trabajo se muestra la aplicación de la estimación de máximas paleotemperaturas en la reconstrucción de la Historia Termal de dos sectores de interés económico y/o científico para el departamento de Santander, como parte del proyecto de evaluación del potencial hidrocarburífero de la cuenca de cordillera, y que la empresa GEMS Ltda ha llevado en ejecución desde el 2007 con la finalidad de descubrir eventos termal en la secuencia geológica preservada que va desde el precámbrico hasta el cuaternario en el área del macizo de Santander, cordillera oriental (Colombia), usando datos **AFTA®**.

Los datos **AFTA®** han revelado tres eventos post-deposicionales para los sedimentos cretácicos y más antiguos los cuales han experimentado paleotemperaturas mucho más altas que las temperaturas actuales desde su depositación, con tres intervalos de enfriamiento observables: 65 a 25 Ma; 25 a 15 Ma; 12 a 5 Ma. Por otra parte los sedimentos terciarios y cuaternarios muestran que estos han sido sometidos a temperaturas inferiores que las que han sido expuestas los sedimentos cretácicos y más antiguos, adicionalmente presentan más de un episodio de enfriamiento para un mismo periodo de tiempo, lo implica más de un evento geológico de levantamiento para este sector de la cordillera.

* Trabajo de Grado, Modalidad Práctica Empresarial

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica, Escuela de Geología, Director: Geólogo Pedro Parra Mantilla, GEMS Ltda - Bucaramanga. Geólogo *Phd* Mario García G. – UIS.

ABSTRACT

TITLE OF THESIS: *APPLICATION OF AFTA® FOR THERMAL HISTORY APPRAISSAL AND TECTONIC EVOLUTION IN A SECTOR OF SANTANDER MASSIF AREA.**

AUTHOR:

CARLOS ARTURO PIMENTEL TRUJILLO **

Keywords: Apatite fission track analysis (AFTA®), Thermal Reconstruction History (THR), maximum palaeotemperatures, Middle Magdalena Basin, Santander Massif.

Apatite fission track analysis (AFTA®) is a method of obtaining thermal history information in sediments. In sections that have been hotter in the past, AFTA® provides estimates of maximum palaeotemperatures, and the time at which a sedimentary section began cooling from maximum palaeotemperatures.

In this work, definition of the major facets of thermal history based on directly measurable parameter in two areas of economic interest for Santander State in Colombia was made, as part of a project that GEMS Ltda is achieving since 2007, whose goal is finding clues about thermal history for geologic Sequence lapse since Precambrian to Quaternary in Santander Massif area, using AFTA® data.

Here AFTA® data have revealed three definite post-depositional thermal episodes in individual samples from Cretaceous and older sequences along the Bucaramanga Transect, Colombia, which have been subjected to paleotemperatures much higher than the present outcrop temperatures at some time after deposition, therefore, cooling is interpreted to have commenced within the following intervals 65 a 25 Ma; 25 a 15 Ma; 12 a 5 Ma. In contrast, apatite fission track ages of all Tertiary and Quaternary samples have been subjected to post-depositional temperatures lower than experienced by the Cretaceous and older samples, besides, more than one cooling episode may have occurred This uncertainty should be borne in mind when integrating the results with additional geological constraints.

* Practice in GEMS Ltda - Bucaramanga

** Department of physicochemical, School of Geology. Directors: Geologist. Pedro ParMantilla, GEMS Ltda – Bucaramanga. Geologist Phd Mario García Gonzáles, UIS

1. INTRODUCCION

El presente trabajo realizado en la modalidad de práctica empresarial, es auspiciado por las empresas GEMS Ltda y Geotrack Int, con la intención de capacitar y entrenar a nuevos profesionales en el campo de la interpretación de los datos termogeocronológicos que resultan del modelamiento de las trazas de fisión, incluyendo a un estudiante practicante en el proyecto empresarial que desde el 2007, ingresó al portafolio de proyectos que se han venido desarrollando desde el 2005 en la cuenca de cordillera empleando la técnica de AFTA® con la finalidad principal de obtener nueva información sobre el potencial hidrocarburífero de este sector de Colombia.

La evolución de la cordillera Oriental de Colombia es una de las áreas de mayor interés geológico para exploracionistas y científicos, por su compleja configuración tectónica y porque el proceso orogénico que ocasionó el levantamiento de esta cordillera, aún hoy presenta una amplia controversia frente a su desarrollo tectónico.

Con la ayuda de la técnica AFTA® que emplea el mineral de Apatito para determinar las paleotemperaturas máximas y edades de los máximos calentamientos sucedidos en alguna época de tiempo geológico, se obtuvieron resultados que sugieren nueva información para mejorar el modelo evolutivo regional de esta importante región en los Andes colombianos.

2. PROYECTO DE LA ALIANZA GEMS LTDA Y GEOTRACK INTERNACIONAL

2.1 TITULO DEL PROYECTO

RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA TERMAL DE LAS SECUENCIAS GEOLOGICAS COMPRENDIDAS DESDE EL PRECÁMBRICO HASTA EL CUATERNARIO DEL MACIZO DE SANTANDER, CORDILLERA ORIENTAL (COLOMBIA), USANDO DATOS AFTA®

2.1 .1 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO:

Proponer una historia paleotermal para la parte Norte del Macizo de Santander, que permita mejorar la información necesaria para establecer la evolución tectono-estratigráfica de la región.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Establecer las máximas temperaturas y el tiempo en que empezaron a ocurrir los enfriamientos en las formaciones geológicas que están definidos en la transecta Valle Medio del Magdalena y Cordillera.
- Reconocer los principales episodios térmicos y enfrentarlos con la estratigrafía presente para fortalecer el modelo tectono-estratigráfico de la región.

- Proponer una discusión sobre los gradientes paleotermales y los posibles episodios que los generaron.
- Preparar nuevos profesionales en el conocimiento de la técnica AFTA®, para la determinación de historias paleotermales, cuya información es gran importancia en la exploración de hidrocarburos y la prospección mineral.
- Elaborar una publicación de dominio público con los resultados finales de este estudio.

2.2 PARTICIPACION EN ESTE PROYECTO

2.2.1 OBJETIVO GENERAL



Adquirir conocimientos y habilidades sobre la aplicación del análisis de huellas de fisión en apatito (AFTA®) en la reconstrucción de la historia paleotermal de un área de interés geológico.

2.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Recopilar y analizar la información geológica y de estudios AFTA® disponibles para el área objetivo del presente estudio.
2. Realizar un muestreo sistemático y georeferenciado de la sección estratigráfica preservada en superficie, siguiendo la transecta Valle Medio del Magdalena y Cordillera.

3. Conocer los aspectos técnicos esenciales para realizar un Modelamiento AFTA® y los resultados del mismo.
4. Integrar los resultados de los análisis AFTA® con la información geológica del área de interés.
5. Participar en la preparación de una publicación con los resultados obtenidos en el presente estudio.

3. JUSTIFICACION

El análisis de la trazas de fisión en apatitos (AFTA®) es una robusta herramienta, cuyos resultados son de gran utilidad en la prospección de minerales e hidrocarburos, que ha sido muy poco divulgada y poco conocida en el país, por lo que muy pocos profesionales en Colombia tienen la preparación para interpretar los datos AFTA®.

Más allá de la divulgación de la técnica y de contribuir con la generación de nuevos datos para el entendimiento de la geología colombiana, nuevos profesionales se han preparado en el análisis de los resultados del modelamiento AFTA®, junto a ellos la participación en el proceso de entrenamiento del autor de esta tesis de grado realizada en la modalidad de práctica empresarial bajo la supervisión del tutor por parte de la empresa GEMS Ltda. Pedro Parra Mantilla y del experto internacional Ian Duddy.

El estudio se ha realizado sobre la secuencia de rocas expuesta en la transecta que parte desde el sector Oriental del sinclinal de Nuevo Mundo en el Valle Medio del Magdalena hasta el Macizo de Santander y en cuya extensión se encuentran secciones estratigráficas preservadas de rocas de todas las edades geológicas y de diversa naturaleza, lo cual hace de este sector un laboratorio natural para reconstruir historias termales.

4. MARCO GEOLOGICO REGIONAL Y EVOLUCION TECTONICA

Colombia está ubicado en la esquina Noroccidental de Suramérica en una zona de alta complejidad geológico donde convergen tres placas tectónicas oceánicas, la placa del Pacífico, Nazca y Caribe las cuales están subsidiendo por debajo de la placa Suramericana y se encuentra dividida en tres regiones geológica mayores, el Sistema de los Andes, la cuenca de los Llanos y el Escudo cratónico de la Guyana.

El sistema Andino de Colombia comprende tres cadenas montañosas (Las cordilleras Oriental, central y Occidental), y se encuentran separadas entre si por las cuencas Intramontanas del Cauca y Valle medio del Magdalena. (**Fig 1**) y la naturaleza de las rocas varía entre estas regiones y se ha venido moldeando desde el Triásico producto de la interacción de la placa continental de Suramérica con las placas oceánicas de Farallón-Nazca y Caribe, durante múltiples episodios de colisión, acreción y subducción, las cuales dieron origen a varios arcos de islas. (Dengo and Covey, 1993).

El margen occidental de Suramérica tenía características de margen pasivo en el Paleozoico y sedimentos marinos someras se depositaron en una cuenca supracratónica localizada entre el escudo de la Guyana y la antigua Cordillera central. Estas condiciones se mantuvieron hasta finales del Triásico y comienzos del Jurásico, tiempo en el que se empezó la ruptura de Gondwana y el comienzo de la apertura del Mar Caribe. (Mojica and Villaroel (1987) en Gélves , 2006)

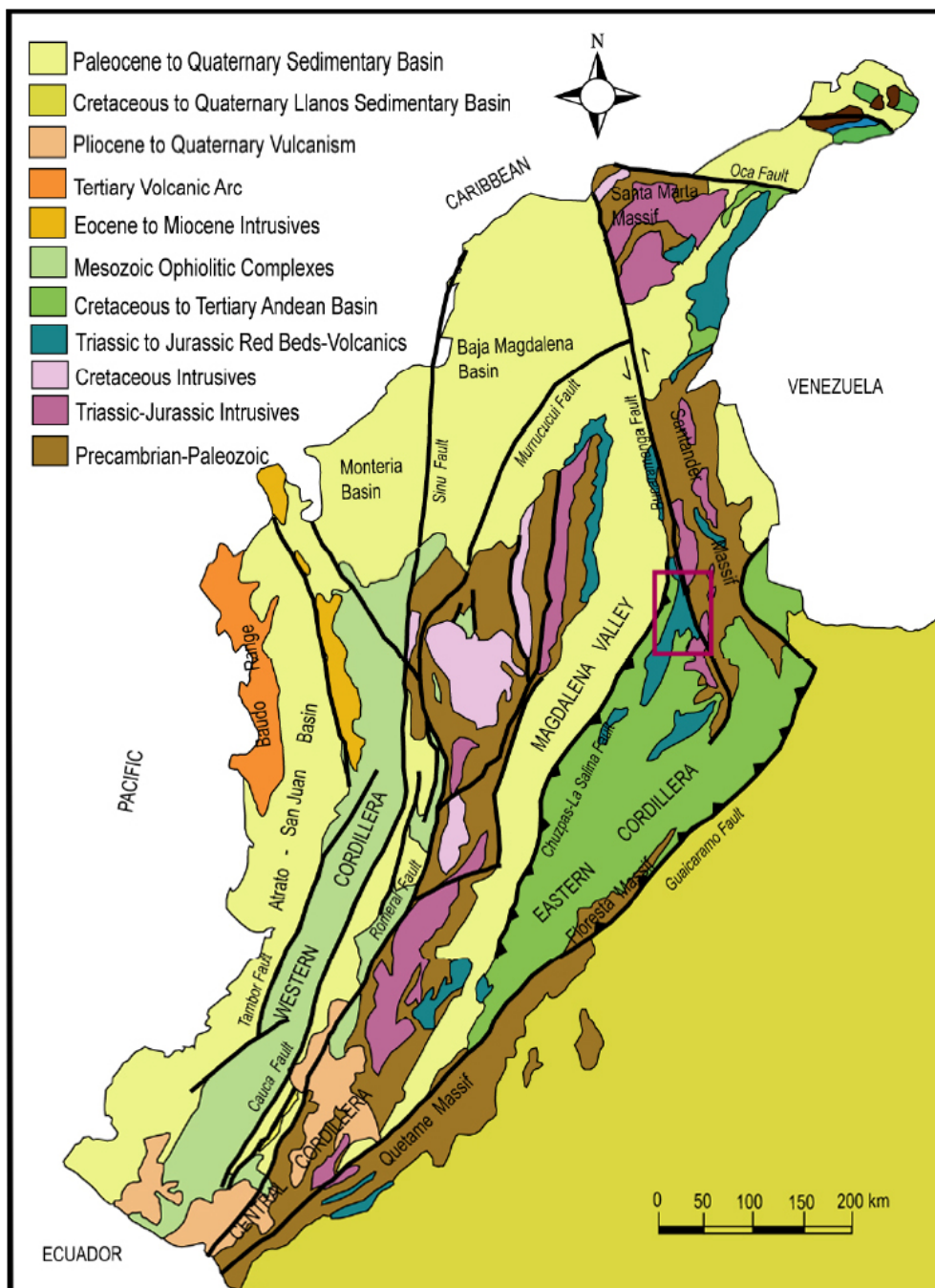


Figura 1. Localización del área de estudio dentro de un Marco regional. El cuadro en morado señala el área de estudio. (Tomado de Gélvés, 2006)

Durante todo el Mesozoico el sector que en la actualidad corresponde a la cordillera Oriental estaba ocupado por una cuenca extensional (Sarmiento, 2001), dividida en dos subcuencas. Hacia el Este se encontraba la subcuenca del Cocuy, y hacia el Oeste la subcuenca de Tablazo-magdalena, separados por el alto de Santander que comprendía lo que hoy son los Macizos de Santander y Floresta, ampliamente reconocidas en la literatura como cuencas tipo tras-arco (*Back-Arc basins*), producto de la subducción activa de la placa pacífico. (Cooper et al, 1995). (**Fig 2**) La existencia del arco magmático compuesto de cuerpos plutónicos calco-alcálicos y batolitos de edad Jurásica en el área de la cordillera central, apoya esta interpretación.

Hacia el final del Cretácico y comienzo del Paleoceno, terrenos oceánicos se acrecieron a lo largo de la Sutura de Romeral, creando la primera cuenca de antepais y dando señales de la inversión incipiente que se estaba dando en la cuenca Mesozoica preexistente, a su vez esta acreción ocasionó la deformación y el levantamiento de la Cordillera Central (Cooper et al, 1995), el cual fue episódico y sirvió como carga topográfica para generar la geometría acuñada de la cuenca. distingue dos episodios de levantamiento, uno en el intervalo del Maastrichtiano-Daniánico y otro a comienzos del Eoceno, que relajaron la subsidencia de la cuenca en la vecindad de la cordillera. (Gómez et al, 2005a)

Esta actividad se extendió hasta mediados del Mioceno cuando la Cordillera Oriental se transformó en una gran cuenca de antepais, y subsecuentes movimientos de las placas durante el Oligoceno hasta Mioceno inferior generaron nuevas fases deformacionales las cuales incidieron en la fase inicial del levantamiento de la cordillera Oriental en todo el proceso de inversión de las fallas normales que bordeaban el Rift Mesozoico. (Cooper et al., 1995)

La colisión entre el arco de Panamá-Baudó y el Margen de Suramérica a mediados del Mioceno crearon la Orogenia Andina. Durante esta orogenia, ocu

rrieron los máximos levantamientos de la Cordillera Oriental, y las fallas Mesozoicas fueron totalmente invertidas. (Dengo and Covey, 1993; Cooper et al., 1995).

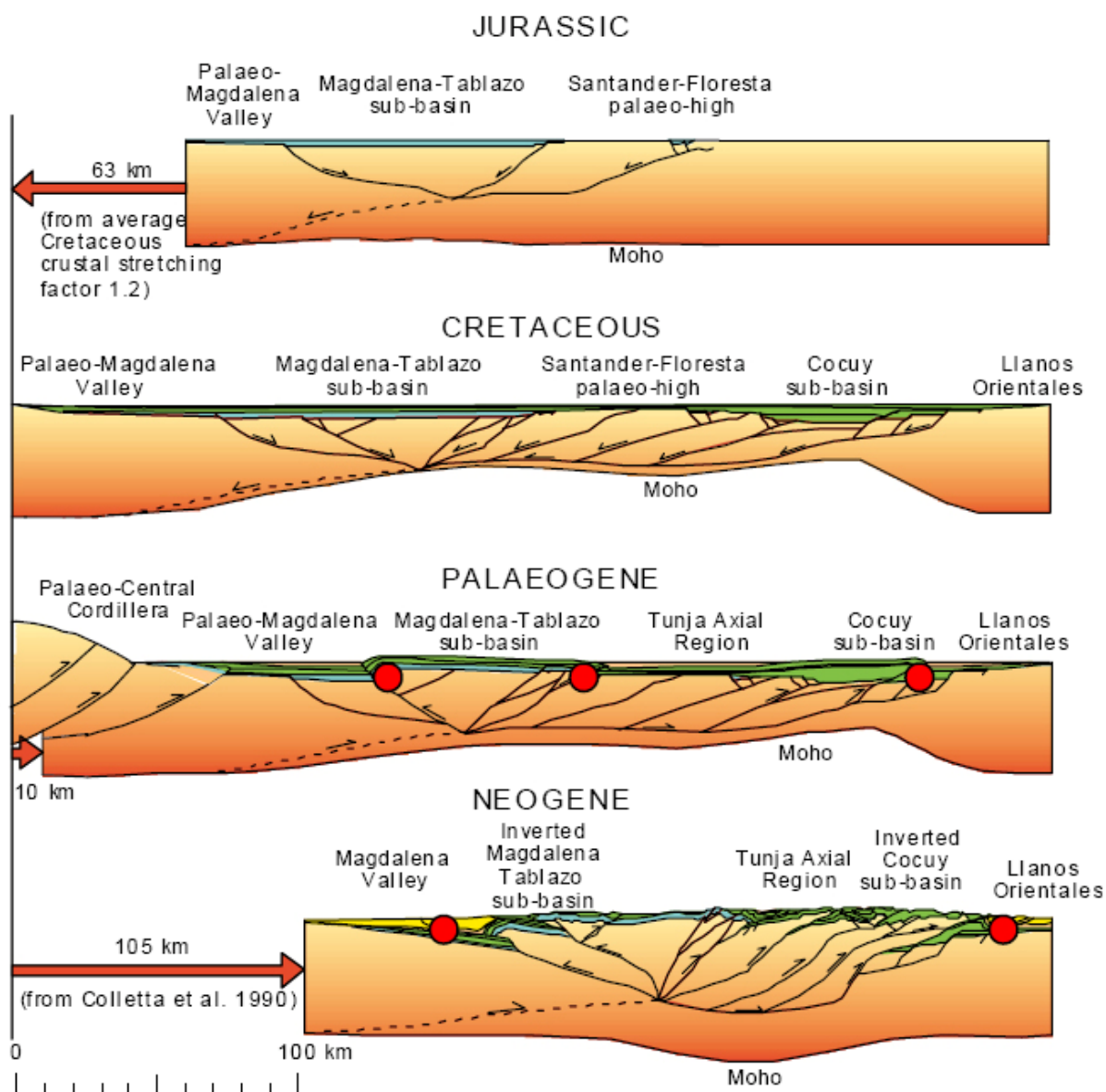


Figura 2. Evolución tectónica sugerida para la Cordillera Oriental desde el Jurásico. (Tomada de, Sarmiento, 2001)

5. ESTRATIGRAFIA

Las Unidades estratigráficas que se describen en esta sección corresponden a las muestras seleccionadas en este trabajo para el análisis de las trazas de fisión y la reconstrucción de la Historia termal.

Neis de Bucaramanga

El nombre original de Neis de Bucaramanga fue utilizado por Goldsmith, et al. (1971), posteriormente propuesto por Ward, et al. (1973). La unidad es una secuencia metamórfica de alto grado está compuesta de Neises pelíticos con cantidades menores de anfibolita y ortoneis localmente afectado por migmatización.

Goldsmith et al. (1971) reportó edades de 945 ± 140 Ma, en dataciones de K–Ar sobre Hornblenda y una edad de 680 ± 14 Ma por el método de Rb–Sr sobre roca total.

Formación Silgará

La formación Silgará es una unidad metamórfica de grado medio que consiste principalmente de esquistos y filitas pelitas a semipelíticos, intercalados con capas de esquistos máficos y Mármoles. A la Formación Silgará le han asignado tentativamente una edad del Cámbrico al Ordovícico (WARD, et al. 1973) y descansa discontinuamente sobre el neis de Bucaramanga.

Formación Bocas


Esta unidad consta de areniscas de grano fino grises o marrones oscuros, intercaladas con capas de limolitas calcáreas negras. La sección tipo se encuentra en cercanías de la localidad de Bocas al norte de Bucaramanga.

La Formación Bocas suprayace en discontinuidad estratigráfica al Neis de Bucaramanga, a las formaciones Silgará. La edad asignada a esta unidad es pretoarciano, datada con conodontes.

Formación Tambor

Está constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo grisáceas y cuarzoareniscas gris amarillentas, con estratificación cruzada, El contacto inferior de esta unidad es una discontinuidad estratigráfica con la Formación Girón. La Formación tambor es considerada de edad Berriasiano (Cediel, 1968; Etayo y Rodríguez, 1985 *en* Royero, 2001).

Formación Lisama



Esta unidad aflora al occidente de Santander y su sección de referencia está en la Quebrada Lisama, afluente del Río Sogamoso. La unidad se encuentra constituida por una secuencia de lutitas abigarradas, alternadas con areniscas grises, verdosas y pardas, de grano fino a medio y algunas capas delgadas de carbón.

El depósito de estos sedimentos ocurrió en un ambiente de condiciones lagunares deltáicas. La edad asignada es Paleoceno (Van Der Hammen, 1958).

Terraza de Bucaramanga.

La terraza de Bucaramanga se encuentra compuesta por depósitos no consolidados aluviales en abanicos y terrazas, es considerada de edad Pleistoceno.

6. METODOLOGIA.

Para cumplir con los objetivos trazados en esta práctica, la metodología que se va a seguir se presenta a continuación.

6.1 RECOPIACION BIBLIOGRAFICA Y ANALISIS DE LA INFORMACION GEOLOGICA

La primera fase de este trabajo corresponde a la recopilación de estudios regionales y locales acerca de la geología del área del Macizo de Santander y que incluye también la parte Occidental de la Cuenca del Valle Medio; del mismo modo también se hace referencia a la búsqueda de información publicada acerca del empleo de la técnica del AFTA® en el territorio colombiano como también de todos aquellos trabajos que estén relacionados con el tema en el área de estudio del trabajo.

6.2 CAMPAÑA DE MUESTREO

La segunda fase se llevó a cabo con el estudio de las Unidades geológicas de interés con base en la cartografía realizada por Ward en 1973 de cuyo trabajo se obtuvo el mapa H-2 y H-13 a una escala de 1:100000. Como soporte para esta fase también se tiene en cuenta los cortes geológicos y columnas estratigráficas referenciadas en algunos de los trabajos encontrados en la recopilación bibliográfica.

Se identificaron 5 rutas de muestreo (**Ver sección 6.1**), de estas se recolectaron 66 muestras de las cuales 38 obtuvieron recobro de apatito suficiente (Ver Anexo 2), para realizar los análisis de trazas de fisión en Apatitos. Con este selectivo muestreo se obtuvo la representación de cada una

de las Unidades Clásticas, Metamórficas e ígneas, con edades que cubren toda la historia geológica conocida desde el Precámbrico hasta el Cuaternario, en la **figura 3** se muestra la distribución estratigráfica y las muestras seleccionadas para este trabajo.

Como estrategia para el muestreo se recolectaron 2 ejemplares, cada uno de 1 kg de muestra por afloramiento, que mejores condiciones físicas tuviese, baja meteorización y texturalmente inmadura. Dentro de estas formaciones se ubicó estratigráficamente el tope, la base y las secciones intermedias lo mejor posible y de aquí se seleccionaron las muestras enviadas hacia Australia.

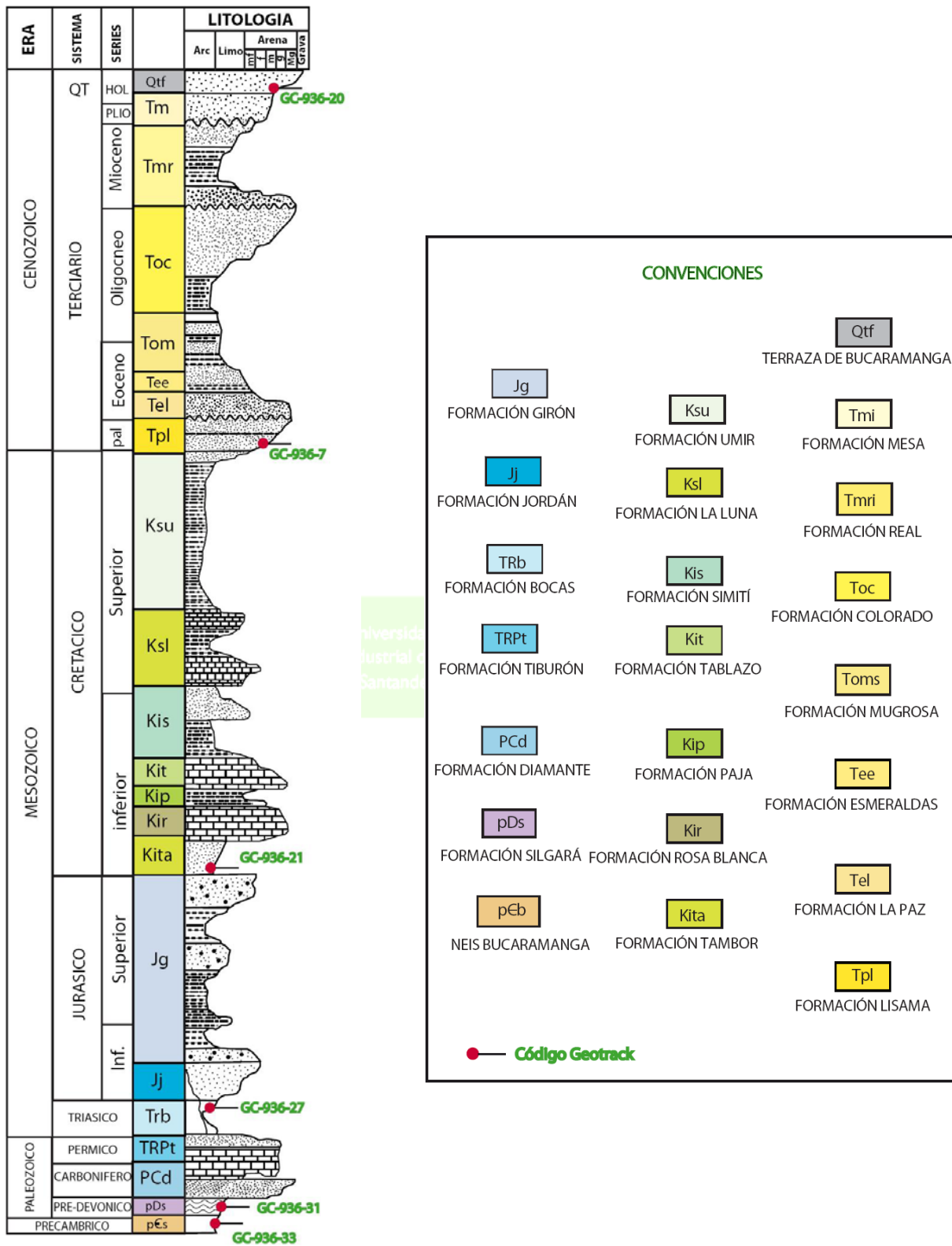


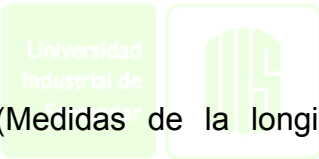
Figura 3. Posición estratigráfica de las muestras seleccionadas en este estudio, identificadas con el círculo rojo

6.3 ANALISIS MACROSCOPICO DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS PARA LOS ANALISIS AFTA

Después de tener las muestras de mano, se procedió a hacer la descripción macroscópica de estas y clasificarlas según los parámetros propuestos por Folk(1974). (**Ver Anexo 1**)

6.4 RESULTADO DE LOS ANALISIS DE LABORATORIO.

Los análisis de trazas de fisión para las muestras seleccionadas se realizaron en la ciudad de Melbourne, Australia y los resultados que se obtuvieron para cada muestra se muestra a continuación.

- 
- Los datos básicos (Medidas de la longitud y edad de los trazes, determinación de Cloro por Microsonda en todos y cada uno de los granos empleados para hacer AFTA® y ZTFA, Valores de Ro más Histogramas incluyendo descripciones detalladas y discusiones de los niveles de madurez para el Ro).
 - Detalles completos de la interpretación de la historia termal individual de los datos AFTA® en cada Muestra. (Determinación de Paleotemperaturas Máximas y el tiempo en el cual comenzó el enfriamiento a partir de estas Paleotemperaturas máximas, con rigurosos límites de confianza de +/- un 95% derivados del modelamiento Cinético empleando algoritmos propios de Geotrack los cuales tienen muy en cuenta la influencia composicional en las tasas de “annealing” ; y mediante la cual, La edad ó sincronismo (timing) de dos episodios termales discretos pueden generalmente ser resueltos.

- Integración de los indicadores AFTA® con otros indicadores paleotermales: Específicamente en la determinación de máximas paleotemperaturas post - deposicionales extraídas de los datos de R_o , calibradas con el sincronismo determinado sobre las bases de AFTA®.
- Síntesis de los resultados para todas las muestras de cada Secuencia estratigráfica dentro de un marco de la Historia Termal coherente.
- Discusión General de los Gradientes paleogeotermales (para cada episodio termal, si se han identificado múltiples episodios), y las cantidades de sección sedimentaria perdida (con un límite de confianza del 95% para ambos casos).
- Reconstrucción de las historias termal, de enterramiento y de maduración para la sección preservada en cada provincia estructural identificada en los cortes geológicos.

6.5 INTEGRACION DE LOS RESULTADOS

Esta fase comprende el análisis y la integración de los resultados. Lo que se pretendía aquí era entender y aplicar los resultados analíticos, al conocimiento tectono – estratigráfico que se tiene de la zona con el objetivo de proporcionar información que permita, desde otro punto de vista tener idea de la evolución geológica a nivel local y observar el comportamiento de la tectónica de las zonas aledañas que están sobre la Cordillera Oriental (Macizo de Santander), dentro de las cual se encuentra el flanco Occidental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena la cual ha sido de gran interés económico para el país.

6.6 REDACCION DE LOS REPORTES FINALES

El presente documento de grado entregado en la Universidad se va a tomar como referencia para una futura publicación, cuyo contenido tendrá un carácter confidencial hasta tanto se realice la publicación.



7. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

7.1 LOCALIZACION GEOGRÁFICA

La zona de estudio se encuentra ubicada en el departamento de Santander (Ver fig 4 y Fig 5), el cual a su vez está localizado en la región centro Oriental de Colombia entre los 5° 42' de latitud y 74° 32' de longitud

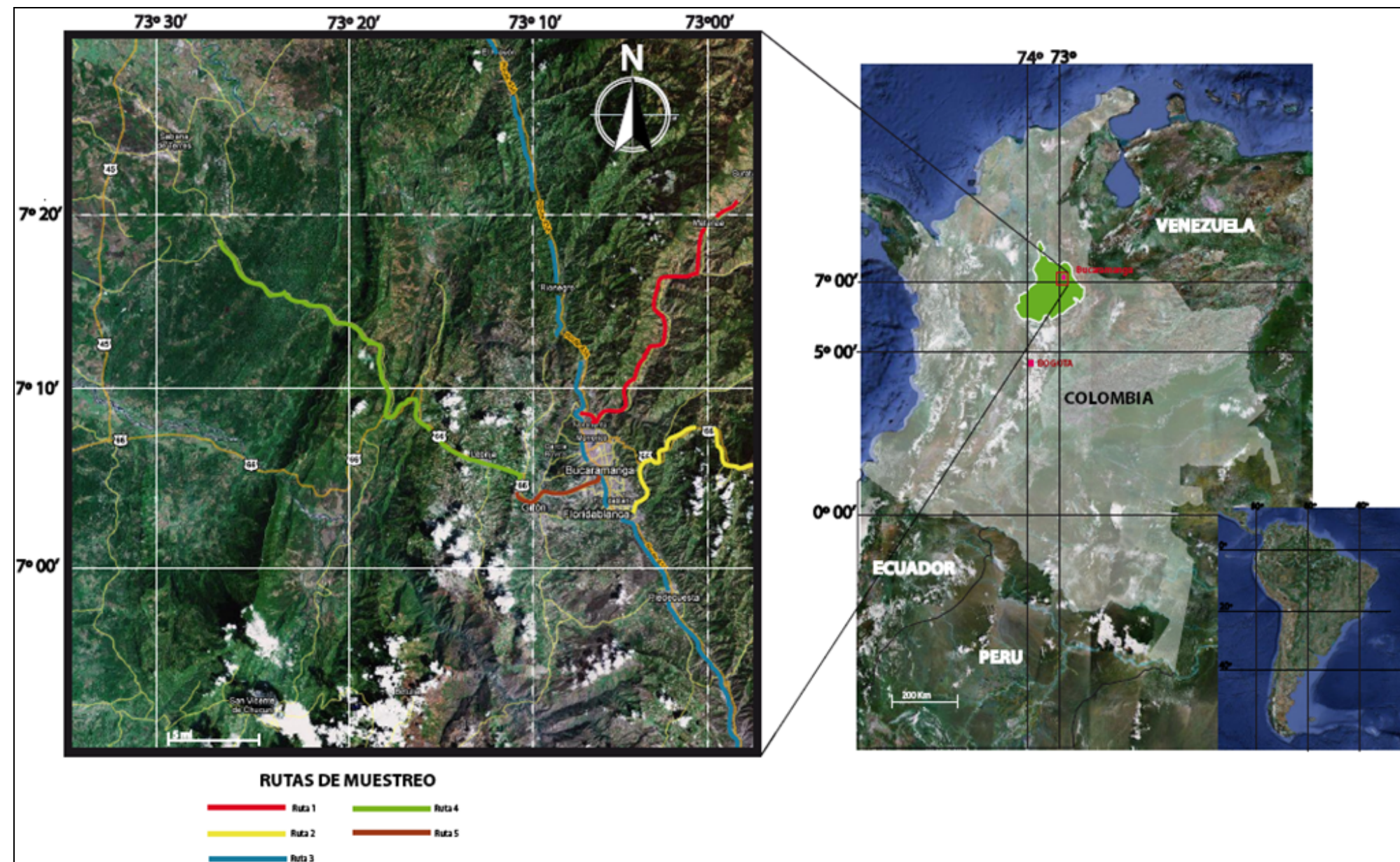


Figura 4. Localización geográfica del área de estudio y rutas empleadas en la campaña de muestreo

7.1.1 RUTAS DE MUESTREO

Para realizar el muestreo para el proyecto se escogieron las siguientes rutas:
(Ver figura 4, para la localización de las rutas en el mapa).

- La vía que de Bucaramanga conduce al municipio de Matanza sirvió de apoyo para tomar muestras de las unidades Cretácicas, el Neis de Bucaramanga precámbricas que afloran en la zona. **Ruta 1.**
- La vía que de Bucaramanga conduce a Piedecuesta, en inmediaciones del municipio de Floridablanca para tomar muestras del Neis de Bucaramanga y de algunos intrusivos jurásicos. **Ruta 2. (Ver anexo 2, foto 25 y foto 26)**
- El sector norte de la ciudad de Bucaramanga, por la vía que conduce al municipio de Rionegro, se muestrearon las Unidades paleozoicas del presente estudio y tomando la misma ruta hacia la parte más sur del muestreo se colectó rocas Jurásicas y Precámbricas. **Ruta 3. (Ver anexo 2, foto 20)**
- La vía principal que de Bucaramanga conduce a Barrancabermeja, y el cruce conocido como la azufrada antigua vía a este municipio. En este recorrido se realizaron los muestreos de las unidades Terciarias, Cretácicas y Jurasicas, hasta el municipio de Lebrija. **Ruta 4. (Ver anexo, foto 9 y foto 2)**
- La vía principal que de Girón conduce a Floridablanca conocida como el anillo vial para tomar muestras de la terraza de Bucaramanga y vía al aeropuerto Palonegro la formación Girón, 3 km antes de llegar al peaje. **Ruta 5. (Ver anexo 2, foto 29).**

7.2 LOCALIZACION GEOLOGICA

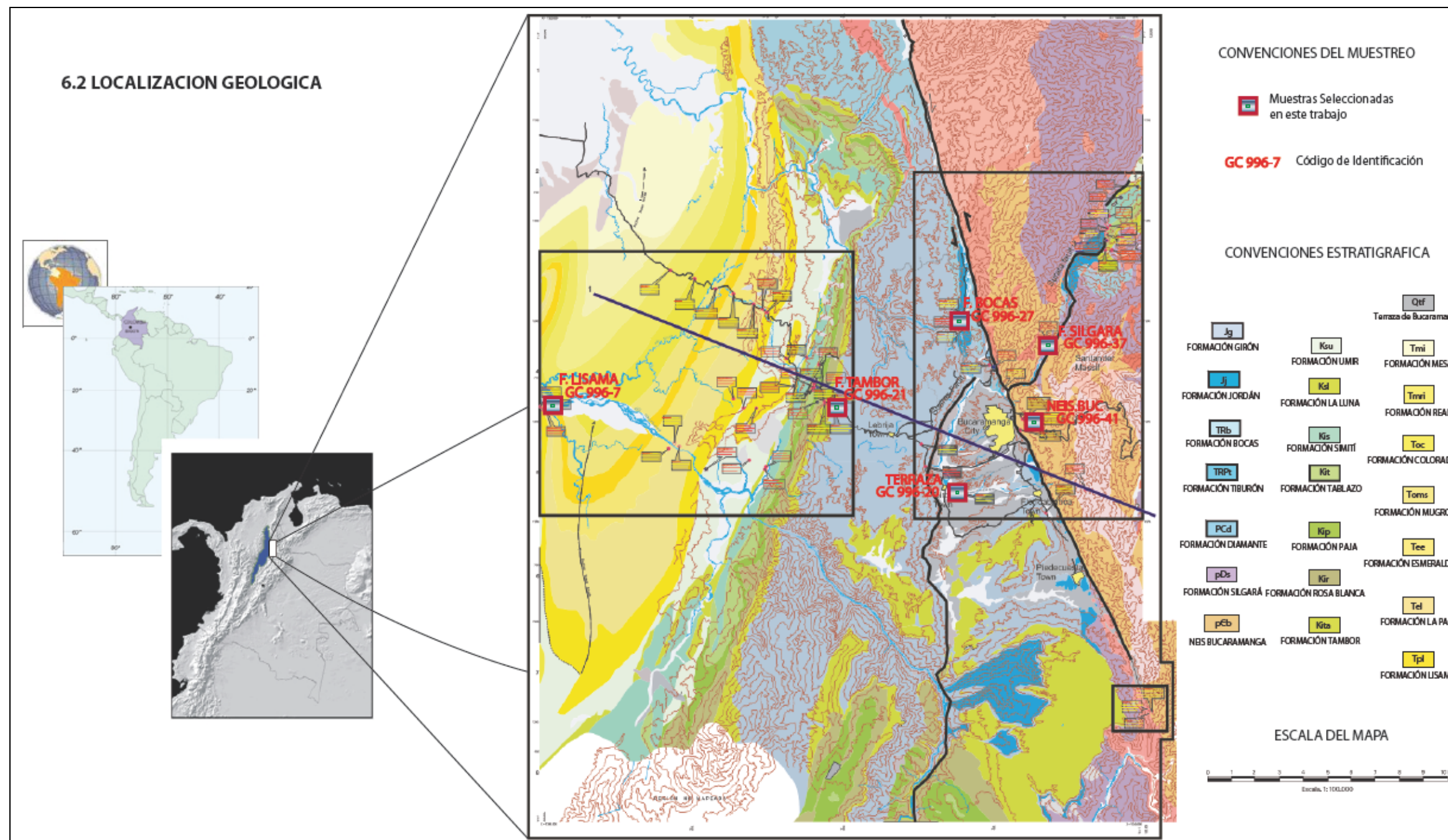


Figura 5. Ubicación geológica de las muestras. En cuadros rojos se encuentra identificada la posición de las muestras seleccionadas para este estudio. Tomado de Ingeominas (1998).

8. MARCO TEORICO

8.1 ASPECTOS GENERALES DE LAS TRAZAS DE FISIÓN

8.1.1 OCURRENCIA NATURAL DEL APATITO

Como mineral, el Apatito presenta muchas ventajas y fortalezas, frente a otros termocronómetros que al igual que este, tienen el potencial para determinar paleotemperaturas, las cuales, a su vez son muy bien aprovechadas por la técnica AFTA®, lo que hace la hace una herramienta realmente útil y práctica para determinar historias de evolución termal y en general, para su extensivo uso en termocronología.

Dentro de las características que hacen tan atractivo al apatito, se podría decir que es un mineral que se encuentra naturalmente en casi toda los ambientes geológicos en muchas tipos de rocas corticales típicas, esto es posible gracias a sus propiedades físicas, la química de los elementos mayores y menores que lo componen, la química de los elementos traza que se pueden encontrar en sus cristales naturales, en particular del Uranio y el Torio, desde luego la habilidad de este mineral para registrar las trazas de fisión generadas en ambientes geológicos lo hace también un mineral llamativo, y para terminar su extensa conjunto de cualidades, es un mineral que permite recrear en el laboratorio las principales etapas que influyen en el comportamiento de la formación de las trazas espontáneas, es decir aquellas trazas formadas naturalmente en el tiempo geológico. **(Fig 6)**

El apatito se puede encontrar en la naturaleza en todo tipo de rocas, ya sea como un grano cristalino, es decir como un cristal completo, como un fragmento de cristal, o en asociaciones de cristales completos o en asociaciones de fragmentos de cristal, que pueden o no haber tenido alguna

historia de transporte sedimentario. De esta manera, es posible encontrar granos completos (cristales) de apatito en rocas ígneas, donde este se encuentra como mineral accesorio y cuyos cristales pueden tener formas cristalinas variables desde euhedrales hasta anhedrales. En rocas sedimentarias clásticas como granos detríticos, ya sean primarios o secundarios en rocas como Shales, calizas y carbones, y en rocas metamórficas como porfiroblastos o granos minerales primarios, incluyendo los mármoles.



Figura 6. Grado de estabilidad de varios minerales pesados en la interacción con fluidos asociados con el enterramiento. (Tomado de Morton, 1994)

Los agregados de cristales de apatito o de fragmentos de los mismos, generalmente es común encontrarlos en apatitos que han sido originados biológicamente ó en materiales que contengan fósforo como dientes, espinas y Conodontes. Apatitos formados por precipitación química es decir como nódulos en rocas sedimentarias ricas en fosfatos, incluso también es posible encontrar apatito como granos formados por procesos hidrotermales (Apatitos Hidrotermales) o diagenéticos (Apatitos Diagenéticos), en rocas clásticas o no clásticas. (Donelick, O'Sullivan & Ketcham, 2005).

8.1.2 CARACTERISTICAS MINERALOGICAS Y CRISTALINAS

La mayoría de los apatitos que se forman naturalmente hace parte de la clase cristalina hexagonal dipiramidal 6/m, y en muy pocas y muy raras ocasiones algunos cloroapatitos cercanos a miembros terminales es de la clase monoclinica (Hudges, 1989). El típico hábito de un apatito ígneo es prismático, y en las rocas sedimentarias estos pueden experimentar algún grado de redondez de sus bordes prismáticos, que son uno de los pocos procesos que afectan físicamente al cristal de apatito por

8.1.3 PROPIEDADES FISICAS DEL APATITO

La gravedad específica del apatito está entre 3.15 y 3.20 g/cm³, de manera que es un mineral pesado en relación con otros minerales como el cuarzo, feldespato y calcita entre otros minerales formadores de roca que tienden a tener una gravedad específica por debajo de 2.90 g/cm³.

En sus propiedades ópticas el apatito tiende a tener un color gris o blanco de primer orden en una posición perpendicular al eje c, y se puede distinguir del

cuarzo por su alto relieve y un índice de refractancia más alto (aprox. 1.63), comparada con la del cuarzo (1.54).

8.1.4 QUIMICA DE ELEMENTOS MAYORES Y MENORES ELEMENTOS TRAZA

Los elementos que se encuentran en menor cantidad en los cristales de apatito son los principales responsables de los procesos atómicos que fundamentan las bases teóricas tanto del AFTA®, como del análisis de (U-Th)/He, esta última una novedosa técnica muy recientemente empleada en termocronología (**Ver Cap 10, Sección 10.1.3**). Estos elementos de los cuales se hace referencia son el Uranio y el torio, de los cuales el primero cumple un destacado papel en el análisis de la trazas de fisión (AFTA®), y ambos elementos son tenidos en cuenta en estudios de termocronología mediante análisis de (U-Th)/He.

Según **Donelick, O'Sullivan & Ketcham, 2005** las concentraciones de Uranio retenidas Naturalmente en cristales de apatito varían entre 1 y 200 ppm, donde la estructura interna del cristal protege al Uranio del medio, ya que en su forma iónica libre (UO₂, Uranylo) y como compuestos, bajo condiciones oxidantes se vuelve un muy soluble en soluciones acuosas, y aún así está la posibilidad de que exista pérdida de este por procesos de disolución y reprecipitación.

El catión de Uranio es muy poco compatible con otros cationes presentes en silicatos, debido a su alta carga y a su relativamente pequeño radio iónico (U=1.05 Å), por eso la fuerte tendencia a concentrarse en fases minerales accesorias como apatito, zircón, titanita (Rutilo), y monazita.

El Uranio está presente en la naturaleza en 3 formas isotópicas: ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U , siendo este último el más abundante en la naturaleza y la que genera continuamente las trazas espontáneas a través del tiempo.

8.2 LAS TRAZAS DE FISION

Las trazas de fisión son el daño ocasionado, cuando partículas cargadas viajan a través de un sólido aislante eléctrico, dejando una huella linear por rompimiento de átomos, lo cual refleja el intenso daño que existe a escala atómica. (Gallagher et al, 1998) (**Fig 7**)

El modelo que actualmente es aceptado y preferido para explicar la formación de las trazas de fisión es el Modelo de pico explosivo (Fleischer et al 1975). En este modelo, cada traza formada naturalmente con la fisión del U^{238} para un cristal de apatito o una población de este mineral, representa un evento particular y diferente al de otras trazas, de esta manera la traza que se acaba de formar tiene unas condiciones iniciales diferentes a la primera que se formó (la más antigua), y un amplio rango de edades. Esta situación es poco conveniente y en el laboratorio se emplea con más frecuencia el U^{235} para generar trazas termalmente inducidas, porque con este se pueden formar trazas con las mismas condiciones iniciales y controladas. (Donelick, 2005).

La situación análoga indica que la población de trazas inducidas que se forman a bajas temperaturas y que son subsecuentemente calentadas, corresponden con una población de trazas formadas naturalmente en un corto pero significativo periodo de tiempo. Si se divide el periodo de tiempo total en el que se acumularon todas las trazas espontáneas en un apatito, en intervalos discretos de tiempo geológico, cada intervalo específico representa una población de trazas común, que se formaron en la misma historia geológica ca-

racterizada por el mismo intervalo de tiempo, temperatura y otras condiciones ambientales.

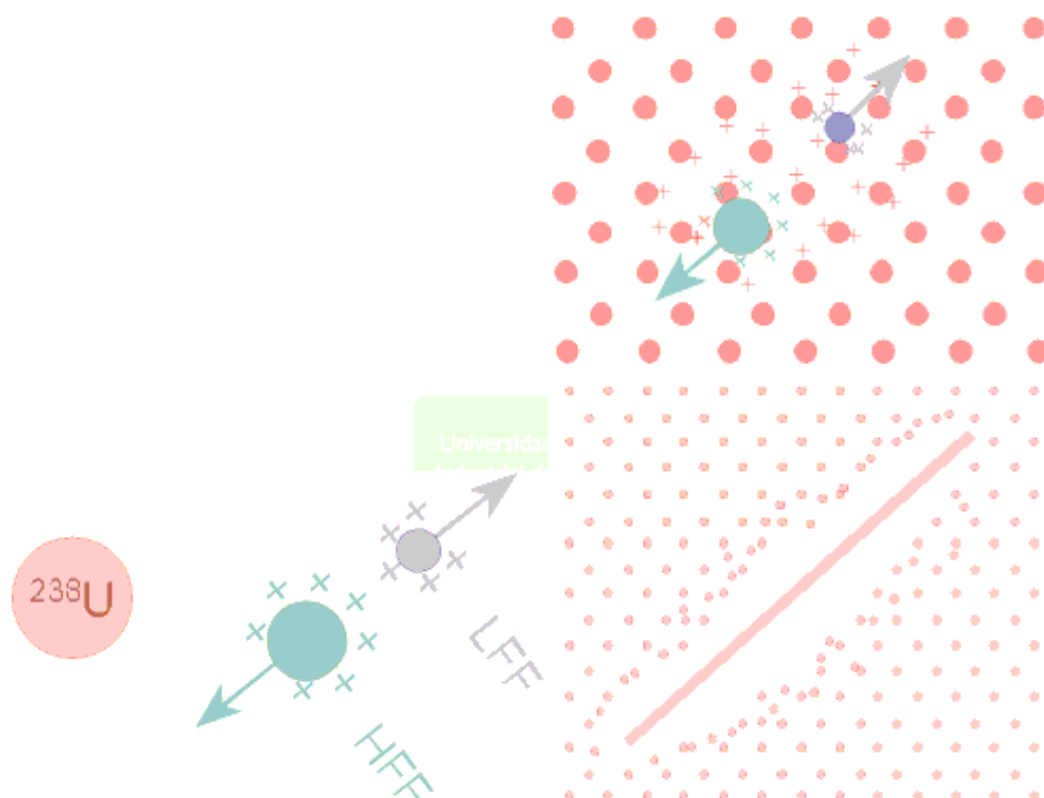


Figura 7. Representación del modelo de pico explosivo y la formación de una traza en un mineral. Los puntos rosados son los átomos de U^{238} , los círculos verde y morado respectivamente, en la parte superior, son partículas subatómicas que resultan de la desintegración del U, y representa a la 4He y partículas alpha. (Tomado de. www.geotrack.com.au)

8.3 ANALISIS DE TRAZAS DE FISION EN APATITO

8.3.1 AFTA EN EL LABORATORIO

8.3.1.1 PROCESO DE ETCHING

Las trazas de fisión son ópticamente no detectables, y tienen en promedio espesores que varían entre 3 y 14 nm (Paul & Fitzgerald 1992) y una longitud que en promedio no supera 16 μm (Beardsmore, 2001; Green, 1986). Aparte de esto las trazas que tienen importancia para ser medidas se encuentra debajo de la superficie pulida paralela a la superficie prismática, estas son como trazas confinadas horizontales, es decir trazas que se cortan entre si (TINT), o trazas que se interceptan con alguna fractura (TINCLE), ya que son las trazas con la representación más directa y reproducible de la longitud real de las trazas y además siempre. Para que estas trazas que apenas se insinúan en la superficie y que aún no pueden ser ópticamente observables la superficie pulida se lava con ácido nítrico diluido al 5%, para que las trazas y se cree una reapertura y puedan ser medidas. (Gleadow et al 1986, Green et al 1989b).

8.3.1.2 MEDICION DE LAS TRAZAS

Para medir las trazas y hacer el conteo de las mismas sólo los granos en los que el eje c sea paralelo a la superficie pulida son tenidos en cuenta, además de las consideraciones anteriores (Laslett et al, 1982 en Zentilli 1992). Para este fin se emplea el método del detector externo, el cual emplea una lámina típicamente de mica que está totalmente libre de Uranio hasta de Aluminio,

como dispositivo detector el cual está sellado contra la superficie del apatito, y así es enviado al reactor nuclear para ser irradiado con neutrones de baja energía, los cuales inducen la fisión del U^{235} . Durante el proceso de fisión algunas partículas pesadas cruzan la interface entre el mineral y la mica, generando un reflejo especular del grano original. Cuando regresa la mica, esta es lavada con ácido para revelar las trazas inducidas.

Al contar el número de trazas inducidas en la mica, se puede estimar el contenido de Uranio original y por tanto la concentración de este en el grano mineral, mientras que al contar las trazas espontáneas, se estima la concentración de los átomos hijos. La mayor ventaja de este método es que la edad de las trazas de fisión es determinada en los granos individuales. (Gallagher et al, 1998) **(Fig 8)**



8.3.1.3 BORRADO TOTAL DE LAS TRAZAS DE FISION (ANNEALLING)

Las trazas de fisión se acortan irreversiblemente, se borran, cuando el mineral huésped se somete a elevadas temperaturas, como consecuencia de un proceso de difusión termalmente activado que es muy poco entendido. Los rangos de temperatura para que las trazas se borren en su totalidad dependen del mineral y de las tasas de calentamiento, siendo el Apatito, el circón y la esfena los minerales más comúnmente analizados.

Para el Apatito se toma como tope mínimo 60°C, temperatura en la cual las trazas inducidas son 1 a 1.5 μm más largas que las trazas espontáneas, en muestras que se consideran siempre han estado sometidas a temperaturas muy cercanas a la superficial, el tope máximo se encuentra documentado como 110°C con una incertidumbre de $\pm 10^\circ\text{C}$, lo que sugiere que en periodos

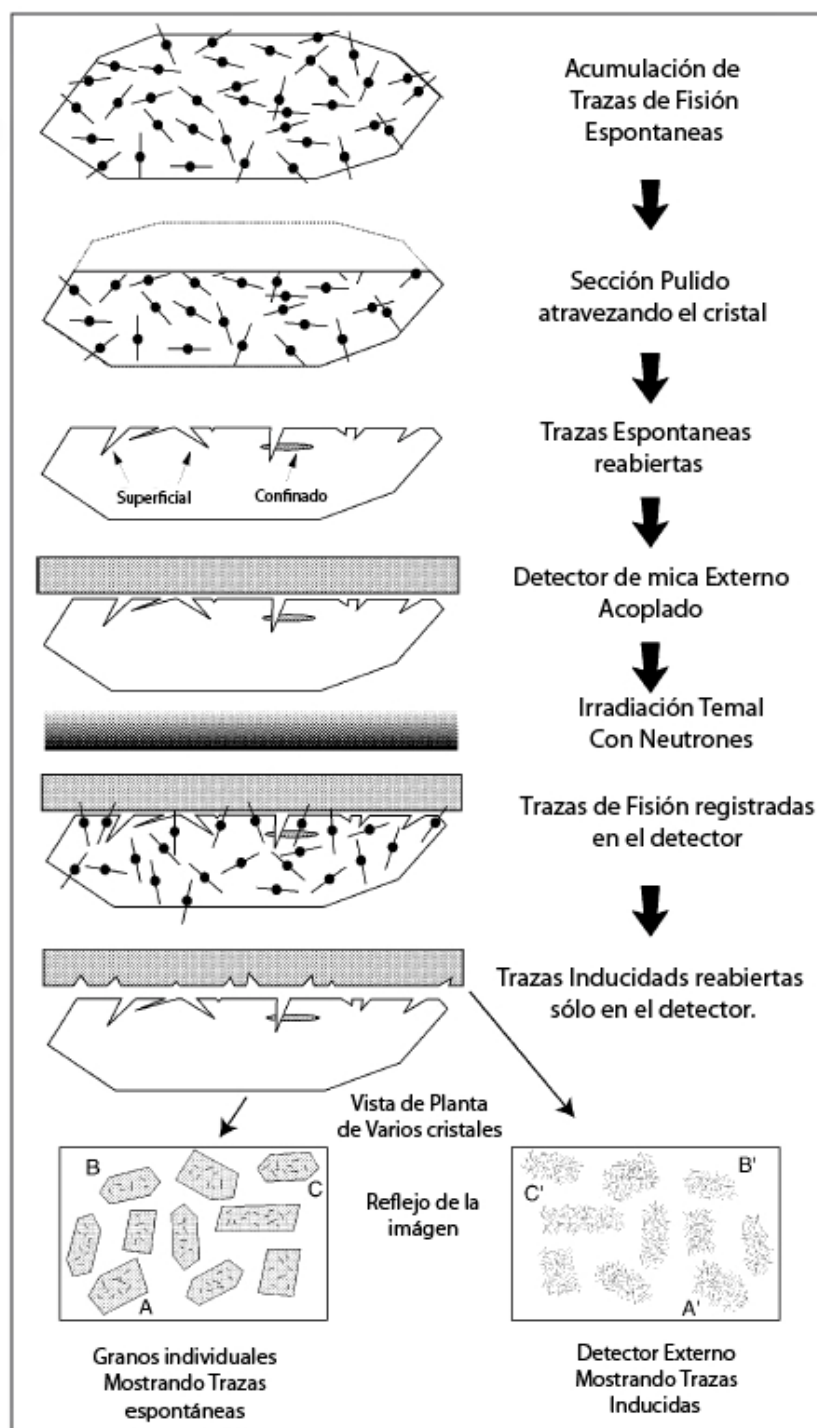


Figura 8. Esquema en el que se resúmen los pasos que se siguen en el laboratorio, para medir las trazas de fisión. (Tomado de. Gallagher et al, 1998)

de tiempo geológico, es posible que el borrado de trazas continúe a temperaturas cercanas a la superficial.

La tasa de borrado total se puede representar gráficamente en diagrama conocido como Diagrama de Arrhenius (el cual relaciona el inverso absoluto de la temperatura con el logaritmo del tiempo) (Laslett et al, 1987), estos son los resultados experimentales isotermales hechos sobre el Apatito de Durango, representan el borrado de las trazas en función de la reducción en la longitud de la traza y de la edad de estas (Green, 1986) los cuales son mediciones estándar y que se pueden extrapolar a tiempo geológico con una magnitud de 10^6 a 10^8 , (Gallagher et al, 1998).

La composición química del Apatito es un importante parámetro que controla la tasa de borrado total (Annealing) observación hecha por primera vez en 1985 por Paul Green. Con respecto a esto se tiene bien documentado que los apatitos ricos en Cloro son más resistentes al borrado de las trazas que los Apatitos ricos en Flúor para datos naturales y poco se sabe del comportamiento de otras especies químicas, esto es indispensable tenerlo en cuenta para interpretar los datos AFTA correctamente en términos de la magnitud y la edad (*timing*) de las paleotemperaturas máximas (Green, 1995). Esto se ve reflejado en la edad de las trazas de fisión las cuales corresponden con el contenido de Cloro del grano mineral, de manera que cuando el porcentaje en peso del Cl es cero, en este grano ya se habían borrado la totalidad de las trazas (la edad era cero), mientras que en un grano con un porcentaje en peso de ~2 wt% de Cl o superior, el grano aún retiene edades de fisión, muy cercanas a la edad deposicional de los sedimentos huésped, lo cual indica que este grano ha sido poco expuesto al borrado de trazas (Green, 2006.).

Los primeros trabajos realizados por Naeser (1967) y Wagner (1968, 1969) establecieron los procedimientos básicos que permitieron realizar dataciones con el método de las trazas de fisión por medio de la detección de trazas en principio sobre diferentes materiales en estado sólido se empleaban rutinariamente para resolver problemas geológicos.

8.3.2 DETERMINACIÓN DE LA EDAD

AFTA® se basa en la reducción progresiva de la longitud de las trazas en función del tiempo y de la temperatura principalmente. Esta reducción en la longitud de las trazas se manifiesta en una reducción en la edad de las trazas. La edad de las trazas de fisión es un parámetro determinado experimentalmente el cual es una medida que combina el tiempo que le tomó a la muestra retener todas las trazas y del grado de severidad a la cual las trazas se han ido acortando, por el calentamiento que sufrió la muestra después que se haberse formado las trazas.

Con los parámetros medidos en el laboratorio, la cantidad de trazas contadas en los granos de Apatito para el caso de la fisión espontánea, y en mica moscovita empleada como detector externo, para la fisión inducida, se puede calcular las densidades de las trazas de fisión espontaneas e inducidas.

Para la determinación de la edad de las trazas se utiliza la ecuación estándar para las trazas de Fisión para la cual se utiliza el factor de calibración zeta (Hurford and Green, 1983) y la cual relaciona. (**Ecuación. 1**)

$$E.F.T = (1/\lambda_D)^* \ln [1 + (g * \zeta * \rho_s * \rho_D * \lambda_D / \rho_i)] \quad (Ec. 1)$$

λ_D : Constante de desintegración para el U^{238} . (= 1.55125×10^{-10})

ρ_s : Densidad de trazas espontáneas

ρ_i : Densidad de trazas Inducidas

ρ_D : Densidad de trazas Inducidas sobre Vidrio Estándar

ζ : Factor de Calibración zeta.

g: Factor Geométrico. (= 0.5)

8.3.3 ESTRATEGIA PARA LA INTERPRETACION

8.3.3.1 Interpretación de la Historia Termal de los Datos AFTA®

La interpretación de los datos AFTA® comienza por analizar cuidadosamente si la información sobre la edad de las trazas y la longitud de las trazas en cada muestra pudo haber sido generada en una situación donde la muestra en ningún momento después de su depositación, haya sido sometida a temperaturas mayores a las cuales está siendo sometida en el presente (Determinación de la Paleotemperatura). Para hacer esto lo primero que se debe tener en cuenta es la “La Historia Termal por Defecto” para cada muestra, en la cual se fundamentan las bases de esta interpretación. En el caso del presente estudio donde todas las muestras obtenidas son de afloramiento, La Historia Termal por Defecto representa la cantidad de tiempo en la cual la temperatura superficial se ha mantenido.

Una vez construida esta historia, se pueden predecir los parámetros AFTA®, para cada muestra. Si los datos medidos en el laboratorio demuestran que el borrado total de las trazas de fisión (Annealing) es mayor que el borrado de las trazas que se espera de la HTD, en términos de la reducción de la edad y/o la longitud de las trazas, esta muestra debió haber estado más caliente en el pasado. En este caso específico los datos AFTA® son analizados con miras a proveer un estimativo de la magnitud de la paleotemperatura máxima alcanzada, y el tiempo para el cual esa muestra empezó a enfriarse a partir de eso pico termal máximo.

Debido a la posible presencia de trazas que son heredadas de terrenos de aporte de sedimento, es posible que la longitud de las trazas conserven evidencias de que la muestra definitivamente estuvo más caliente en el pasado (desde su depositación), mientras la edad de las trazas aún sigue siendo mayor que las predichas por la Historia Termal por Defecto, la cual sólo hace referencia a las trazas formadas después de la depositación.

Similarmente en muestras donde todas o la mayoría de las trazas fueron totalmente borradas en episodio paleo termal, y las cuales a su vez han sido enfriado y luego re-enterradas, la edad de las trazas puede evidenciar una clara exposición a temperaturas más altas en el pasado, pero los datos de longitud de las trazas pueden haber sido dominados por el régimen termal en el presente y no revelará directamente efectos paleotermales. En circunstancias como esta, evidencias, ya sea por datos sobre la edad de las trazas o de la longitud de las mismas, es suficiente para establecer que la muestra realmente estuvo más caliente en el pasado.

Los datos AFTA® no ofrecen información sobre el máximo termal, y no puede independientemente asociarse con una tasa de calentamiento, por lo tanto este valor debe ser asumido para poder interpretar los datos, y por tanto, la estimación de la paleotemperatura máxima está condicionada al valor que haya asumido, lo que AFTA® si hace en este sentido es ofrecer un cierto control en la historia que sigue posterior al enfriamiento que comienza a partir de la paleotemperatura máxima, a través de las longitudes de las formadas en este periodo.

Donde sea posible, los datos que se obtienen de cada muestra, son interpretados en función de dos episodios de calentamiento y de enfriamiento, utilizando tasa de calentamiento o de enfriamiento durante cada episodio, con la paleotemperatura máxima alcanzada durante el primer episodio. La edad en la que comienza el enfriamiento y el pico de paleotemperatura durante los dos episodios varía sistemáticamente, al comparar los parámetros predichos en la Historia Termal por Defecto y los datos medidos, el rango de condiciones dada en las predicciones que pueden ser compatibles con los datos pueden ser definidos.

La resolución de episodios termales adicionales de calentamiento y enfriamiento después de que haya comenzado el enfriamiento desde la paleotemperatura maxima es posible hacerse con un conjunto de datos AFTA® típico, siempre y cuando estos episodios estuviesen separados por al menos 30°C y el tiempo en el comienza el enfriamiento difiera suficientemente.

Si los datos AFTA® demuestran un borrado total (Reducción tanto en edad como en longitud de las trazas) de las trazas inferior al que se espera con la Historia

Termal por Defecto, sugieren que las temperaturas en el presente han sido sobre-estimadas ó que estas se han incrementado muy recientemente. En tales casos, los datos podrían permitir una estimación de la temperatura en el presente más real o bien, estimar el tiempo para el cual se han incrementado las temperaturas.

9. APLICACIONES ACTUALES DEL ANALISIS DE LAS TRAZAS DE FISION SOBRE APATITOS – (AFTA®)

El análisis de las trazas de Fisión en apatitos ha sido ampliamente utilizada durante los últimos 30 años para reconstruir historias termal de baja temperatura en todo tipo de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias en contextos geológicos de diversa naturaleza, evolución de cinturones plegados, márgenes pasivos, análisis de cuencas sedimentarias, cratones y yacimientos minerales (Donelick, 2005), en las siguientes líneas se presenta como esta técnica ayuda a resolver problemas que se enfrentan en la actualidad, y ofrece un punto de vista complementaria que por los métodos tradicionales no es posible obtener.

9.1 AFTA® EN LA EXPLORACION MINERAL

El análisis de trazas de fisión se puede emplear en la exploración mineral en diversas maneras. Es posible determinar el espesor de roca removida por erosión (unroofing)¹ en yacimientos de chimeneas diamantíferas y en pórfidos cupríferos, además de conocer el sincronismo entre los procesos de

¹ * La definición de “Unroofing” se toma de la publicación de Flowers et al 2008, Unroofing, incision, and uplift history of the southwestern Colorado Plateau from apatite (U-Th)/He thermochronometry.

fallamiento, plegamiento y denudación. También es posible reconocer los efectos termales que ocasionan la actividad hidrotermal e ígnea y determinar la proveniencia de sedimentos (Zentilli y Reynolds, 1992 en Kelley et al, 2006).

En yacimientos que se han formado a bajas temperaturas como los del tipo Misissippi Valley (50-150 °C), también es posible conocer los efectos termales que causaron los fluidos mineralizantes en el emplazamiento en la roca huésped, desde el sincronismo con la historia termal regional (roca huésped) y hasta la duración de la formación de la mena, gracias a que el rango de temperatura a la que la mena se forma coincide con los rangos termales para el borrado total de las trazas de fisión en apatitos. (Arne et al, 1990).

9.2 APLICACIÓN DE AFTA® EN LA GEOMORFOLOGIA

En áreas tan específicas como la geomorfología el AFTA® puede ayudar a diferenciar cuantitativamente el levantamiento superficial de un levantamiento cortical, y todo esto es posible gracias a que es posible reconstruir las historias termales registradas en los apatitos, que para este caso particular registra las historias de enfriamiento de los levantamientos, expresados en función de las tasas denudacionales, tectónicas (denudación extrema) o erosivas (no identificada aún la tasa que caracteriza este tipo denudacional), sirviendo de puente de comunicación entre la dinámica de la tectónica global y los sistemas superficiales terrestres.

Del mismo modo esta técnica se ha constituido en una herramienta apropiada para registrar eventos de enfriamiento de alta intensidad asociados a procesos tectónicos intensos tales como el proceso de rifting en regiones de estabilidad tectónica como escudos, por eso su gran aplicabilidad en la vecindad de márgenes pasivos y los amplios márgenes de los rift. También es posible con esta herramienta conocer las distintas configuraciones litosféricas con el

tiempo, rupturas litosféricas, engrosamiento cortical, fuerzas dinámicas sublitosféricas y las respuestas isostáticas de todos estos cambios en la litósfera. (Gunell, 2000).

9.3 AFTA® EN LA INDUSTRIA DEL PETROLEO

La reconstrucción de las historias termales que se han dado en el pasado, tienen un impacto directo en el desarrollo de la actividad económica, en el caso de la industria del petróleo este proceso interpretativo ayuda a entender y determinar los elementos de un sistema petrolífero y la prospectividad en cuencas exhumadas, en las cuales, por pruebas empíricas, se tiene certeza que se encuentra concentrada la mayoría de las reservas petrolíferas de un campo, caso contrario al de una cuenca que está subsidiendo continuamente, la distribución de las reservas es más dispersa, donde el 25% de estas, se encuentra en los campos más grandes. (Corcoran, 2005).

Lo anterior es posible, ya que el sincronismo de eventos donde se alcanza las máximas paleotemperaturas registradas dentro de una secuencia sedimentaria que contiene rocas generadoras, generalmente coincide con el máximo pico de generación de hidrocarburos en la secuencia, por lo que un buen control del sincronismo se constituye en un factor crítico en la evaluación prospectiva regional de una cuenca sedimentaria, siendo más prospectiva un sector de la cuenca cuyas estructuras se hayan formado antes de haberse generado el principal pulso de hidrocarburos de la roca generadora que otro sector en la misma cuenca donde las estructuras se hayan formado posterior al tiempo de generación del hidrocarburo. (**Ver fig 9**)

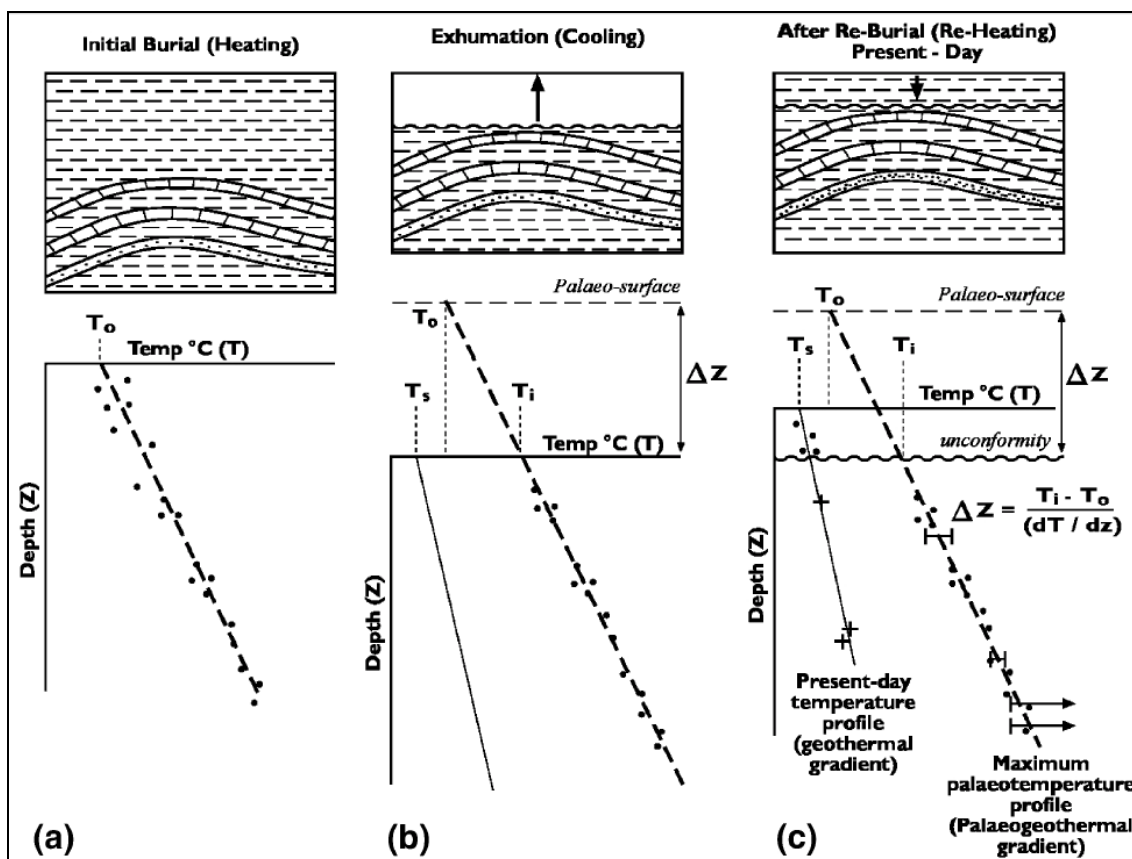


Figura 9. Esquema ilustrativo de la historia termal de una Cuenca reconstruida con la ayuda de termocronómetros. a. Desde la máxima paleotemperatura, b. En el comienzo de la exhumación y c. Configuración de la cuenca en el presente. (Corcoran, 2005)

10. OTROS PALEOTERMÓMETROS:

El tiempo y la temperatura son parámetros esenciales que controlan el comportamiento de un yacimiento petrolífero y su determinación tiene gran importancia en las etapas de generación/expulsión de hidrocarburos de modo se constituyen en factores determinantes en la evolución de la materia orgánica (kerógeno) incluso en la determinación de las trayectorias de migración del Hidrocarburo dentro del mismo yacimiento (Tissot & Welte, 1984). Por tanto en este capítulo se revisan las metodologías que siguen otras técnicas como alternativas y/complementarias a la expuesta en este trabajo para la determinación de máximas paleotemperaturas.

10.1 DETERMINACION DE PALEOTEMPERATURAS A PARTIR DE CONSTITUYENTES INORGANICOS*

Al igual que el AFTA® existen otros paleotermómetros que permiten conocer la temperatura en el pasado geológico y que emplean minerales y/o fluidos (constituyentes inorgánicos*) cuya génesis y/o evolución se conoce varia con la temperatura, pero es difícil por estos medios determinar directamente el tiempo en el que han ocurrido los mayores cambios en dichos constituyentes, lo que hace del AFTA® una herramienta realmente robusta y muy útil en las etapas de exploración de hidrocarburos, si estas se emplean conjuntas los resultados pueden ser complementarios en situaciones donde exista limitaciones (**Fig. 10**). Algunos de los métodos más estudiados y utilizados se mencionan a continuación.

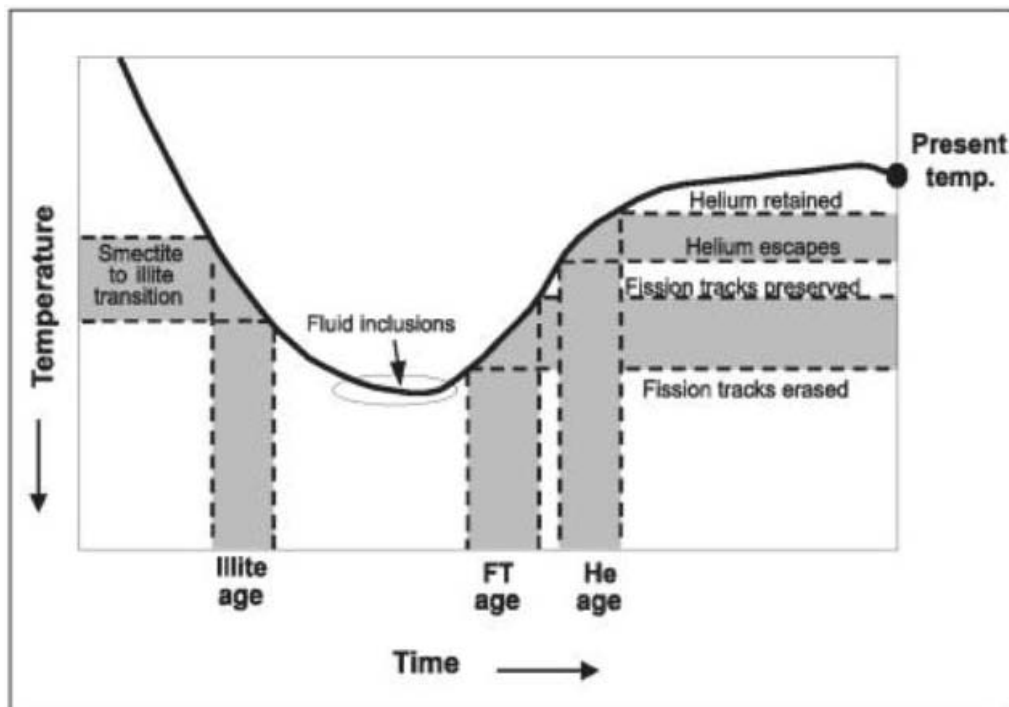


Figura. 10. Diagrama esquemático de una curva de paleotemperatura hipotética medida a partir de varias técnicas con componentes inorgánicos, comúnmente empleadas en la determinación de las máximas paleotemperaturas (Bartolini et al, 2001).

10.1.1 CRISTALINIDAD DE LA ILLITA – SERIES DE TRANSFORMACION SMECTITA A ILLITA.

La serie de la Illita / Smectita, hace parte de una importante serie de transformación de los minerales arcillosos de la cual se tiene muy poca información sobre la cinética que controla los cambios estructurales en estas

arcillas, pero se ha comprobado experimentalmente que esta transformación está controlada por la temperatura. (Fig 11)

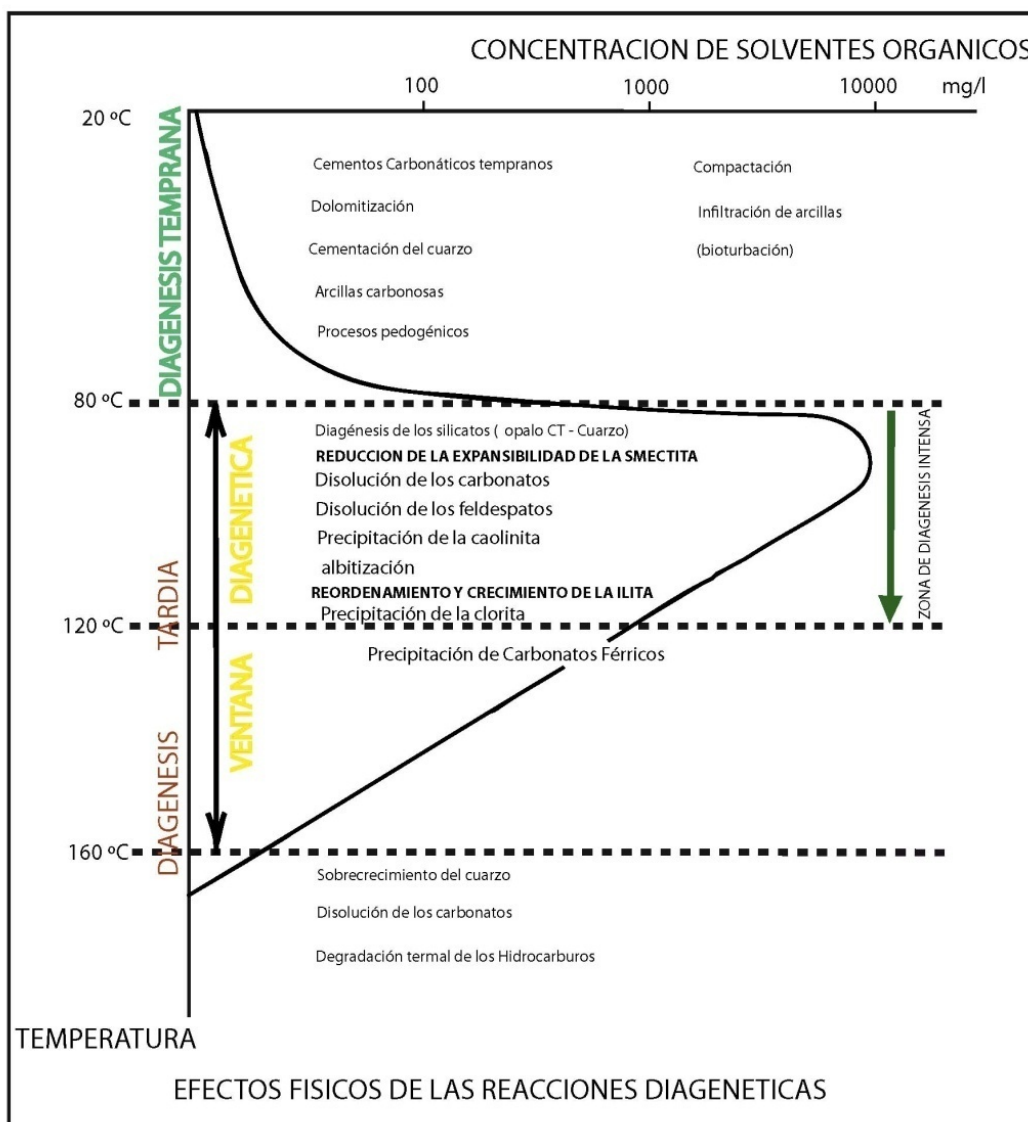


Figura 11. Correlación entre las reacciones diagenéticas y la temperatura.
 Tomada de (Parker, 1995).

De esta manera minerales arcillosos cuya composición es 100% smectita, se va convirtiendo progresivamente en una composición más ílítica con el aumento en la profundidad, lo cual se ve evidenciado en al menos tres etapas de cambios morfológicos y estructurales de los cristales, empezando por una secuencia de cristales desordenados y en forma de hojuelas (100%-50% de smectita), avanzando luego a un ordenamiento de los cristales (50% a casi 0% de smectita) hasta finalizar con cristales hexagonales de illita (Vasseur, 1993), este punto correlaciona con la sobremaduración de la materia orgánica y la generación de gas.

10.1.2 INCLUSIONES FLUIDAS

Por otra parte los fluidos que se encuentran atrapados como pequeñas burbujas dentro de algunos minerales reflejan la naturaleza del medio del cual hacían parte originalmente, entre otras variables es posible conocer la temperatura, la presión, la densidad y la composición del fluido original, esta técnica es conocida como inclusiones fluidas. (Roeder, 1984).

En la determinación de la máximas paleotemperaturas las inclusiones deben cumplir con ciertos requisitos, como haberse formado simultáneamente con el mineral que la hospeda, lo cual refleja las condiciones de crecimiento de dicho mineral (**Fig 12**). Características adicionales que pueden afectar el cálculo de esta máximas paleotemperaturas son la presencia de gas, el tamaño y la forma de las inclusiones, de forma general a mayor tamaño de la inclusión, mayor temperatura se registra y la forma en estas inclusiones se hace alargada debido a que después del entrapamiento esta soporta sobrepresiones internas que superan la resistencia que hace el mineral huésped. (Leischner, 1993)

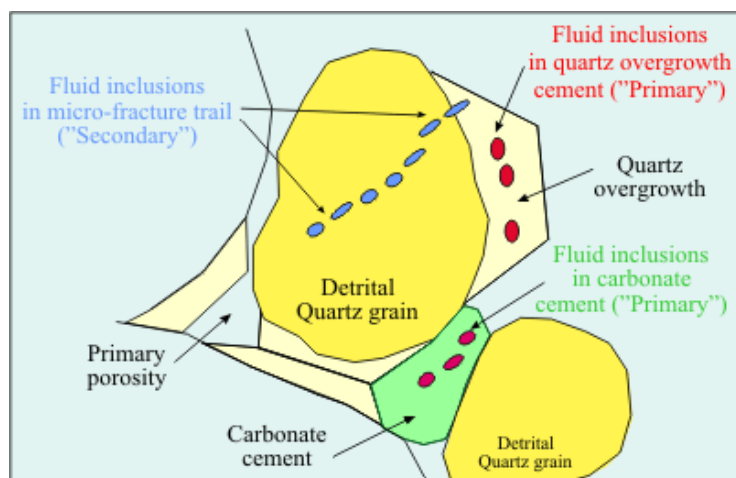


Figura 12. Inclusiones fluidas primarias adecuadas para la determinación de máximas paleotemperaturas. En rojo se muestra las inclusiones que cumplen con los requisitos mínimos para determinar máximas paleotemperaturas.

Tomada de. <http://www.geotrack.com.au/fluidinclusion.htm>



Para la definición de las paleotemperaturas máximas esta técnica presenta algunas limitaciones, ya que no siempre, durante toda la etapa de enterramiento de la roca, los fluidos originales van a quedar atrapados en la roca, por lo tanto la máxima temperatura en una sola muestra puede no estar registrando la máxima temperatura alcanzada por esta roca (Bartolini et al, 2001).

10.1.3 TERMOCRONOLOGIA (U-TH)/HE

Esta novedosa técnica desarrollada por el científico Kenneth Farley en la década en los 90 en el Instituto Tecnológico de California, Caltech, permite ampliar la definición de las temperaturas de cierre por debajo de los 80°C hasta 50°C para el caso de cristales de Apatito (Farley, 2000), lo que la hace el

complemento perfecto al integrarse con otras técnicas como AFTA®, cuya temperatura de cierre está en los 80°C. (Fig 13).

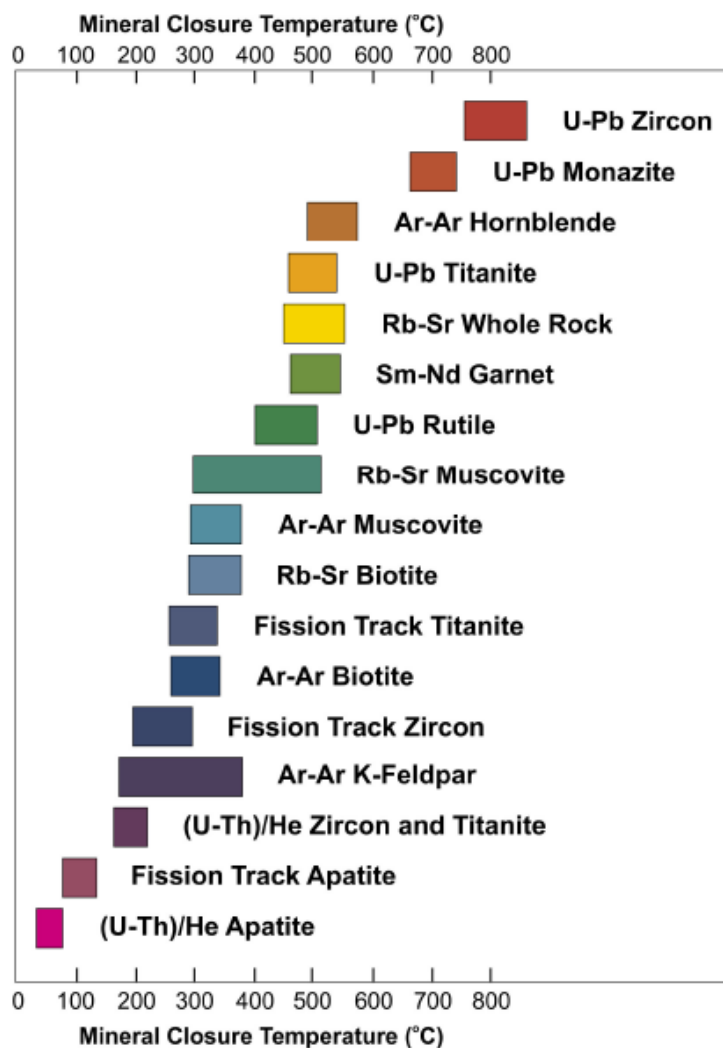


Figura 13. Temperaturas de cierre para varios termocronómetros. Tomada de Lynn, 2005

Esta técnica está basada en la acumulación y difusión del Helio, producto de la desintegración Alpha del Uranio y Torio dentro de los granos de apatito.

Midiendo la cantidad de ^4He radiogénico, y la cantidad de Uranio y Torio presente en el cristal de Apatito, se puede determinar la edad (U-Th)/He, la cual es reseteada progresivamente con el calentamiento, debido a la difusión del Helio, similar a lo que sucede con el borrado total de las trazas de fisión, sólo que la pérdida total del Helio ocurre a temperaturas entre 80°C y 90°C con una duración en tiempo de millones de años. Aunque la termocronología de (U-Th)/He sigue patrones similares en la sistemática, a las del AFTA®, las edades que se obtiene en la primera son mayores que las que se esperan con el análisis de las trazas de fisión para una misma área de estudio, lo cual presenta una inconsistencia ya que debería ser al contrario, las edades más jóvenes deberían ser reportadas con la técnica del (U-Th)/He.

Esto se debe particularmente a cambios en las propiedades de retención del He (retención excesiva), lo cual se puede relacionar con el grado de daños progresivos acumulado que sufre el cristal de Apatito en la formación de las trazas. De esta manera los resultados de edades superiores a 50 Ma con el termocronómetro de (U-Th)/He, es confiable si el contenido de Uranio es menor a 2 ppm. (Green, 2006)

10.2 DETERMINACION DE PALEOTEMPERATURAS A PARTIR DE CONSTITUYENTES ORGANICOS*

Algunas técnicas emplean los constituyentes orgánicos de las rocas generadoras para la determinación de paleotemperaturas. Ejemplos de este grupo son las reconocidas técnicas de la Reflectancia de la Vitrinita, Indices de Alteración Termal (TAI*) y el Índice de Alteración de Conodontes (CAI*).



Figura 14. Correlación de técnicas orgánicas para determinar paleotemperaturas e índices de maduración. (Tomado de Tissot, 1984)

Estos parámetros que indican a su vez la madurez orgánica, tienen la habilidad de conservar el registro de los efectos acumulativos de la temperatura durante toda la evolución de la secuencia sedimentaria, y todos los cambios que se generan pueden sufrir complejas reacciones cinéticas que con cierta frecuencia son poco conocidas, y por lo tanto no podrían ser asociados con un paleotemperatura específica. (Leischner, 1993) (**Fig 14**).

10.2.1 REFLECTANCIA DE LA VITRINITA

La Vitrinita es un constituyente orgánico muy característico de los sedimentos y proviene de las plantas superiores.

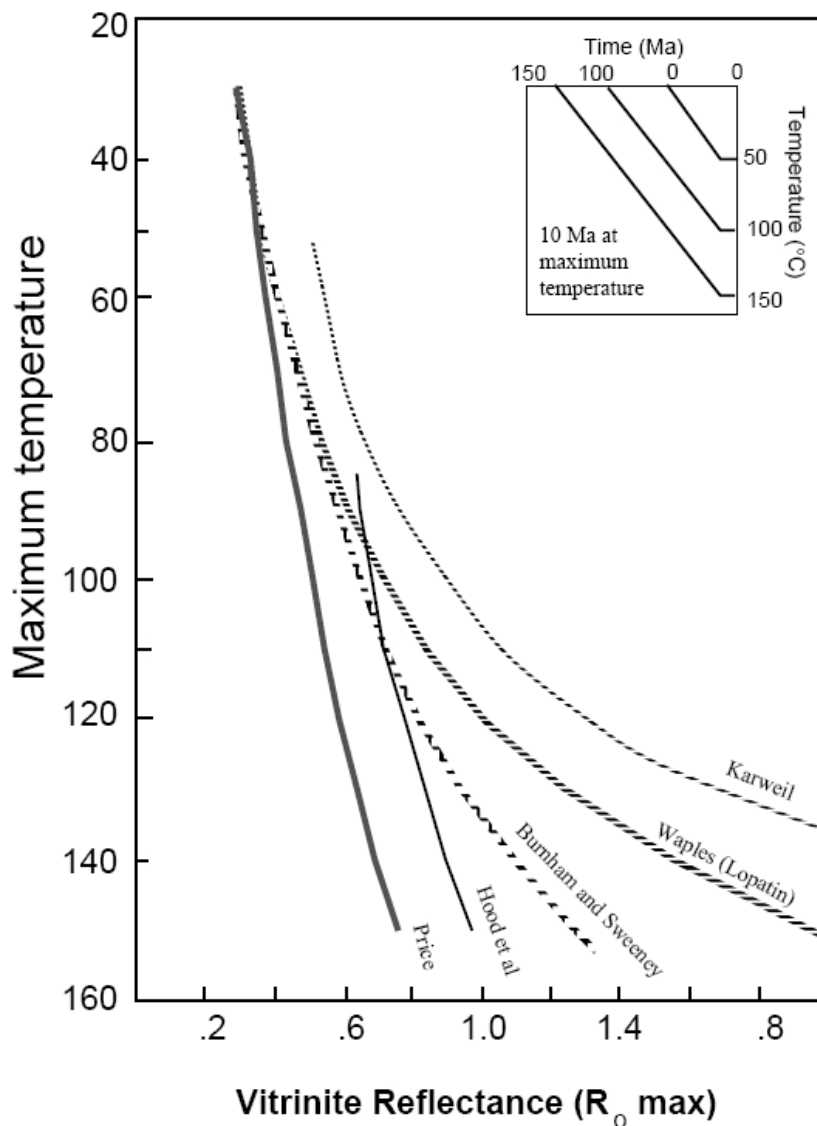


Figura 15. Comparación de varios modelos cinéticos de reflectancia de Vitrinita que relacionan tiempo y temperatura. Nota: El modelo de Price es aplicable sólo para periodos cortos de calentamiento, ninguna dependencia del tiempo contrario a Karweil donde el tiempo es fundamental en su modelo. **Tomada de.** (Informe Interno de Geotrack Internacional, 2008)

La reflectancia de la vitrinita es una medida del rango de carbonización de la materia orgánica (Lopatin 1971; Tissot and Welte 1978), y es de las técnicas más ampliamente usadas y mejor entendidas de los indicadores termales convencionales y que ofrece una descripción cinética bien fundamentada. (Burnham and Sweeney 1989).

La técnica se basa en la medición cuantitativa de la reflexión de la luz e incidente sobre la superficie pulida del Maceral de carbón vitrinita y provee información sobre la madurez termal asociada con la profundidad de enterramiento, pero la relación que existe entre las paleotemperaturas y la reflectancia de la vitrinita no es inmediatamente evidente, cuyo ha entendimiento ha ido evolucionando desde el planteamiento de reacciones sencillas (Modelo de Lopatín 1971) hasta aquellas más elaborados, que tienen en cuenta la cinética y la distribución de la energía de activación. De modo que la utilidad de la Reflectancia de la Vitrinita depende de la escogencia del modelo y de la calibración del mismo (Thronsen, 1993) (**Fig 15**)

10.2.2 INDICES DE ALTERACION DE CONODONTES (IAC)

En muchas formas el índice de alteración de Conodontes es el análogo del al índice de alteración Termal (TAI) y al Índice de Coloración de Esporas (SCI); pero cuyas coloraciones observadas en los Conodontes fósiles reflejan la presencia de máximas paleotemperaturas. Al igual que con el TAI, el IAC es un número arbitrario en una escala numérica, dividida en 8 niveles, según los cambios graduales en el color y la opacidad de los Conodontes con la temperatura. Aunque es una técnica práctica y económica esta no podría ser

utilizada para reconstruir historias termales ya que cada índice de coloración tiene un amplio rango de temperatura asociado. (Ver **Tabla 1**)

Tabla 1. Indices de Alteración en Conodontes y sus correspondientes paleotemperaturas.

CAI	Colour	Palaeotemperature (°C)	Thermal Maturity
1.0	Pale yellow	50–80	Immature
1.5	Very pale brown	50–90	Early-mature
2.0	Brown to dark brown	60–140	Mature
2.5		85–180	Late-mature
3.0	Very dark grey	110–200	Over-mature
3.5		150–260	Over-mature
4.0	Light black	190–300	Partially carbonised
4.5		230–240	Partially carbonised
5.0	Dense black	300–400	Carbonised
5.5	Dark grey–black	310–420	Early volatilisation of carbon
6.0	Grey	350–435	Volatilisation of carbon
6.5	Grey-white	425–500	Late volatilisation of carbon
7.0	Opaque white	480–610	Carbon fully volatilised
7.5	Semi-translucent	> 530	Partially recrystallised
8.0	Transparent	> 600	Recrystallised

Tomado de. (Beardsmore, 2001)

11. ANALISIS DE RESULTADOS

Para reconstruir la historia Termal de la transecta seleccionada en este estudio se analizaron 32 muestras (**Fig 4**) de todas las edades y de todos los tipos de roca (**Fig 16 y 17**), Debido a la confidencialidad de la información, para este trabajo se seleccionaron 6 muestras con los resultados más significativos en términos de edad e interpretación termal. (**Ver Tabla 2**)

Tabla 2. Datos AFTA obtenidos en los laboratorios de Geotrack Internacional

CÓDIGO GEOTRACK	CÓDIGO GEMS	EDAD ESTRATIGRÁFICA (MA)	LONGITUD DE LAS TRAZAS PROMEDIO	LONGITUD DE LAS TRAZAS PROMEDIO PREDICHAS	EDAD DE LAS TRAZAS DE FISIÓN (MA)	EDAD DE LAS TRAZAS DE FISIÓN PREDICHA. (MA)
GC996-7	Δ16-CJ-Tpl-1	65-56	12.03 ± 0.20	14.60	63.7 ± 4.1	60
GC996-21	Δ36-CJ-Kita-1	145-135	12.77 ± 0.58	14.51	71.4 ± 13.8	138
GC996-20	Δ35-CJ-Qetl-1-2	1.8-0	12.78 ± 0.27	15.16	14.3 ± 2.0	1
GC996-37	Δ51-CJ-Pds-01	542- 444	13.32 ± 0.43	14.36	15.7 ± 1.7	481
GC996-41	Δ65-CJ-Pcb-01	>680	13.91 ± 0.58	14.17	18.1 ± 3.0	654
GC996-27	Δ46-CJ-TRb-01	251 - 200	11.35 ± 0.74	14.39	46.0 ± 6.6	220

*1. Fuentes bibliográficas para las edades estratigráficas:

Formación Lisama, Gómez (2005). Formación Tambor, (). Formación Bocas, (Remy, 1975. Toussaint 1993 en Gélvez 2006). Formación Silgará. Neis de Bucaramanga, Goolsmith et al 1971.

*2 Los valores predichos resultan de la Historia Termal por Defecto, asumiendo que todas las muestras están en su temperatura máxima desde su depositación y se refieren sólo a las trazas formadas después de la depositación, aunque pueden contener trazas heredadas de otros sitios de aporte de sedimento.

En esta tabla se resumen los datos de longitudes promedio de las trazas de fisión con su respectiva edad, estas medidas los cuales son comparados posteriormente con los valores predichos en la historia termal por defecto.

A manera de ejemplo sobre qué hacer con los datos de la tabla 1, se procede a realizar una inspección cualitativa, como resultado se evidencia con la edad de las trazas de fisión, y no tanto con las longitudes de las trazas de fisión, que las muestras que corresponden a las edades cretácicas (Formación tambor) y más antiguas (Neis de Bucaramanga y las formaciones Silgará y Bocas) han experimentado temperaturas más altas en el pasado, esto es deducible gracias a que la edad predicha por la Historia Termal por Defecto es mayor a la edad que resulta de hacer las mediciones. Para referencia la edad de las trazas de fisión de la Formación Tambor es de (71.4 ± 13.8 Ma), la cual es mayor que su edad predicha (138 Ma). Por el contrario la formación Lisama y la terraza de Bucaramanga, están siendo sometidas a las paleotemperaturas máximas desde el momento en que se depositaron, ya que las edades predichas por la Historia Termal por Defecto es menor a la edad que resulta de hacer las mediciones, y esto implica temperaturas máximas en el presente. Para referencia la edad de las trazas de fisión de la Formación Lisama es de (63.7 ± 4.1 Ma), la cual es mayor que su edad predicha (60 Ma).

Ahora bien si comparamos la edad de las trazas de fisión con la edad estratigráfica podremos determinar el origen de estas, es decir si los procesos de fisión se dieron en la cuenca donde se depositaron, o si provienen por el contrario fueron trazas que ya se habían formado en otros terrenos.

Según esta observación si la edad de las trazas de fisión indica edades iguales o superiores a la edad estratigráfica, evidencia la huella de proveniencia de sedimentos y por lo tanto estaría revelando historias termales post-deposicionales, externas a la actividad sedimentaria de la cuenca. Este es el caso de la formación Lisama y de la terraza de Bucaramanga, cuyas edades en las trazas de fisión son iguales o superiores su edad estratigráfica. Las formaciones cretácicas y más antiguas exhiben un patrón diferente en este ejercicio comparativo y las edades de las trazas de fisión resultan siempre inferiores a la edad estratigráfica, lo que implica que la gran mayoría de las trazas de fisión en estos granos de apatito se generaron en el ambiente original en el que se depositó la unidad.

11.1 IDENTIFICACION DE LOS EPISODIOS PALEOTERMALES

La interpretación cuantitativa de los datos AFTA® resumidos en la **tabla 2**, los cuales presentan detalles sobre la paleotemperatura máxima y la edad del enfriamiento, que son parámetros que se pueden establecer en un número de discretos de episodios termales según los datos obtenidos, que se obtuvieron utilizando software propiedad de Geotrack Internacional, que compara los parámetros AFTA® predichos o modelados en varios escenarios de historia termal (Edad, distribución de longitudes y variación en el contenido de Cl), con los valores medidos, definiendo de esta manera el rango de condiciones para los cuales tales predicciones corresponden con los datos medidos con un 95% de confianza. (Sección **8.6.3**)

Los datos AFTA® obtenidos por el modelamiento, se obtuvieron teniendo en cuenta algunas consideraciones, necesarias para reconstruir los episodios termales. La temperatura en el presente se asume de 20°C, la tasa de calentamiento para las muestras es de 1°C/Ma y la de enfriamiento es de 10°C/Ma. Los números que están en cursiva representan eventos deducidos pero que no son requeridos por los datos AFTA. Adicionalmente los valores de equivalencia para la Reflectancia de la Vitrinita fueron calculados a partir de las paleotemperaturas máximas derivada de los datos AFTA® utilizando la descripción cinética de Burnham and Sweeney (1989).



Tabla 2. Datos obtenidos del modelamiento AFTA®, empleando software propietario de la empresa Geotrack Internacional.

CÓDIGO GEOTRACK	CÓDIGO GEMS	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	EDAD ESTRATIGRÁFICA (MA)	PALEOTEMPERATURA MÁXIMA (°C)	COMIENZO DEL ENFRIAMIENTO (MA)	PICO DE PALEOTEMPERATURA (°C)	COMIENZO DEL ENFRIAMIENTO (MA)	EQUIVALENCIA EN RV (%)
996-7	Δ16-CJ-Tpl-1	Lisama	65-56	(100-110)	80 to 45)	70-80	20 to 6	(0.61-0.66) ó 0.42-0.48
996-20	Δ35-CJ-Qetl-1	Terraza de Bucaramanga	1.8-0	(>105)	35 to 12)	(90-105)	12 to 6)	<0.57
996-21	Δ36-CJ-Kita-1	Tambor	145-135	>115	85 to 55	50-90	50 to 0	>0.69
996-27	Δ46-CJ-Trb-01	Bocas	251-200	-	-	>95	60 to 6	>0.57
996-31	Δ51-CJ-Pds-01	Silgara	542-416	>120	40 to 9	<120	9 to 0	>0.73
996-33	Δ53-CJ-Pcb-01	PreCamb	"600"	>105	25 to 9	40-95	13 to 0	>0.57

Los episodios termales se pueden deducir a partir de las muestras individuales que muestran el comienzo del enfriamiento. De esta manera los datos AFTA® revelan un episodio termal post-deposicional, Cuyo enfriamiento ha comenzado a evidenciarse en el intervalo comprendido entre 20 Ma y 6 Ma. (Fig 16)

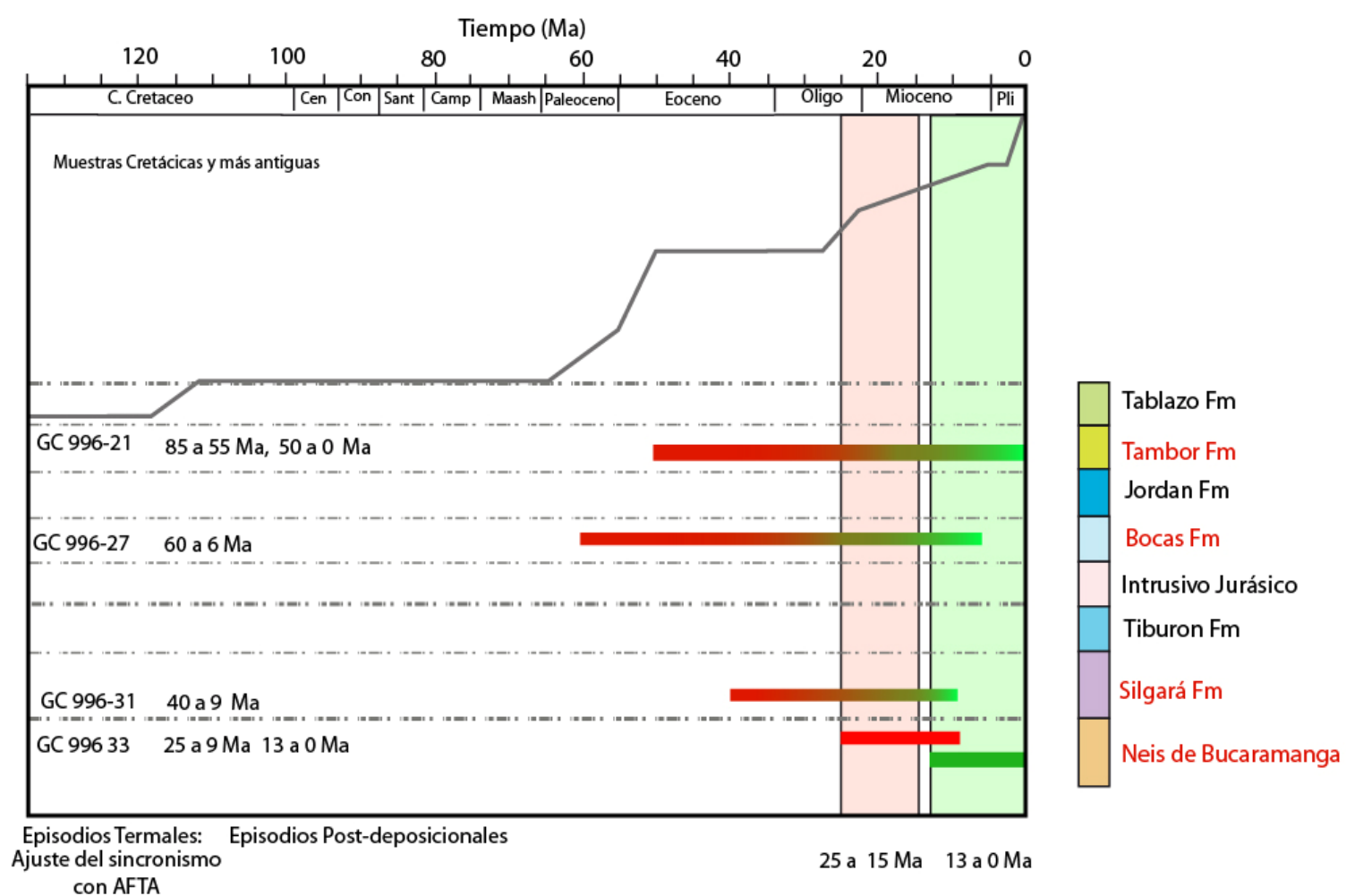


Figura 16. Figura resumen de los episodios termales registrados en las muestras cretácicas y más antiguas. En letras rojas se encuentran las muestras seleccionadas en este estudio.

Adicionalmente otro evento se puede observar en la terraza de Bucaramanga, el cual indica episodios de proveniencia, en un intervalo de tiempo que va desde los 12Ma a los 6 Ma, sucedido a comienzos del Mioceno. (**Ver fig 16**). La formación tambor, Bocas exhiben un episodio entre 50 y 60 Ma en el Paleoceno y las muestras más antiguas de las seleccionadas para este trabajo, el Neis de Bucaramanga y la Formación Silgará, exhiben un episodio mucho más joven entre 9 y 12 Ma, es decir desde Mioceno medio hasta el presente. (**Fig 16 y Fig 17**).

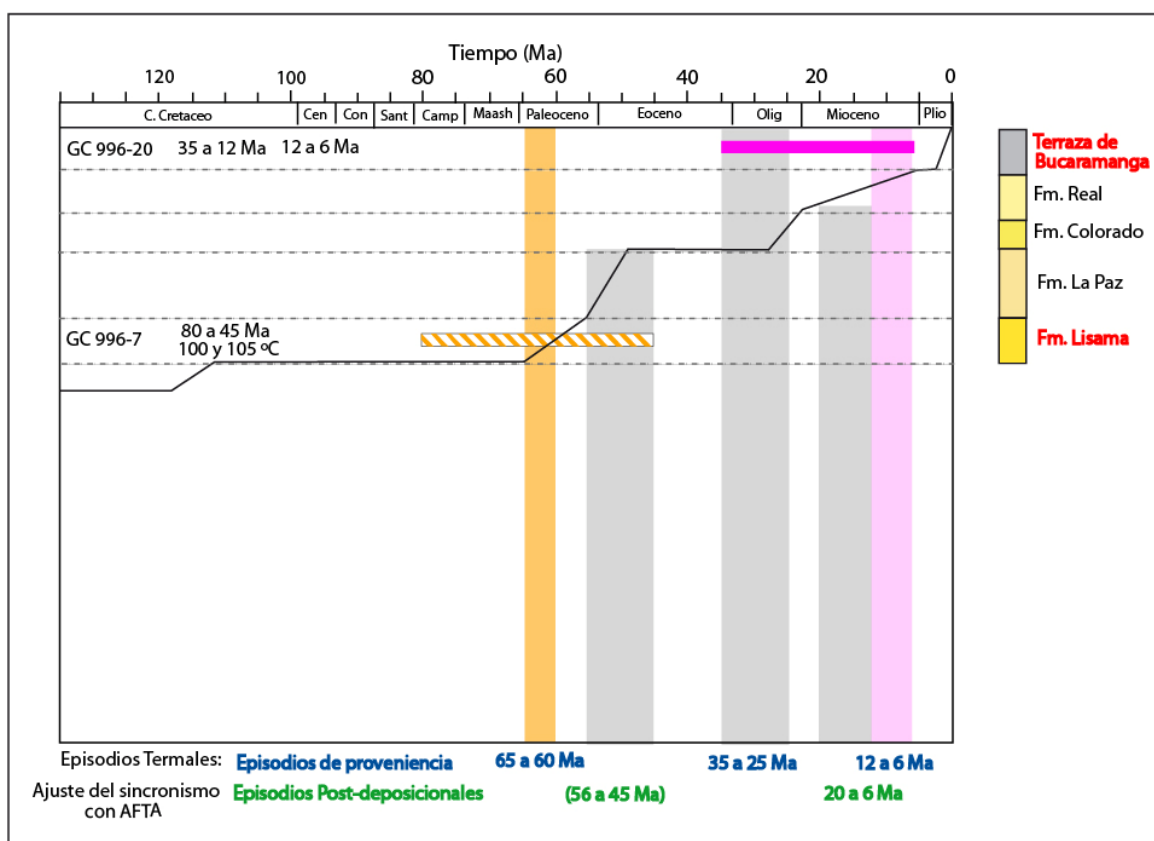


Figura 17. Figura resumen de los episodios termales registrados en las muestras Terciarias, hasta el presente. En letras rojas se encuentran las muestras seleccionadas en este estudio.

En resumen se han determinado 3 episodios termales con las muestras seleccionadas un evento definitivo a finales del Mioceno, otro en el Paleoceno y otro evento relacionado con un evento de proveniencia, registrado en la terraza de Bucaramanga y posiblemente el Neis de Bucaramanga, esté registrando este mismo evento, y esto sería una buena señal para afirmar que los sedimentos de la terraza provienen en gran parte del Macizo de Santander.

11.2. RECONSTRUCCION DE LA HISTORIA TERMAL PARA CADA MUESTRA SELECCIONADA.

Neis de Bucaramanga ($\Delta 53$ -CJ-Pcb-01) - (GC 996-33)

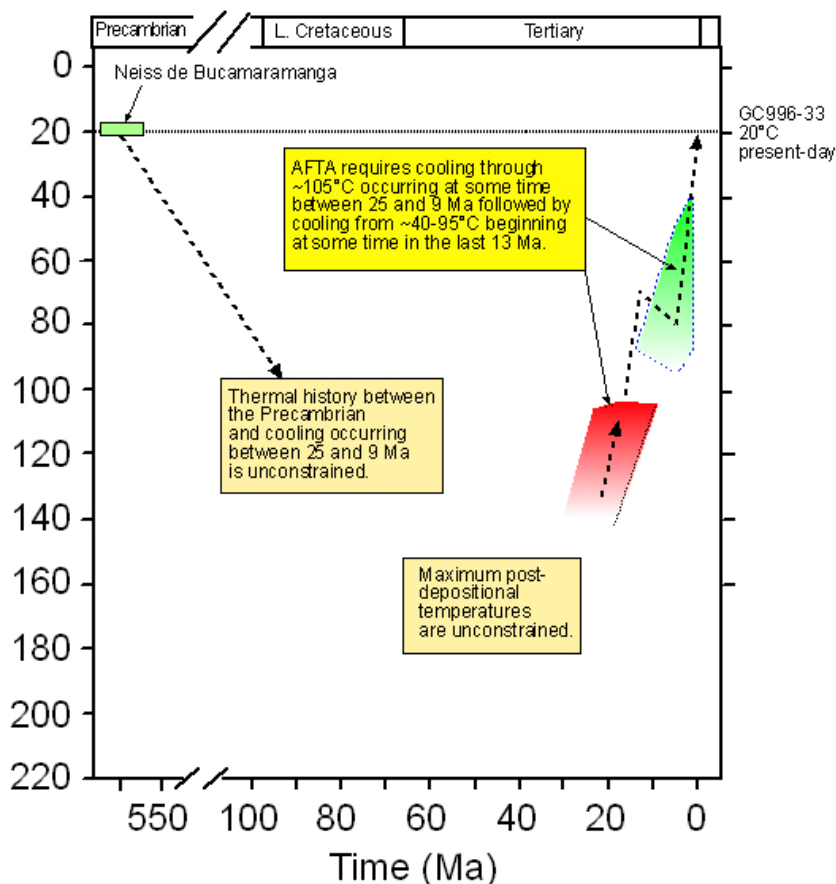


Figura 18. Los datos AFTA® para esta muestra pueden ser explicado por un escenario que incluye dos episodios, el más antiguo se caracterizada por la paleotemperatura máxima que alcanzó el Neis, no se alcanza a registrar y el comienzo del enfriamiento está alrededor de los 105°C y ocurrió entre 25 y 9 Ma, toda la historia termal desde el Precámbrico hasta que se alcanza la paleotemperatura máxima es borrada, incluyendo las temperaturas post-deposicionales. Posteriormente se registra un episodio más joven que registra una paleotemperatura entre los 40 y 95°C en alguna época en los últimos 13 Ma.

Formación Tambor ($\Delta 36$ -CJ-Kita-1) - (GC- 996-21)

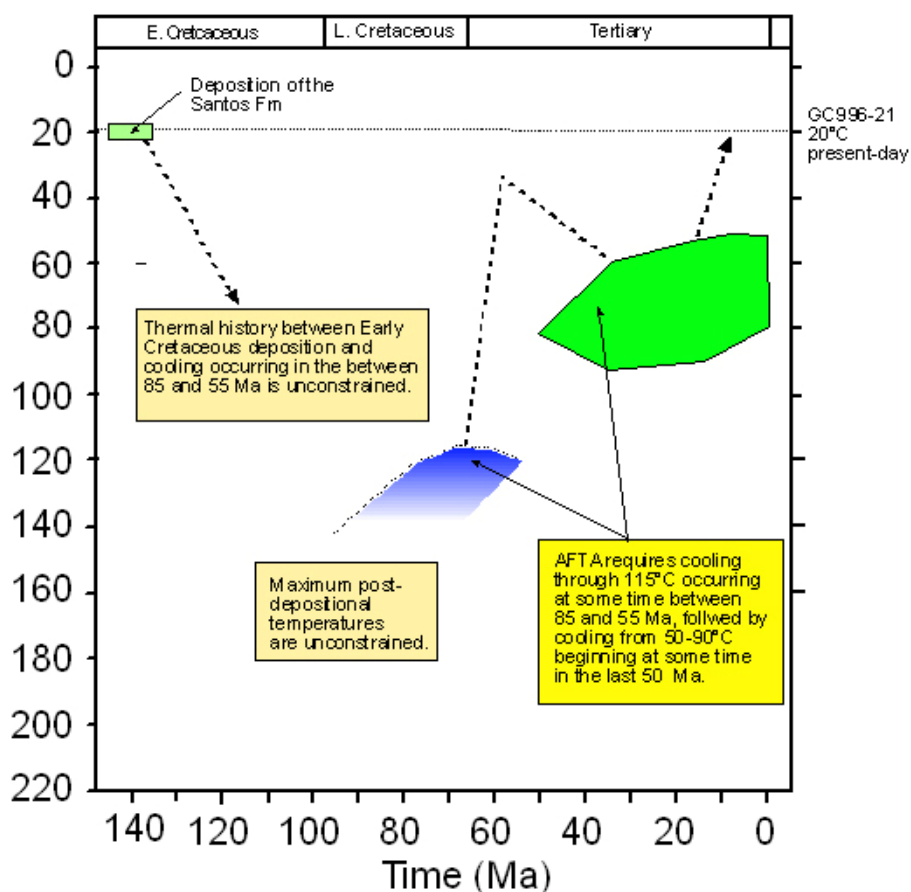


Figura 19. La paleotemperatura máxima no se alcanza a registrar y está por encima de los 115 °C, a partir de esta temperatura comienza el enfriamiento en algún tiempo entre 85 y 55 Ma, posterior a esto se encuentra una segunda paleotemperatura que no es la máxima entre 50 y 90 °C y el cual comienza en los cualquier periodo de tiempo en los últimos 50 Ma.

La Terraza de Bucaramanga ($\Delta 35$ -CJ-Qetl-1) - (GC 996-20)

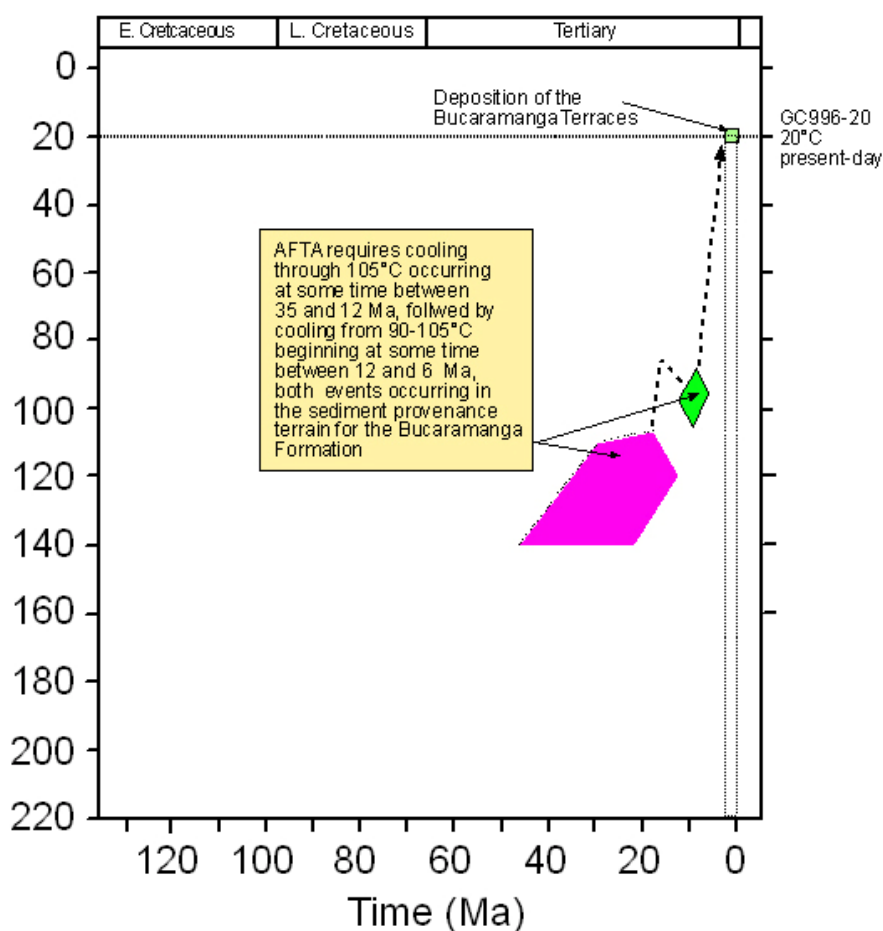


Figura 20. En esta gráfica se evidencia la presencia de trazas heredadas de algún terreno, ya que los registros de temperatura son anteriores a la depositación de la terraza. Aquí no se aprecia la paleotemperatura máxima, pero se sabe que en algún tiempo entre los 35 y 12 Ma comenzó a enfriarse esta unidad, seguido de un segundo periodo de enfriamiento entre los 12 y 6 Ma, con unas temperaturas alcanzadas entre 90 y 105 °C.

La Formación Lisama ($\Delta 16\text{-CJ-Tpl-1}$) – (GC 996-7)

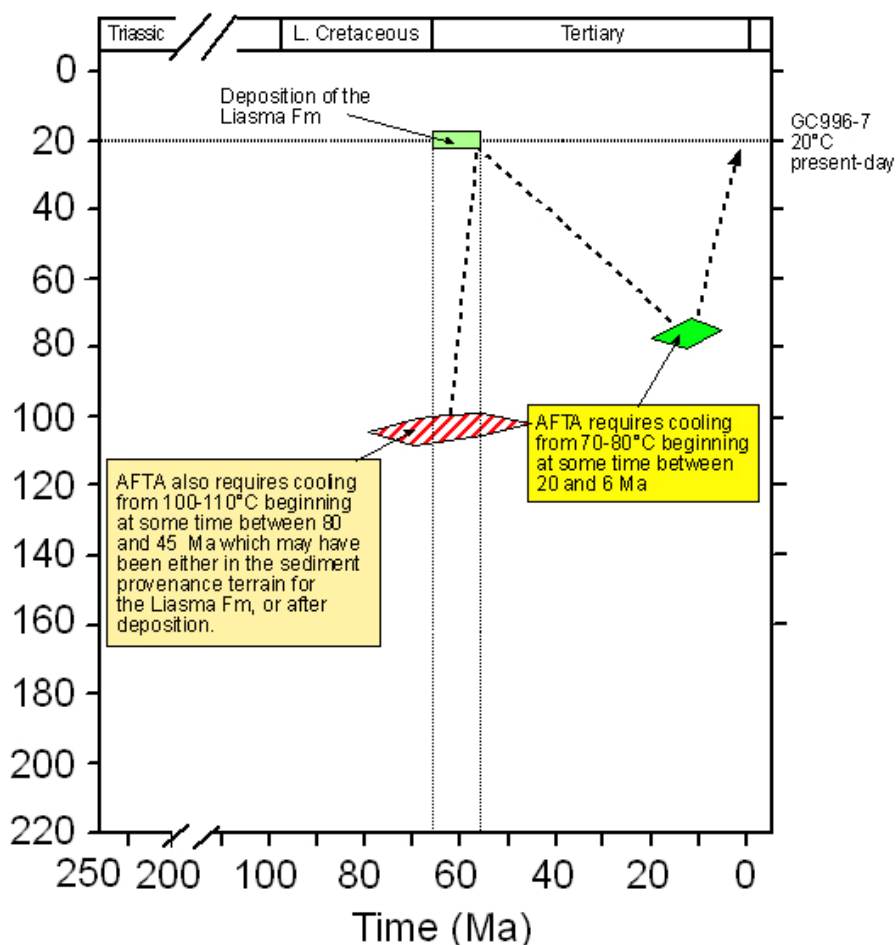


Figura 21. En la muestra de Lisama se registra evidencias de proveniencia entre los 80 y 45 Ma, cuyo enfriamiento comienza entre los 100 y 110 °C, pero también puede contener trazas formadas en la cuenca después de la depositación.

También hay evidencias de un evento de enfriamiento más joven entre los 20 y 6 Ma, a partir de los 70 y 80 °C.

La Formación Bocas ($\Delta 46$ -CJ-Trb-1) – (GC 996-27)

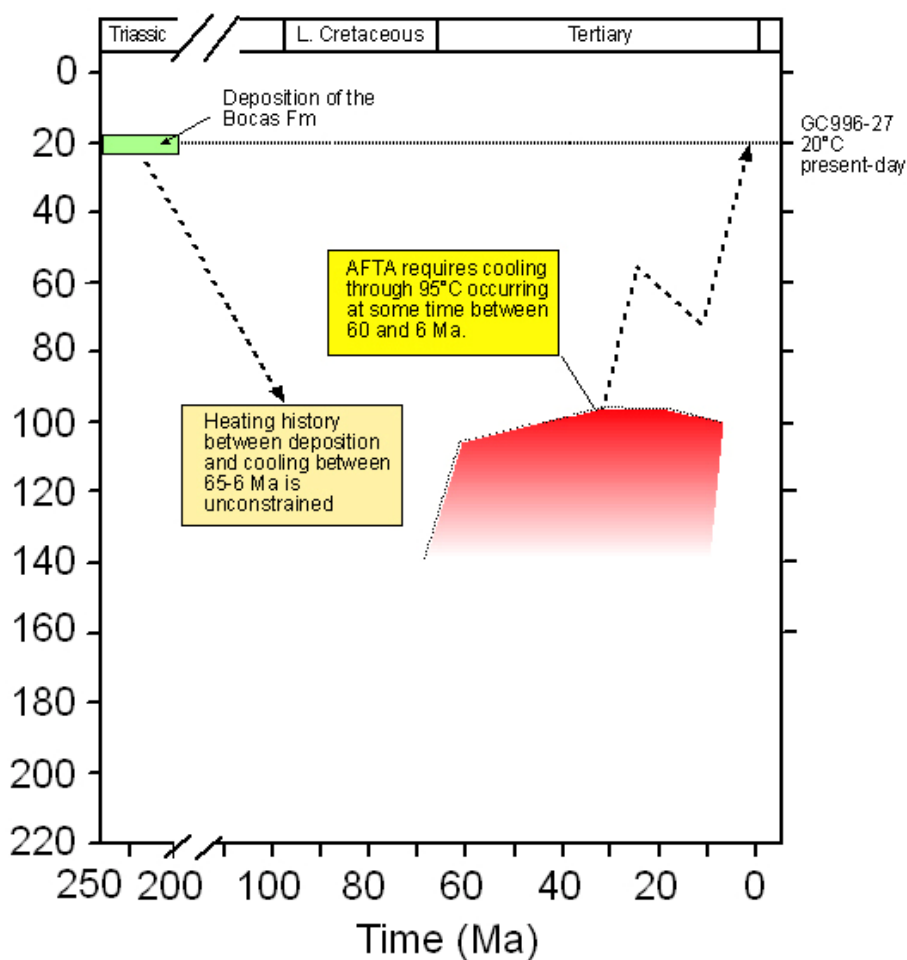


Figura 22. La formación Bocas registra evidencias de enfriamiento desde los 95 °C, cuyo enfriamiento comienza entre los 60 y 6 Ma, además entre la depositación y el periodo de enfriamiento no hubo registro de trazas, la muestra estuvo sometida a más de 125 °C.

La Formación Silgará ($\Delta 51$ -CJ-Pds-01) – (GC 996-31)

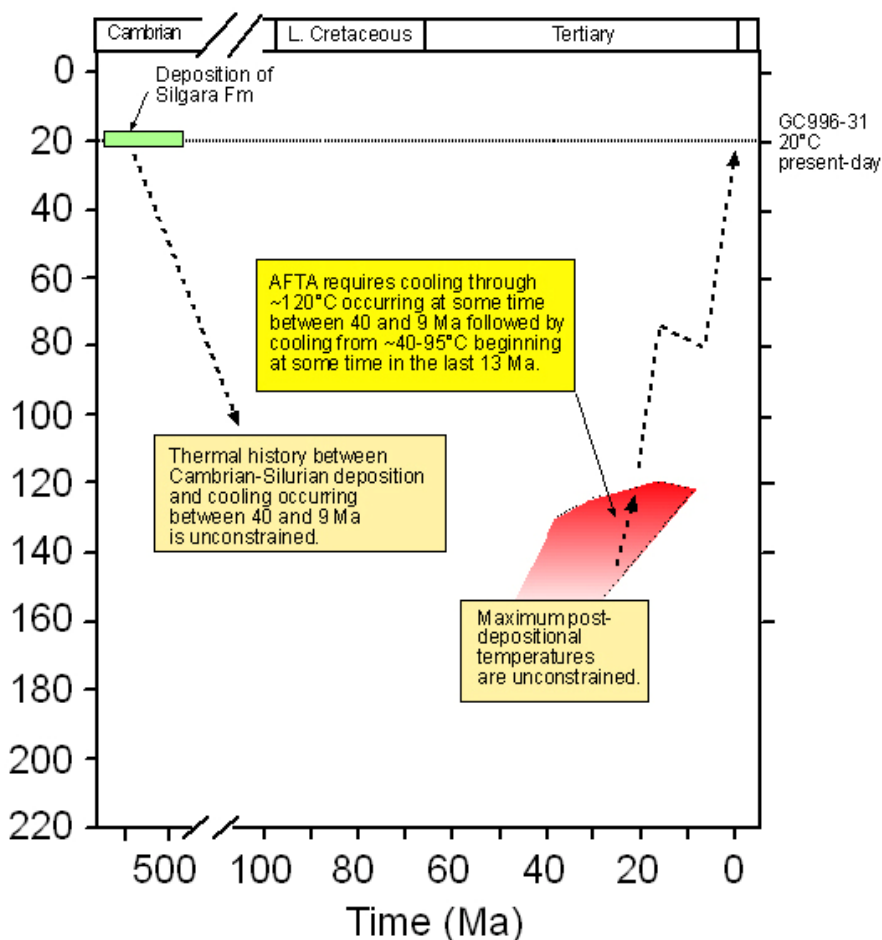


Figura 23. Esta muestra registra dos eventos de enfriamiento, el primero de ellos ocurrido entre los 40 y 9 Ma, a partir de una paleotemperatura máxima de 120 °C. El evento más joven ocurrió en los últimos 13 Ma, el cual registró un pico termal entre 40 y 95 °C temperatura a la cual comenzó el evento más reciente.

12. CONCLUSIONES

1. Con Parámetros medibles y modelables, se lograron identificar 2 eventos termales de enfriamiento sucedidos a finales del Mioceno asociados al levantamiento de la Cordillera Oriental, como lo sugieren los resultados de la Formación Tambor, y otro episodio termal asociado
2. con la proveniencia de los sedimentos de la terraza de Bucaramanga, cuyo sitio de aporte parece ser el Macizo de Santander (Muestra Neis de Bucaramanga). La formación Lisama también revela rasgos de proveniencia lo cual parece indicar que los sedimentos podrían tener su origen en la Cordillera Central que para esa época se comportaba como un único frente montañoso en una Cuenca tipo Antepais. (*Foreland Basin*).
3. Los resultados de este trabajo muestra que al parecer los efectos termales del levantamiento del Mioceno registrado en las muestras Silgará y Neis de Bucaramanga, continúan manifestando actividad aún en épocas recientes como lo sugieren los enfriamientos sucedidos desde los 13 Ma hasta el presente. Lo anterior sugiere que en épocas posteriores al Mioceno existe la posibilidad de nuevas estructuraciones y trampas asociadas a estos levantamientos recientes.
4. Es necesario ajustar los episodios termales con tantas muestras como sea posible, en caso contrario se tendrían resoluciones termales con alta incertidumbre como la que se muestra en la figura 16, en la carta de eventos termales sucedidos desde terciarios hasta el presente.

5. Los episodios termales del Cretácico Inferior sugieren que entre los 85 y 55 Ma, la secuencia de rocas generadoras detuvo el proceso de generación de hidrocarburos por causa del levantamiento de esta sección lo que impidió además que las rocas generadoras alcanzaran la temperatura apropiada para entrar a la ventana de generación, cuyo enfriamiento comenzó a partir de los 115°C, (**Fig. 19**).

13. RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios complementarios empleando otras técnicas aquí mencionadas para un futuro, que puedan complementar el conocimiento de historias termales particulares que no sea posible recocer con AFTA y de esta manera generar un mejor entendimiento de los procesos que alguna vez fueron activos en el pasado geológico de esta región.
2. Muestras tan recientes como la terraza de Bucaramanga, pueden registrar historias termales de los terrenos de los cuales provienen los sedimentos, por eso se recomienda incluir muestras de estos sedimentos no consolidados para ajustar mejor el estudio de los episodios termales registrados a lo largo del tiempo geológico (**Fig 20**). como referencia se podría tomar como ejemplo para Colombia, los resultados de este trabajo y la publicación que de aquí se derive.

14. BIBLIOGRAFIA

Recursos en Internet:

<http://www.geotrack.com.au/>

Geotrack International, Intern Report, 2008

Arne, D.C., Green, P.F., and Duddy, I.R. (1990). Thermochronologic constraints on the timing of Mississippi Valley-type ore formation from apatite fission track analysis. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 17, 319-323.

Bartolini, C., Richard T. B, y A. Cantu-Chapa, (2001); The Western Gulf of Mexico Basin – Tectonics, Sedimentary Basins, and Petroleum Systems. AAPG Memoir 75, Tulsa, 480 pages.

Beardsmore, G.R., Cull, J.P., (2001); Crustal heat flow: a guide to measurement and modeling; Cambridge, UK ; New York : Cambridge University Press

Burnham, A.K , Sweeney, J.J., (1989); A chemical kinetic model of vitrinite reflectance maturation. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 53, 2649-2657.

Cooper, M. A , et al ,(1995), Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, AAPG Bulletin, V. 79, No. 10, P. 1421–1443.

Corcoran, D.V & Dore, A.G. (2005) A review of the techniques for the estimation of magnitude and timing of exhumation in offshore basins, *Earth-Science Reviews*, vol. 72, issue 3-4, pp. 129-168.

Dengo, C.A., Covey, M.C.,(1993). Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for Trap Styles and Regional Tectonics. AAPG Bulletin Vol 77, p.1315-1337.

Donelick R.A., O'Sullivan P.B , Ketcham R. A, (2005); Apatite Fission-Track Analysis; Reviews in Mineralogy and Geochemistry 2005 58: 49-94.

Farley, K, (2000); (U-Th)/He Dating: Techniques, Calibrations, and Applications, Mineral. Soc. An. Rev. Mineral. Geochem. 47, 819-844.

Fleischer R.L, Price P. B, Walker R. M.,(1975); Nuclear Tracks in Solids. Berkeley: Univ. Calif. Press. 605 pp.

Gallagher et al, (1998); Fission Track Analysis and its Applications to Geological Problems; *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 26:519–72

Gómez, E., Jordan, T., Allmendinger, R.W., y Cardozo, N. (2005a). Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 117 (9-10): 1272-1292;

Gómez, E., Jordan, T., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., y Kelley, S. (2005b). Syntectonic cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena valley basin of Colombia and implications for exhumation of the northern Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 117 (5-6): 547–569.

Gélvez, J. (2006), Geochemistry of Jurassic-Early Cretaceous clastic sediments from the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia: Provenance and Tectonic implications, Tesis de Maestría, Shimane University

Green, P, (2006); AFTA today; Ontrack (*The Newsletter of the International Fission-Track Community*); V.5, n.2:8-10

Green, P, (2006); Measuring Wt% Cl to Assess and allow for Variation in Fission Track Annealing rates between different Apatite species; Ontrack (*The Newsletter of the International Fission-Track Community*); V.14, n.1:20-29

Green, P. F., Duddy, I. R., Gleadow, A. J. W., Tingate, P. R. y Laslett, G. M, (1986) "Thermal Annealing of Fission Tracks in Apatite 1. A Qualitative Description", Chem. Geol., 59, 237-253.

Green, P.F, Crowhurst, P.V, Duddy, I. R, P. Japsen, Holford, S.P; (2006); Conflicting (U–Th)/He and fission track ages in apatite: Enhanced He retention, not anomalous annealing behavior; Earth and Planetary Science Letters 250 (2006) 407–427

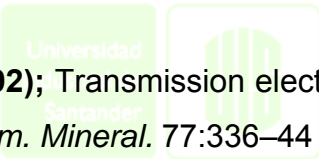
Gunnell, Y,(2000); Apatite fission track thermochronology: an overview of its potential and limitations in geomorphology, Basin Research, Vol 12, p 115-132

Kelley, D, et al, (2006), Beyond the obvious limits of Ore Deposits: The use of Mineralogical, Geochemical, and biological Features of the Remote Detection of Mineralization, Economic Geology, Vol 101, p 729-752.

Leischner, K., D. H. Welte, and R. Littke, (1993); Fluid inclusions and organic maturity parameters as calibration tools in basin Modeling, in A. G. Doré, J. H. Augustson, C. Hermanrud, D. J. Steward, and O. Sylta, eds., Basin Modelling: Advances and Applications: Special Publication, v. 3: Elsevier, Amsterdam, Norwegian Petroleum Society, p. 161-172.

Lynn, G, (2005); Macrogeomorphology and erosional history of the postorogenic Pyrenean mountain belt, Tesis de Doctorado, University of Edinburgh

Morton A.C. 1984. Stability of detrital heavy minerals in Tertiary sandstones of the North Sea Basin. *Clay Minerals* **19**, 287-308.



Paul T, Fitzgerald PF., (1992); Transmission electron microscope investigation of fission tracks in apatite; *Am. Mineral.* **77**:336–44

Parker, A, (1995); Quantitative diagenesis : recent developments and applications to reservoir geology, Springer Verlag

Royero, J.M, Clavijo J. (2001); Mapa geológico generalizado departamento de Santander, Memoria Explicativa, publicaciones Ingeominas.

Sarmiento, L.F.,(2001), Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 295 p

Throndsen, T, Andresen, B., Unander, A.; (1993); Comparison of different models for vitrinite reflectance evolution using laboratory calibration and modeling of well data, in A. G. Doré, J. H. Augustson, C. Hermanrud, D. J. Steward, and O. Sylta, eds., Basin Modelling: Advances and Applications: Special Publication, v. 3: Elsevier, Amsterdam, Norwegian Petroleum Society, p. 127-133.

Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, B.J., Restrepo, A.H., (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. Boletín Geológico, Vol. 21, p. 1-34.

Zentilli, M, Reynolds, P. H, (1992); Short Course handbook on Low temperature Termochronology; Mineralogical Association of Canada, V 20

15. ANEXOS

ANEXO 1. Descripción Macroscópica de las muestras recolectadas en campo.

ANEXO 2. Catálogo de afloramientos de las secciones en las cuales se tomaron muestras.



ANEXO 1



Nº Muestra	CÓDIGO	COORDENADAS			UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
		ESTE (KM)	NORTE (KM)	ALTURA (M)		
1	D1-CJ-Ksi-1	1303314	1119415	1647	F. La Luna	caliza con materia orgánica y contiene fósiles. Presenta olor a hidrocarburo. Contiene pirita
2	D2-CJ-Kis-1	1302105	1117585	1625	F. Simiti	caliza Fosilífera, contiene poca materia orgánica y un leve olor a hidrocarburo
3	D3-CJ-Kit-1	1300607	1116696	1585	F. Tablazo	Arenisca de grano medio a bajo de color verdosa, ferruginosa y diaclasada, presenta estratificación. AFTA
4	D4-CJ-Pds-1	1299664	1116375	1553	F. Silgará	Esquisto micáceo oxidado, es una cantera abandonada. AFTA
5	D5-CJ-Kit base-1	1299400	1116328	1498	F. Tablazo - Base	Afloramiento altamente meteorizado, base del tambor- contacto con el Jordán
6	D6-CJ-Jj-1	1299298	1116236	1489	F. Jordan	El afloramiento no se encuentra compacto, es de color rojo a pardo, es el Techo del Jordán
7	D7-CJ-Jj-1	1299146	1116190	1483	F. Jordan	El afloramiento se encuentra altamente fracturado y no se encuentra compacto, AFTA
8	D8-CJ-Kit-1	1298623	1116243	1462	F. Tablazo	presenta espesores de hasta 10 Cm. AFTA
9	D9-CJ-Kir-1	1298197	1116307	1462	F. Rosablanca	Calizas masivas oscuras con cristales de calcita blancos, espesores hasta de 30 Cm, presenta venillas de calcita.
10	D10-CJ-Kita-1	1296953	1116264	1405	F. Tambor	Arenisca de grano fino, presenta estratificación cruzada con espesores de 35 a 40 Cm, se encuentra altamente diaclasado, AFTA

Muestras Analizadas en Geotrack Int.

Nº Muestra	CÓDIGO	COORDENADAS			UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
		ESTE (KM)	NORTE (KM)	ALTURA (M)		
11	D11-CJ-JTRcg-1	1296932	1116859	1455	Intrusión ígnea	cuarzo monzonita y granito, gris claro a rosado
12	D12-CJ-PEb-1	1286857	1110349	943	F. Silgará	Afloramiento altamente meteorizado con presencia de diques.
13	D13-CJ-XX-1	1284872	1057661	150		El afloramiento aparece en el sitio conocido como la casajera en que la panamericana conduce a Aguachica cerca de la planta de asfaltos.
14	D14-CJ-XX-1	1294692	1056736	143		El afloramiento no se encuentra muy compacto, esta muy meteorizado, su color toma tonalidades del naranja,
15	D15-CJ-Tpl-1	1281092	1059512	180	F. Lisama	Areniscas impregnadas con hidrocarburos intercalados con shale delgados R N12E y B 88SE. Al frente del afloramiento existe un rezumadero(1281082,1059519,180) AFTA
16	D16-CJ-Tpl-1	1280873	1060296	175	F. Lisama	Arenisca con marca de corrientes con estratificación cruzada, tenía un muy pequeño rezumadero. AFTA.
17	D17-CJ-Tel-1	1280620	1060826	183	F. La Paz	Afloramiento de lodolitas bastante trituradas, zona de cizalla
18	D18-CJ-Tel-1	1277465	1072813	207	F. la Paz	Niveles potentes de lutitas grises, espesores de 5 a 10 cm
19	D19-CJ-Tel-1	1277708	1073393	261	F. La Paz	1- Areniscas Friables y ferruginosas, rojizas. 2- Arenisca mas compacta, blancusca y venillas ferruginosas. AFTA
20	D20-CJ-Tel-1	1277487	1073848	301	F. La Paz	Areniscas rojas ferruginosas, hacia la base esta el contacto con guijos y guijarros, se encuentra altamente fracturado, ubicado pasos adelante del falso tunel. AFTA

Muestras Analizadas en Geotrack Int.

Muestras Seleccionadas en este Estudio

Nº Muestra	CÓDIGO	COORDENADAS			UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
		ESTE (KM)	NORTE (KM)	ALTURA (M)		
21	D21-CJ-Ksu-1	1275324	1076543	305	F. Umir	Shales grises con intercalación de arenisca
22	D22-CJ-Ksl-1	1283472	1085344	813	F. La Luna	Lutitas Negras Calcáreas con Bioturbación.
23	D23-CJ-Ksl-1	1283856	1085420	804	F. La Luna	P. De Control
24	D24-CJ-Tpl-1	1286213	1084589	776	F. Lisama	Areniscas con estratificación Cruzada. AFTA
25	D25-CJ-Ksu-1	1290794	1082645	346	F. Umir contacto con Lisama	Aparece a un Costado del Río Sucio debajo del Puente el Rojo - Lodolitas y Mantos de Carbón
26	D26-CJ-Tel/Tpl -1	1291214	1082243	329	F. Lisama en contacto con F. La Paz	Areniscas de Grano Fino - Morfología de Canal. AFTA
27	D27-CJ-Tel/Tee	1291684	1081277	267	F. La Paz contacto con F. Esmeralda	Areniscas de Grano Fino altamente Fracturadas. AFTA
28	D28-CJ-Tee/Tomi--1	1292705	1079558	220	F. Mugrosa	Areniscas de Grano Fino con estratificación Cruzada. AFTA.
29	D29-CJ-Toms-1	1293847	1077588	201	F. Colorado	Intercalaciones entre arcillolitas y areniscas rojizas ferruginosas con predominio de arcillas. AFTA
30	D30-CJ-Tmri-1	1294067	1075785	352	F. Real	Areniscas Conglomeráticas altamente meteorizadas AFTA

Muestras Analizadas en Geotrack Int.

Muestras Seleccionadas en este Estudio

Nº Muestra	CÓDIGO	COORDENADAS			UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
		ESTE (KM)	NORTE (KM)	ALTURA (M)		
31	D31-CJ-Kita-1	1285571	1087794	1138	F. Tablazo	Lodolitas Físiles altamente meteorizadas y fracturadas
32	D32-CJ-Kita/Jg-1	1281709	1089215	1176	Contacto Cretácico con el Jurásico (F.Tambor -F. Girón)	Areniscas de Grano fino de color rojizas a Pardas. AFTA.
33	D33-Libreta	1275138	1098447	918	F. Girón	Contacto Erosivo entre el Girón y la terraza de Bucaramanga
34	D34-CJ-Jg-1	1277123	1098655	1080	F. Girón	Areniscas de Grano fino a medio con un alto grado de Meteorización. AFTA .
35	D35-CJ-Qetl-1-2	1272970	1101611	750	Terraza de Bucaramanga	Sedimentos. AFTA
36	D36-CJ-Kita-1	1281832	1088929	1185	F. Tambor	Areniscas de Grano fino a medio con un alto grado de Meteorización . Brisas de México. AFTA.
37	D37-CJ-Kita/Kir-1	1281921	1088350	1141	F.Tambor en Contacto con F. Rosablanca	Areniscas de Grano fino intercaladas con delgadas capas de limolitas (40 cm). AFTA.
38	D38-CJ-Kip-1	1283617	1087396	1101	F. Paja	Lutitas Negras afectadas por los efectos de la oxidación.
39	D39-CJ-Kit-1	1283817	1087321	1080	F. Tablazo	Areniscas de grano fino a medio suprayacido por niveles desarrollados de suelo y abundante M.O en vía de descomposición. AFTA.
40	D40-CJ-Kis-1	1283730	1087236	1100	F. Simití	Lutitas Negras Calcáreas no fosilíferas

Muestras Analizadas en Geotrack Int.

Muestras Seleccionadas en este Estudio

Nº Muestra	CÓDIGO	COORDENADAS			UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
		ESTE (KM)	NORTE (KM)	ALTURA (M)		
41	D41-CJ-Kit-1	1283801	1087161	1096	F. Tablazo	Areniscas de Grano fino a medio altamente diaclasado, presencia de pequeñas concreciones de 40 cm de diámetro. AFTA.
42	D42-CJ-Kir-1	1281587	1087382	1108	F. Rosablanca	Calizas Fosilíferas grises a oscuras con presencia de M.O
43	D43-CJ-Kita/Kir-1	1281933	1088504	1165	F. Tambor en contacto con la F. Rosablanca	Areniscas de Grano fino a medio. AFTA.
44	D44-CJ-JTRcl-1	1273624	1114367	1931	Cuarzomonzonita de la Corcova.	Intrusión Ígnea de composición Cuarzomonzonítica de grano Fino.
45	D45-CJ-Pcd-01	1284918	1105332	839	F. Diamante Tope	Calizas oscuras con presencia de Fósiles
46	D46-CJ-Trb-01	1289883	1101743	678	F. Bocas	Areniscas oscuras con intercalación de Shales. Ubicado al margen izquierdo del Rio Negro AFTA
47	D47-CJ-Jj-01	1291961	1102398	679	F. Jordán	Areniscas de grano fino con Guijarros de calcita AFTA
48	D48-CJ-Trb-01	1290627	1102880	664	F. Bocas	Lutitas gris con presencia de venillas y granitos muy finos de calcita AFTA
49	D49-CJ-Pcd-01	1285871	1103916	780	F. Diamante Base	Areniscas de grano medio presentando tonalidades de blancas a Ocre. El afloramiento se encuentra altamente diaclasado. Ubicación en cercanías al Barrio Los Colorados AFTA
50	D50-CJ-TRbr-01	1282422	1106238	736	F. Tiburón	Arenisca con tonalidades verdosas de grano fino con presencia de Guijarros de Calcita AFTA

Muestras Analizadas en Geotrack Int.

Muestras Seleccionadas en este Estudio

Nº Muestra	CÓDIGO	COORDENADAS			UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
		ESTE (KM)	NORTE (KM)	ALTURA (M)		
51	D51-CJ-Pds-01	1250920	1120668	1007	F. Silgará	Esquisto micáceo altamente diaclasado AFTA
52	D52-CJ-Pds-01	1250967	1120779	1023	F. Silgará	Masas Migmatitas, con texturas Metamórficas del Neis de Bucaramanga y cristales de granito de Pescadero AFTA
53	D53-CJ-Pcb-01	1250985	1120829	1035	Neis de Bucaramanga	Bandas Féisicas con poca continuidad lateral y altamente fracturado AFTA
54	D54-CJ-JTRgp/Pcb-01	1251026	1120415	941	Contacto Granito de Pescadero y Neis de Bucaramanga	
55	D55-CJ-JTRgp-01	1251026	1120415	941	Granito de Pescadero	Granito rosado ocasionado por la presencia abundante de Fenocristales de Feldespato K, en menor Cantidad Q y Pl AFTA
56	D56-CJ-Ksl-1	1275454	1082505	394	F. La Luna	Formación la Luna cerca al contacto con la F. Umir sobre el filo conocido como Capitanejos
57	D57-CJ-Ksl-1	1275692	1082552	392	F. La Luna	Formación La luna En contacto con la Formación Umir
58	D58-CJ-Ksu-1	1277399	1080876	500	F. Umir	Carbón coquisable del miembro medio
59	D59-CJ-Tpl-1	1282303	1082075	998	F. La lisama	Intercalación de areniscas y arcillolitas, con laminación cruzada y espesores de 30 a 50 cm AFTA
60	D60-CJ-Tpl-1	1281355	1079985	1159	F. Lisama	Areniscas de la base de Lisama, con morfología de canal AFTA

Muestras Analizadas en Geotrack Int.

Muestras Seleccionadas en este Estudio

Nº Muestra	CÓDIGO	COORDENADAS			UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
		ESTE (KM)	NORTE (KM)	ALTURA (M)		
61	D61-CJ-Tpl/Ksu-1	1280951	1079491	1158		Base de Lisama y techo de Umir, carbonosa
62	D62-CJ-Jg-1	1271590	110993	951	F. Girón	Intercalación de areniscas rojas conglomeráticas y arenas rojas finas
63	D63-CJ-igneo-1	1278888	1112875	1060	Intrusivo	Intrusivo ígneo meteorizada, tomada en Pan de Azúcar
64	D64-CJ-Pcb-1	1279974	1108461	1273	Neis de Bucaramanga	Tomada a 100 m abajo del estadero el Mirador
65	D65-CJ-Pcb-1	1279831	1108460	1308	Neis de Bucaramanga	500m más adelante del delta 65.
66	D66-CJ-Ksl-1	no hay datos			F. La Luna	Tomada en la quebrada la Sorda en inmediaciones de la Vía la azufrada.


Muestras Analizadas en Geotrack Int.


Muestras Seleccionadas en este Estudio

ANEXO 2





MUESTREO
AFTA



Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACIÓN LA LUNA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1085344	1283472
Descripción: Shale Calcáreo. Afloramiento de la Formación La Luna por la vía conocida como La Azufrada.		

Muestra. Δ22-CJ-Ksl-01. (FOTO 1)





MUESTREO
AFTA



www.gemsltda.com

Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACIÓN LISAMA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1084589	1286213
Descripción: Areniscas de grano medio a fino con estratificación cruzada y marcas de corriente en la parte superior de la foto		

Muestra. Δ24-CJ-Tpl-01. (FOTO 2)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION UMIR
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1082645	1290794
Descripción: Shale compacto e interlaminado con delgados niveles de arena. Presencia de carbón en el borde del rio Sucio, debajo del puente el rojo.		

Muestra. Δ25-CJ-Ksu-01. (FOTO 3)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION LA PAZ
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1082243	1291214
Descripción: Areniscas de grano fino a medio. Típica morfología de canal.		

Muestra. Δ26-CJ-Tel-01. (FOTO 4)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION ESMERALDAS
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1081277	1291684
Descripción: Areniscas de grano fino a medio altamente fracturadas.		

Muestra. Δ27-CJ-Tee-01. (FOTO 5)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION MUGROSA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1079558	1292705
Descripción: Areniscas de grano fino a medio con estratificación cruzada.		

Muestra. Δ28-CJ-Tom-01. (FOTO 6)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION COLORADO FORMATION
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1077588	1293847
Descripción: Limolita roja con interlaminaciones de arenas, con predominio de las limolitas.		

Muestra. Δ29-CJ-Toms-01. (FOTO 7)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 3 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION REAL FORMATION
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1075785	1294067
Descripción: Arenisca de grano fino a medio con presencia de fragmentos de grava.		

Muestra. Δ 30-CJ-Tmr-01. (FOTO 8)





MUESTREO
AFTA



Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION TAMBOR
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1088929	1281832
Descripción: Areniscas de grano fino a medio, moderadamente fracturado. Afloramiento ubicado en el sitio conocido como Brisas de México.		

Muestra. Δ36-CJ-Kita-01. (FOTO 9)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. Saturday, 7 th April 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION TAMBOR
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1088350	1281921
Descripción: Areniscas de grano fino a medio, intercalado con limolitas rojas, en cercanías al contacto con la formación Rosablanca.		

Muestra. Δ37-CJ-Kita-02. (FOTO 10)





MUESTREO
AFTA



www.gemsltda.com

Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION PAJA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1087396	1283617
Descripción: Arcillita negra con costras de óxido.		

Muestra. Δ 38-CJ-Kip-01. (FOTO 11)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION TABLAZO
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1087321	1283817
Descripción: Arenisca de grano fino a medio con abundante desarrollo de material orgánico.		

Muestra. Δ39-CJ-Kit-01. (FOTO 12)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION SIMITI
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1087236	1283730
Descripción: Shale calcáreo negro no fosilífero.		

Muestra. Δ40-CJ-Kis-01. (FOTO 13)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	Formation TABLAZO FORMATION
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1087161	1283801
Descripción: Arenisca de grano fino a medio con presencia de pequeñas concreciones (aproximadamente 40 cm). Afloramiento altamente fracturado.		

Muestra. Δ41-CJ-Kit-02. (FOTO 14)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION TABLAZO
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1087161	1283801
Descripción: Detalle de las concreciones de la formación Tablazo		

Muestra. DETALLE DE LAS CONCRECIONES. (FOTO 15)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION ROSABLANCA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1087382	1281587
Descripción: Caliza gris clara con un bajo contenido de Materia Orgánica		

Muestra. Δ42-CJ-Kir-01. (FOTO 16)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 7 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION TAMBOR
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1088504	1281933
Descripción: Arenisca de grano fino a medio, aforamiento moderadamente fraturado.		

Muestra. Δ43-CJ-Kita-01. (FOTO 17)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 8 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	INTRUSIVO CUARZO MONZONITA LA CORCOVA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1114367	1273624
Descripción: Cuerpo ígneo intrusivo, dentro de la masa del Neis de Bucaramanga.		

Muestra. Δ44-CJ-JTRcl-01. (FOTO 18)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION DIAMANTE
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1105332	1284918
Descripción: Calizas gris oscura fosilífera. Afloramiento localizado en la cantera de cementos diamante.		

Muestra. Δ45-CJ-PCd-01. (FOTO 19)





MUESTREO
AFTA



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION BOCAS
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1101743	1289883
Descripción: Areniscas negra con intercalación de shale masivo		

Muestra. Δ46-CJ-TRb-01. (FOTO 20)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION BOCAS
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1101743	1289883
Descripción: Detalle de la intercalación en la formación Bocas.		

Muestra. DETALLE DE LA INTERCALACION. Δ 46-CJ-TRb-01. (FOTO 21)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION JORDAN
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1102398	1291961
Descripción: Arenisca de grano fino con presencia de lodo calcáreo y conglomerados de calcite.		

Muestra. Δ47-CJ-Jj-01. (FOTO 22)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION JORDAN
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1102398	1291961
Descripción: Detalle de la formación Jordán		

Muestra. DETALLE DE LA MUESTRA. Δ47-CJ-Jj-01. (FOTO 23)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION DIAMANTE
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1103916	128587
Descripción: Areniscas de grano fino a medio moderadamente fracturada. Al norte de Bucaramanga en cercanías al barrio los colorados.		

Muestra. Δ49-CJ-PCd-01. (FOTO 24)





MUESTREO
AFTA



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	FORMACION TIBURON
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1106238	1282422
Descripción: Arenisca de grano fino con matriz calcárea levemente conglomerática con cristales de calcita de más de 2 mm.		

Muestra. Δ50-CJ-TRPt-01. (FOTO 25)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	Formation SILGARA FORMATION
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1120668	1250920
Descripción: Esquistos de tonalidades verde oscura con abundante moscovita.		

Muestra. Δ 51-Pds -01. (FOTO 26)





**MUESTREO
AFTA**



Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	NEIS DE BUCARAMANGA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1120829	1250985
Descripción: Neis compuesto de Plagioclas y biotita.		

Muestra. Δ 53-CJ-PCb -01. (FOTO 27)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	NEIS DE BUCARAMANGA
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1120915	1250159
Descripción: Contacto entre el Neis de Bucaramanga y el Granito de Pescadero.		

Muestra. Δ 54-CJ-PCb -01. (FOTO 28)





MUESTREO
AFTA



Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	INTRUSIVO GRANITO DE PESCADERO
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1120415	1251026
Descripción: Granito rosado compuesto mayoritariamente por feldespato potásico, cuarzo y plagioclasa.		

Muestra. Δ 55-CJ-JTRgp -01. (FOTO 29)





**MUESTREO
AFTA**



www.gemsltda.com

Fecha. 17 de Abril de 2007	Geol. Carlos Pimentel Geol. Julián Vargas	INTRUSIVO GRANITO DE PESCADERO
Coordenadas. Falso Origen Bogotá	NORTE	ESTE
	1120415	1251026
Descripción: Sedimento no consolidado y altamente erosionado		

Muestra. Δ35-CJ-Qetl -01. (FOTO 30)



