

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **APLICACIÓN DEL MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN BASADO EN LA TÉCNICA DEL DETECTOR EXTERNO EN APATITOS DETRÍTICOS DE LAS ARENISCAS PERTENECIENTES A LAS FORMACIONES TRUJILLO Y MISOA, AFLORANTES EN LA QUEBRADA ALBARICO AL NOROESTE DEL ESTADO LARA**

Presentado ante la Ilustre Universidad  
Central de Venezuela para optar al  
título de Ingeniero Geólogo por los  
Bachilleres: Yolimar Carolina  
Coronado Díaz y José Angel Rey  
Alonso.

Caracas, Mayo de 2003.

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **APLICACIÓN DEL MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN BASADO EN LA TÉCNICA DEL DETECTOR EXTERNO EN APATITOS DETRÍTICOS DE LAS ARENISCAS PERTENECIENTES A LAS FORMACIONES TRUJILLO Y MISOA, AFLORANTES EN LA QUEBRADA ALBARICO AL NOROESTE DEL ESTADO LARA**

Tutor Académico: MSc. Jorge L. Mora M.  
Cotutor: MSc. Mauricio A. Bermúdez C.

Presentado ante la Ilustre Universidad  
Central de Venezuela para optar al  
título de Ingeniero Geólogo por los  
Bachilleres: Yolimar Carolina  
Coronado Díaz y José Angel Rey  
Alonso.

Caracas, Mayo de 2003.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres, titulado:

**“Aplicación del Método de Huellas de Fisión basado en la Técnica del Detector Externo en Apatitos Detríticos de las areniscas pertenecientes a las Formaciones Trujillo y Misoa, aflorantes en la quebrada Albarico al noroeste del Estado Lara”.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

---

Prof. Jorge L Mora.  
Jurado

---

Prof. Williams Melendez.  
Jurado

---

Prof. José Centeno.  
Jurado

Dedico a:

*Dios, por las bendiciones  
derramadas sobre mí.*

*Mi madre, Arles, quien su alma y  
todo el amor me entregó.*

*Mis hermanas, Ninozka y Margoth  
por estar a mi lado en los momentos  
que lo he necesitado.*

*Mi sobrino, Cesar Augusto, mi  
divina inspiración.*

*Yolimar*

Dedico a:

*Dios, mi escudo de amor y buena  
ventura.*

*Mis padres, con su apoyo, confianza y  
amor me guiaron en las aventuras de  
mi vida.*

*Mi esposa con su alegría,  
inteligencia, comprensión y su  
incansable amor que nunca a dejado  
de estar presente en los logros y metas  
propuestas en mi vida, **Te amo.***

*José*

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseamos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a:

### *UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA*

Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería.

Profesores: Mauricio Bermúdez y Jorge Mora, Tutores Académicos, por sus admirables labores como orientadores y guías en la formación académica en la elaboración de este Trabajo de Grado, además de sus amistades invaluableles.

### *ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFÍSICA*

Profesores de la Escuela de Geología, por su incansable y constante entusiasmo en la formación tanto académica como personal de nosotros.

Profesores Mónica Martíz, Directora y Sebastián Grande Jefe del departamento de Geología, por su valiosa cooperación.

Lic. Morela Castillo, Directora de la Biblioteca de Geología, por su apoyo y contribución incondicional.

Profesores: William Meléndez del ICT-Ciencias, Omar Godeliett, Manuel García, tec. Félix Arráez.

### *AMIGOS*

Jesús Quijada, Mariela López, Imerú Alfonso, Matías Araujo, Carmen Yegres, Tulio Peraza, Eduardo Castillo, Eskeila Troconis, al personal que labora en la biblioteca de administración y otros compañeros de carrera, por su apoyo infinito, por todos los momentos compartidos y los que nos quedan.

*FAMILIARES*

Yolimar Coronado.

*Mi invaluable madre. Arles Díaz.  
Mi abuela Juana, por sus sabios consjos.  
Mis tios quienes me tendieron la mano.  
Mis primos por su alegría trasmitida.  
Mis hermanas Margoth y Ninozka.  
Y a mi sobrinito Cesar Augusto, dulce luz.*

José Rey.

*Mis amados padres. Sr. Avelino Rey y Sra Margarita Alonso.  
Mis tios José Cachafeiro (+) y María Rey.  
Mi abuelita Lucia.  
Mis hermanos Juan Carlos y Yolanda.  
Mis Cuñadas Ana Verónica y Patricia.  
Y a mi vida e inspiración, mi bella y adorada esposa Beatriz Otero.*

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	X
INTRODUCCIÓN.....	XI
ANTECEDENTES.....	15
GEOLOGÍA.....	17
1.1 Introducción.....	17
1.2. Marco Geológico.....	17
GEOLOGÍA ISOTÓPICA.....	31
2.1 Introducción.....	31
2.2 La Geología ante el Descubrimiento de la Radioactividad.....	31
<i>Génesis de la Geología</i> .....	31
<i>Descubrimiento de la Radioactividad</i> .....	32
<i>Influencia de la Radioactividad en la Geología</i> .....	33
2.3 Decaimiento Radioactivo.....	35
<i>El Átomo y su Estructura Interna</i> .....	35
<i>Estabilidad Atómica y Decaimiento Radioactivo</i> .....	41
<i>Reglas de Estabilidad Atómica</i> .....	45
2.4 Ecuación Básica de Decaimiento Radioactivo.....	47
2.5 Tipos de Decaimiento Radioactivo.....	51
<i>Decaimiento Beta Negatrón (<math>\beta^-</math>)</i> .....	51
<i>Decaimiento Beta Positrón (<math>\beta^+</math>)</i> .....	53
<i>Decaimiento por Captura del Electrón (<math>K_e</math>)</i> .....	54
<i>Decaimiento Ramificado y Decaimiento Beta de Isóbaros</i> .....	56
<i>Decaimiento Alfa (<math>\alpha</math>)</i> .....	59
<i>Decaimiento por Fisión Nuclear</i> .....	60
MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN (MHF).....	63
3.1 Introducción.....	63
3.2 Conceptos Básicos en Huellas de Fisión.....	63

3.3 Nociones de Huellas de Fisión .....	66
<i>Estructura de la Huella</i> .....	66
<i>Formación de las Huellas</i> .....	68
Teorías sobre la Formación de Huellas.....	69
<i>Tipos de Huellas</i> .....	72
3.4 Densidad Volumétrica y Superficial de las Huellas .....	75
<i>Observación y Revelado de Huellas</i> .....	78
3.5 Métodos de Conteo para Determinar las Densidades.....	81
<i>Método de Poblaciones</i> .....	81
<i>Métodos Grano a Grano</i> .....	82
Técnica de Regrado.....	82
Técnica de Repulido.....	83
Técnica del Detector Externo (TDE) .....	83
3.6 Ecuación Práctica del Método de Huellas de Fisión .....	84
3.7 Efecto de la temperatura sobre las huellas y el posible significado geológico..	85
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS, PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y	
RESULTADOS.....	88
4.1. Introducción.....	88
4.2. Criterios utilizados para la recolección de muestras en campo .....	88
4.3 Guía de procedimientos de laboratorio.....	89
<i>Trituradoras</i> . .....	90
Trituradora de mandíbula.....	90
Pulverizador o triturador de rodillo.....	91
<i>Tamizadora</i> .....	93
<i>Mesa de Wilfley</i> .....	94
<i>Mesa de Secado</i> .....	95
<i>Separación de minerales pesados mediante Bromoformo</i> . .....	96
<i>Separador magnético Frantz</i> .....	97
<i>Refinamiento de fracción pesada por combinación de líquidos pesados</i> .....	98



<i>Selección de Apatitos, Montaje y Pulido</i> .....	100
Selección de los apatitos .....	100
Montado del apatito y preparación de la sección fina (pastilla) .....	101
Pulido .....	103
<i>Revelado, montaje del detector externo (mica)</i> .....	105
Revelado.....	106
Montaje del detector externo (mica) .....	107
<i>Preparación de la sección fina para el conteo de las huellas</i> .....	108
Revelado de la mica después de la irradiación .....	109
Arreglo del montaje para el conteo .....	110
4.4. Cálculo de edades para muestras estándar y factor Z. ....	111
4.5 Resultados de la Separación de Minerales .....	116
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	119
REFERENCIAS .....	121
APÉNDICES .....	125

**Coronado D., Yolimar C.  
Rey A., José A.**

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN BASADO EN  
LA TÉCNICA DEL DETECTOR EXTERNO EN APATITOS  
DETRÍTICOS DE LAS ARENISCAS PERTENECIENTES A LAS  
FORMACIONES TRUJILLO Y MISOA, AFLORANTES EN LA QDA.  
ALBARICO AL NOROESTE DEL EDO. LARA**

**Tutores Académicos: MSc. Jorge L., Mora M. MSc. Mauricio A., Bermúdez C.  
Tesis. Caracas, U. C. V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería, Minas y  
Geofísica (Geología). 2003,.....p.**

**Palabras Claves:** Método de Huellas de Fisión, Técnica del Detector Externo,  
datación, Formaciones Trujillo y Misoa.

**Resumen**

En este Trabajo Especial de Grado se aplica el Método de Huellas de Fisión basado en la Técnica del Detector Externo, a cinco muestras de areniscas tomadas en la quebrada Albarico, pertenecientes a las Formaciones Trujillo y Misoa. Se describen las bases teóricas y prácticas que se emplean para datar tales muestras según el método antes mencionado. Esta metodología de separación de minerales pesados, es aplicada en cristales de apatitos detríticos extraídos de muestras de roca, hasta la fase de montaje y pulido de la sección fina.

Se adaptó la metodología para el procesamiento de las muestras en la separación de minerales pesados y montaje de apatitos, para la aplicación del método de huellas de fisión en el laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela.

Se constató que las areniscas de las formaciones consideradas tienen una alta proporción de minerales pesados que pueden ser datados por el método de Huellas de Fisión, en particular, granos de apatito y circón.

Con carácter ilustrativo, se determina la edad de un estándar (apatito de Durango, México), empleando la Ecuación Práctica del Método de Huellas de Fisión y su posterior uso para la obtención del Factor Z, necesario para el cálculo final de las edades de las muestras de roca recolectadas en este trabajo. Por último, se presentan los resultados de cada uno de los procesos realizados a las muestras, desde la etapa de extracción en campo hasta la obtención y montaje de los granos de apatito.

## INTRODUCCIÓN

Las Formaciones Trujillo y Misoa no presentan fósiles índices que permitan establecer con certeza sus edades. Hasta los momentos éstas se han determinado a través de correlación con otras formaciones. Por esta razón se aplica el método de datación, denominado Método de Huellas de Fisión basado en la técnica del detector externo, que permite hallar estas edades o el último evento geológico de la zona.

### *Objetivo*

Utilizar el Método de Huellas de Fisión basado en la técnica del detector externo aplicado a los apatitos detríticos contenidos en las areniscas de las Formaciones Trujillo (Paleoceno - Eoceno) y Misoa (Eoceno), aflorantes en la quebrada Albarico al noroeste del estado Lara.

### *Metodología*

Para cumplir con el objetivo propuesto se seccionó la investigación en dos fases, trabajo de campo y laboratorio.

#### a) Trabajo de campo:

- Levantamiento de una columna estratigráfica.
- Elaboración de un corte geológico.
- Toma de cinco muestras de areniscas (30 kg C/u) separadas a ciento veinticinco metros en espesor verdadero, espaciado necesario para percibir diferencias en el gradiente térmico.

b) Laboratorio:

- Separación de minerales pesados para la obtención de los apatitos detríticos, a muestras de roca consolidada.
- Montado y pulido de las muestras según la técnica del detector externo, para su posterior irradiación.

*Alcances*

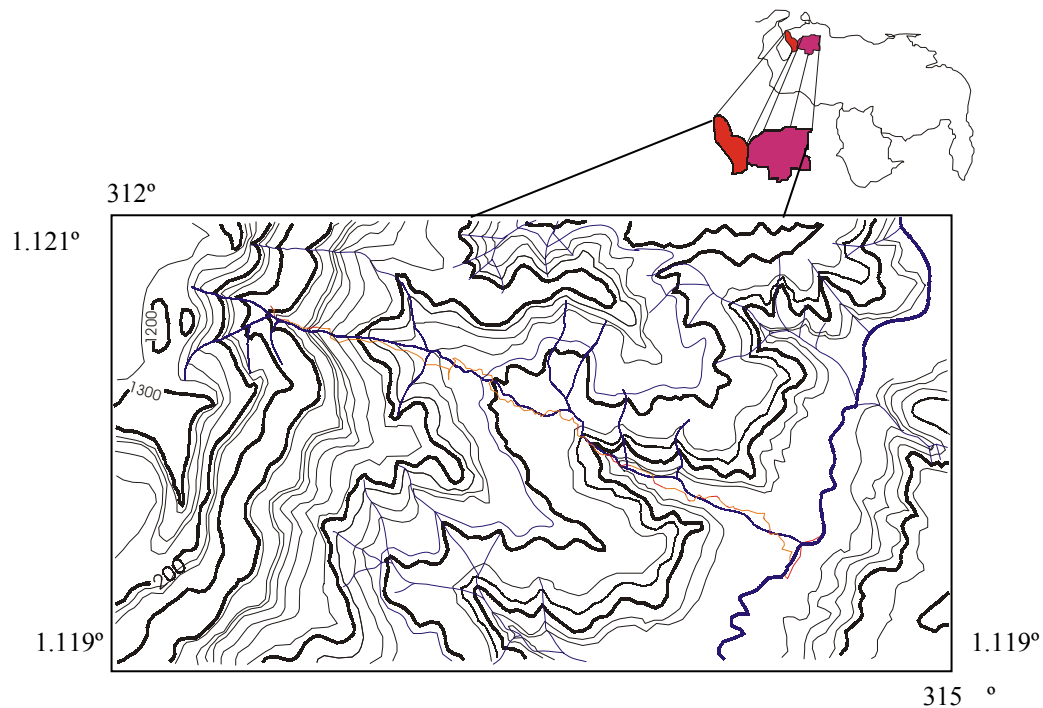
- Levantamiento geológico y descripción en detalle de los afloramientos.
- Obtención de la fracción de minerales pesados: Mixta y apatitos.
- Preparación de la sección fina, montaje y pulido para huellas espontáneas.

*Limitaciones*

- Disponibilidad inmediata de los materiales requeridos para la ejecución del presente Trabajo Especial de Grado.
- Recorte presupuestario durante la ejecución. El FONACIT, ente encargado de financiar este trabajo de investigación sugirió realizar las irradiaciones de las muestras recolectadas para el próximo año.

*Localización del Área de Estudio*

El área de estudio, en donde afloran las formaciones antes mencionadas, se ubica en la Quebrada Albarico. Ésta se localiza en el flanco noroccidental de los Andes Venezolanos, entre los estados Lara, Trujillo y Falcón. Lo cual puede ser apreciado en la siguiente figura 1.



*Figura 1. Localización del área de estudio.*

Este trabajo se distribuyó de la siguiente manera: en el primer capítulo se estudió el marco geológico de la zona seleccionada. El segundo, trata sobre los fundamentos teóricos de geología isotópica, los procesos de decaimiento radioactivos y sus diferentes tipos. En el siguiente capítulo se describe el Método de Huellas de Fisión, sus aplicaciones a la geología y las diferentes técnicas para el procesamiento de muestras a datar. En el cuarto capítulo, se describen los procedimientos de laboratorios basados en la técnica del detector externo y los resultados obtenidos del procesamiento de las muestras recolectadas. Finalmente, se proporcionan las conclusiones.

## ANTECEDENTES

Hahn y Strassmann (1938). Descubrieron la fisión de los átomos, cuando bombardearon uranio con neutrones y obtuvieron bario. Posteriormente este resultado fue interpretado como la fragmentación de los átomos de uranio utilizados. Posteriormente Barnes y Silk en el año 1959 publicaron microfotografías de las huellas de fisión del uranio registradas en micas utilizando un microscopio de transmisión electrónica. Price y Walker 1962 a,b , postulan que las huellas de fisión espontáneas pueden registrarse tanto en micas naturales y sintéticas, de igual forma explican una de las teorías de la formación de las huellas, basada en la existencia de dos tipos de energía implicadas en la generación de las huellas, de las cuales una es la más importante. También Price y Walker (1962e, d), Fleischer et al. (1975), para facilitar la observación de las huellas, aplican la técnica de grabado químico con la finalidad de hacerlas más amplias. Estos investigadores realizan otras aplicaciones de las huellas originadas por la fisión del  $^{238}_{92}\text{U}$  y determinan las bases del Método de Huellas de Fisión para datar varios tipos de minerales y vidrios.

Entre algunos de los autores que trabajaron en el Método de Huellas de Fisión están:

Fleischer *et al.* (1964) y Koshimiz (1981), los cuales estudiaron la técnica de pulido sobre minerales con alto contenido de uranio como el circón.

Bigazzi (1967). Aplicó la técnica del detector externo empleando una mica con bajo contenido de uranio.

Fleischer *et al.* (1969). Proponen la definición de la zona de desvanecimiento parcial, en la cual se borran parcialmente las huellas, dependiendo de la variación de la temperatura.

Khan y Ahmad (1975), Naeser *et al.* (1980). Estudiaron la técnica de población grano a grano.

Mora, J (1994). Determinó algunas edades en minerales contenidos en rocas y sedimentos, tomados en los flancos norandino y surandino de Venezuela. Trabajo inédito publicado para Lagoven, C. A.

Kohn, O'Sullivan y Shagam (1995). Determinaron la relación existente entre las edades obtenidas por el Método de Huellas de Fisión y sus implicaciones tectónicas.

En el capítulo de Geología se trabajó con los siguientes autores:

González de Juana, C *et al.* (1980). Estudió la evolución tectónica y sedimentaria de la región noroccidental de Venezuela, postulando modelos estratigráficos de las distintas formaciones. Posteriormente Mathius, X. (1989), describió la evolución noroccidental de Venezuela, haciendo énfasis en las fallas de Boconó y Valera.

Pindell y Barrett (1990). Propusieron un modelo distinto tomando en cuenta la evolución tectónica del Caribe, a través de los movimientos de las placas.



# **CAPÍTULO I GEOLOGÍA**

## **1.1 Introducción**

En este capítulo se estudiará la geología regional y local de la zona considerada en este Trabajo Especial de Grado, haciendo énfasis en el marco tectosedimentario que controla el área de estudio.

## **1.2. Marco Geológico**

Pindell y Barrett (1990), describen la evolución geodinámica regional con ayuda de una serie de gráficos de la evolución del Caribe, donde presentan el primer evento significativo como lo es la separación del continente Suramericano del continente Africano, esta separación es de forma diacrónica comenzando en la parte sur de los continentes dando origen al océano Atlántico, Figura 1.1 (A). Al ocurrir la separación de dichos continentes uno de los brazos de la dorsal corta al continente Americano, generando un océano llamado Proto-Caribe, lo cual se muestra en la Figura 1.1 (B). Ésto produjo la separación de una porción de terreno llamado Yucatán que luego, a consecuencia del movimiento de los bloques continentales, rotó y fue adosado a las costas mexicanas, según la Figura 1.1 (C).

Posteriormente en la placa suramericana comienza un período de calma tectónica con presencia de sedimentación de margen pasivo dando origen a una plataforma continental y en el interior cuencas distensivas, representadas por las fosas tectónicas de Espino, Uribante, Machiques, Cocina y otras en los subsuelos de Oriente y Lara.

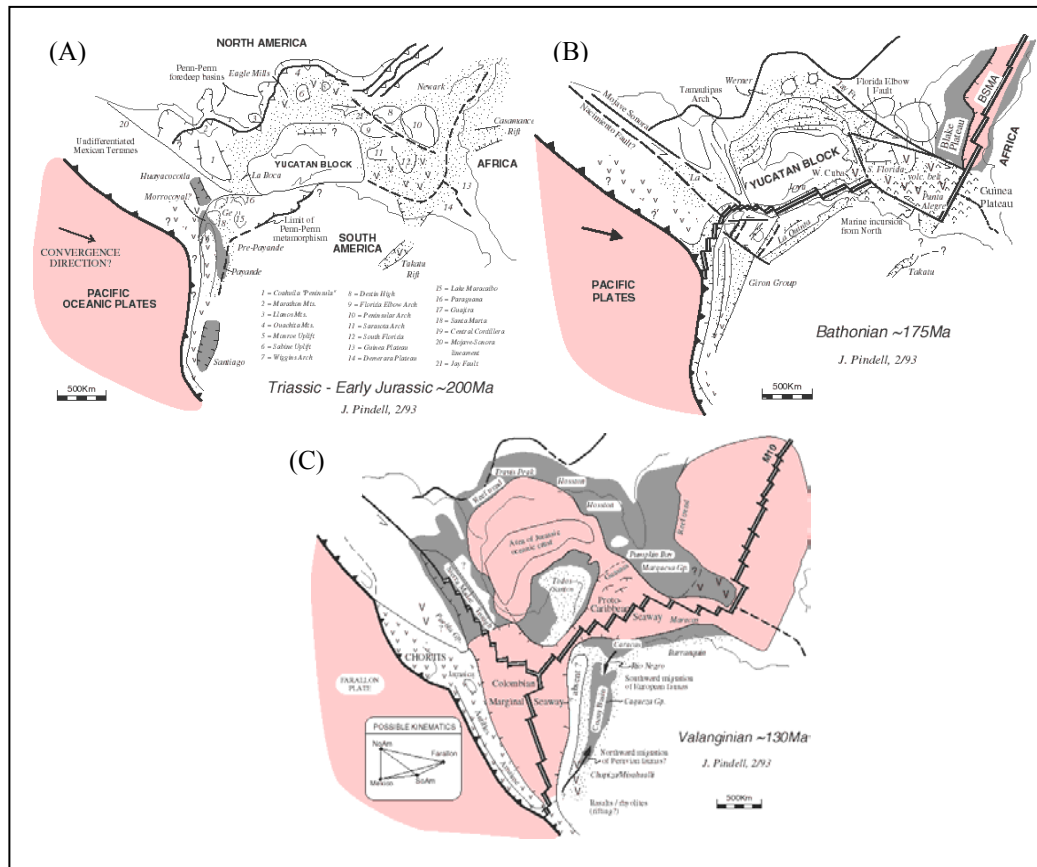


Figura 1.1. Evolución Tectónica del Caribe según Pindell y Barrett (1990).  
 (Tomado de [www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html](http://www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html)).

En el Paleoceno y hasta el Eoceno se desarrollaron ambientes costeros marginales, teniendo en el flanco norte de Trujillo una sedimentación marginal con mayor aporte continental y presencia de sedimentos de ambientes deltáicos y marinos, formando parte de las Formaciones Valle Hondo y Rancherías las cuales pasan lateralmente a ser facies marinas más profundas como la Formación Misoa, González de Juana C. et al (1980).

Hacia el noroeste de la placa Suramericana, la colisión oblicua del arco de islas de las Antillas Menores, provocó una sucesiva generación de escamas tectónicas (napas) con vergencia hacia el sur y sureste, las cuales pueden ser apreciadas en la Figura 1.2 (A). A consecuencia de la carga litostática generada por dichas napas, se

origina un sistema de fallas en forma de bisagra que controló la sedimentación de la cuenca a partir de dicho evento.

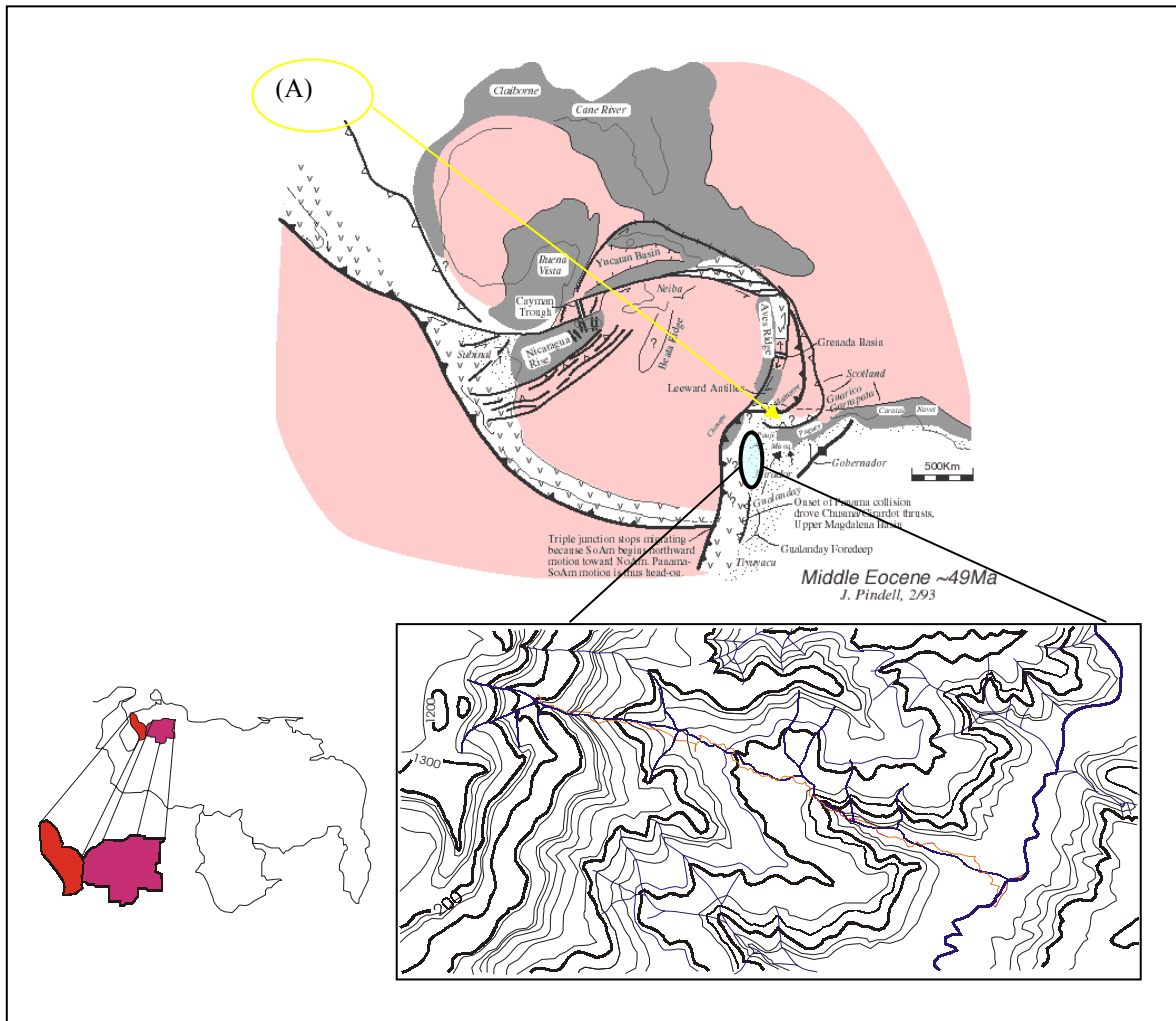


Figura 1.2. Evolución Tectónica del Caribe según Pindell y Barrett (1990).  
(Tomado y modificado de [www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html](http://www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html) ).

Un ejemplo de esto se tiene en la cuenca del Lago de Maracaibo, donde existió un marco sedimentario complejo que se caracterizó por sistemas deltáicos-estuarinos, fluvio-costeros y marinos en diferentes ubicaciones geográficas, donde se tiene una progradación deltáica en el Eoceno temprano, la cual cubre en su totalidad la zona de transición entre los ambientes deltáico y marino costero. Esta regresión finaliza en el Eoceno medio donde se observa una notable trasgresión marina y por ende una profundización de los mares que progresa en forma transgresiva, desde

facies costeras como las de la Formación Cáus a facies marinas como la Formación Paují.

En el Eoceno medio, la Formación Misoa se caracteriza por formar parte de una provincia deltáica baja, la cual ocupa parte del Lago de Maracaibo hasta llegar a la zona de bisagra en donde adquiere su mayor espesor. Hacia el oeste dicha formación pasa transicionalmente a la Formación Trujillo.

La Formación Misoa consiste en un gran delta afectado por los avances y retrocesos recurrentes de la línea de costa, con formación de deltas sucesivos cada vez que ocurría una disminución del nivel del mar. Según Van Veen (1972), el avance del abanico deltáico tenía lugar hacia el norte-noreste, con una fuente de sedimentos al sur y otra al suroeste. En la Tabla 1.1 se resumen las principales características de esta Formación.

*Tabla 1.1. Resumen de la Formación Misoa.*

<b>Edad</b>	Terciario (Eoceno medio)
<b>Formación</b>	Misoa
<b>Localidad tipo</b>	Se ubica hacia el este, a lo largo del río Misoa, hasta la serranía de Trujillo.
<b>Descripción litológica</b>	Se encuentran areniscas, limolitas y lutitas intercaladas en distintas cantidades, en toda la sección y hacia el este, en la sierra, algunas capas de caliza en la parte-inferior. Las areniscas presentan tamaños variados de grano, pero en general, son de grano fino gradando a limolitas y luego a lutitas.
<b>Extensión geográfica</b>	Se extiende hacia el este, a lo largo del río Misoa, hasta la serranía de Trujillo.
<b>Contactos</b>	En su tope, la Formación Misoa está en contacto concordante con la Formación Paují, dicho contacto puede ser abrupto o transicional. En el subsuelo del Lago de Maracaibo, la unidad suprayace discordantemente a las Formaciones Guasare o Marcelina. Al norte del campo Urdaneta, el contacto es con la Formación Trujillo.
<b>Fósiles</b>	En general, las lutitas y las areniscas carecen de fósiles, con excepción de escasos foraminíferos de poco interés estratigráfico.
<b>Correlación</b>	Hay equivalencia lateral entre la Formación Misoa y las Formaciones Ranchería, Valle Hondo al sureste y Mirador al suroeste.
<b>Paleoambientes</b>	La Formación Misoa representa un proceso sedimentario que varía desde deltáico alto, al suroeste y sur, a deltáico bajo y marino somero al norte y noreste.

Con la profundización paulatina de los ambientes costeros y marinos hacia el norte se caracteriza a la Formación Trujillo, la cual según González de Juana C. et al (1980) se encontraba en una provincia sedimentaria de tipo surco turbidítico, también denominada provincia geosinclinal, donde se presentan espesas secuencias autóctonas de ambientes marinos profundos, parcialmente turbidíticos.

Esta Formación es característica de la zona de bisagra de la Serranía de Trujillo y representa la avanzada de la sedimentación turbidítica que se desarrolló en la parte occidental del surco a expensas de la progradación deltáica. Trujillo es predominantemente lutítico caracterizado por intercalaciones rítmicas de lutitas oscuras y areniscas delgadas gradadas de color gris a gris oscuro.

*Tabla 1.2. Resumen de la Formación Trujillo.*

<b>Edad</b>	Terciario (Paleoceno-Eoceno)
<b>Formación</b>	Trujillo
<b>Localidad tipo</b>	En el río Misoa entre el anticlinal de El Baño, y todos afluentes de éste que se encuentran entre los estados Zulia y Lara.
<b>Descripción litológica</b>	Compuesta por lutitas gris azulado oscuro, a gris oscuro y negro y areniscas grises y pardas en menor proporción.
<b>Extensión geográfica</b>	Río Misoa y sus afluentes, al este del lago de Maracaibo.
<b>Contactos</b>	La Formación Trujillo yace concordantemente sobre la Formación Guasare, estableciéndose el contacto en el tope de la caliza más alta de esta formación. El contacto superior con la Formación Misoa es en general concordante.
<b>Fósiles</b>	La Formación Trujillo es en general poco fosilífera
<b>Correlación</b>	La Formación Trujillo se correlaciona en la parte suroriental de la cuenca de Maracaibo, con las Formaciones Ranchería y Valle Hondo, al SE, y con la porción mas baja de la Formación Misoa, al oeste. Hacia el este, ha sido correlacionada con las Formaciones Morán y Matatere de Lara y Yaracuy.
<b>Paleoambientes</b>	La Formación Trujillo representa un proceso sedimentario tipo turbidítico.

En la Figura 1.3 se representan corrientes de turbidez características del proceso sedimentario de la Formación Trujillo.

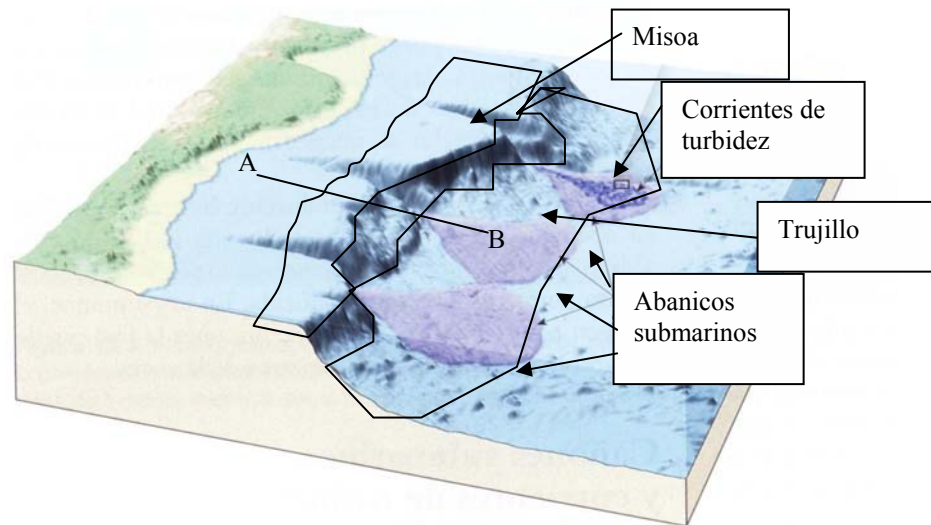


Figura 1.3. Representación gráfica de corrientes de turbidez  
(Tomado y modificado del Tarbuck E, 2000).

En la Figura 1.4 se muestra un corte geológico estructural representativo de las Formaciones Trujillo y Misoa observadas en el gráfico anterior.

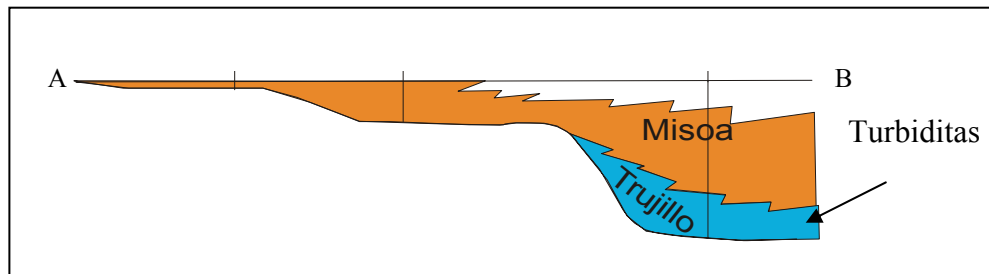


Figura 1.4. Corte geológico estructural de las formaciones Trujillo y Misoa.  
(Tomado y modificado del González de Juana, 1980).

El término turbidítico se aplica a una alternancia de capas de areniscas y de arcillas con una estratificación muy regular. Sus capas se caracterizan en conjunto por poseer los contactos planos paralelos entre ellas, e individualmente, sello impreso por las corrientes de turbidez.

En estos casos las areniscas que en la mayoría forman las capas duras se hallan grano-clasificadas, al mismo tiempo que vienen caracterizadas por una secuencia vertical de estructuras sedimentarias primarias, definida por la secuencia Bouma.

Esta secuencia está formada, de base a tope, por el llamado término *a*, grano-clasificación; el siguiente término *b*, o de laminación paralela inferior; luego, el término *c*, o intervalo *ripples* con laminación convoluta, y finalmente el término *d*, o de laminación paralela superior, generalmente poco frecuente. El término *e* designa la capa arcillosa, ver Figura 1.5.

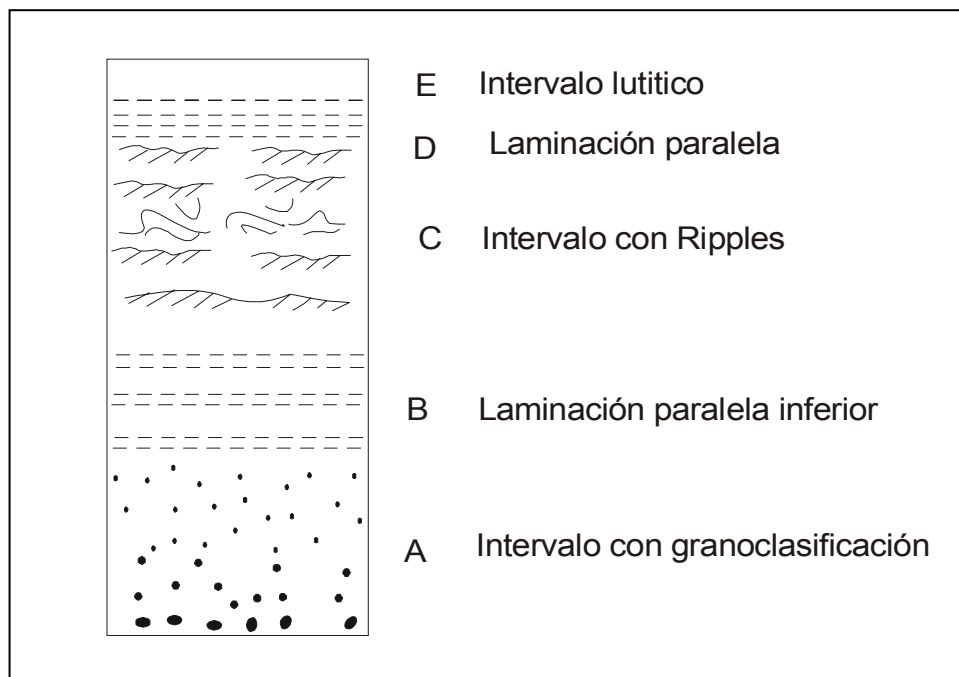
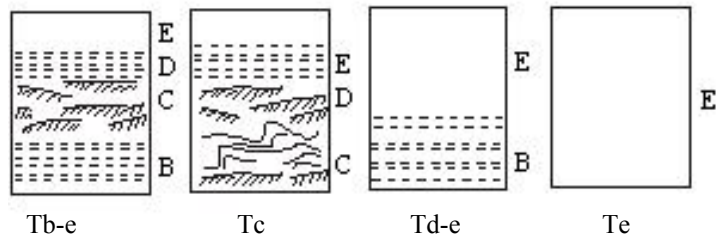


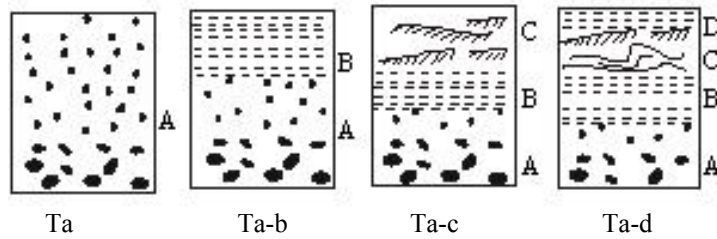
Figura 1.5. Secuencia completa de Bouma  
(Tomado y modificado del Corrales y et al, 1977).

En la Figura 1.6 se puede apreciar las secuencias interrumpidas, truncadas e incompletas de la serie de Bouma, las cuales serán útiles para la identificación de secuencias características en la columna geológica levantada en el área de estudio.

Secuencias incompletas (Interrumpidas)



Secuencias truncadas



Secuencias incompletas truncadas

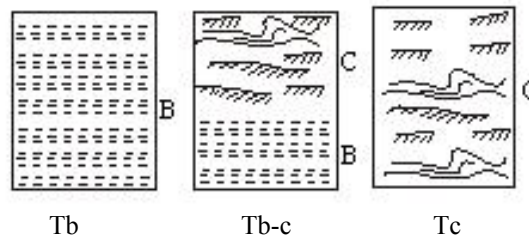


Figura 1.6. Tipos de Secuencias según Bouma.  
(Tomado y modificado del Corrales y et al, 1977).

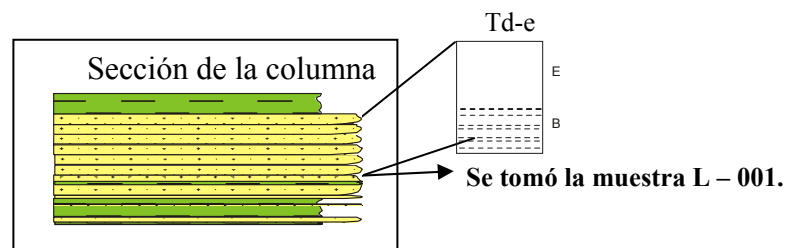
Utilizando los datos anteriores y el trabajo de campo realizado se puede identificar una serie de secuencias características y representativas a las secuencias de Bouma. En su mayoría, estas secuencias están representadas por una laminación paralela inferior y un intervalo lutítico característico de una secuencia incompleta (interrumpida) Te y Td-e, siendo esta última la más indicativa, ejemplo de esto se presentan unos afloramientos levantados en detalle y ubicados en las poligonales realizadas en la quebrada (ver apéndice 1).

El afloramiento 5 se caracteriza por 3 paquetes con laminación paralela. El primer paquete consiste en una intercalación de areniscas con lutitas. Hacia la base es



más arenoso con capas promedio de 60 centímetros alternadas con capas de lutitas de 6 centímetros. Se observan nódulos calcáreos hacia el tope de las areniscas. A 1,3 metros de la base se observa un intervalo de lutitas fisiles de 1,80 metros. En el tope de éste se localizó una estructura sedimentaria de tipo huella de pastoreo que indica que la secuencia está normal. Suprayacente a este intervalo se observa la misma alternancia pero más arenosa, de 2,30 metros de espesor. Las capas de arenisca varían entre 3 a 8 centímetros, en donde las más gruesas se localizan hacia el tope, y las lutitas presentan un espesor máximo de 1 centímetro con una proporción de 10 por metro. Encima de esta secuencia descrita, se observan 6 metros de arenisca espesa de 60 centímetros a 1 metro, que presentan estrías de falla y facetas escalonadas. En las areniscas se observan esporádicas concreciones muy oxidadas.

El segundo paquete es de 2 metros de espesor y está representado por lutitas compactas. El tercer paquete está constituido por areniscas compactas de 2 metros de espesor. El color meteorizado de la arenisca es gris claro y el color fresco es gris oscuro. Las lutitas presentan un color meteorizado gris oscuro y un color fresco gris claro. Se reportan bioturbaciones. La litología no reaccionó al ácido. El espesor total de la secuencia completa es de 15,5 metros, ver Figura 1.7 donde se representa de forma gráfica dicho afloramiento.



*Figura 1.7. Afloramiento característico de la Secuencia según Bouma.  
(Tomado de la columna estratigráfica).*

El afloramiento 2 está constituido por tres paquetes. El primer paquete está localizado en la base con un espesor de 3 metros, y está formado por intercalaciones

rítmicas de arenisca y lutita. No reacciona al ácido. El color meteorizado es pardo oscuro y el color fresco es gris oscuro.

El segundo paquete es de 5 metros y contiene dos capas gruesas de arenisca con un espesor de 2 metros cada una, separadas por una pequeña capa de lutita. El color meteorizado de la arenisca es pardo y su color fresco es gris claro. La lutita presenta los mismos colores que en el primer paquete. El tercer paquete, se ubica hacia el tope de la secuencia aflorante constituida por 3 metros de lutita intercaladas con capas delgadas de arenisca. La litología no reaccionó al ácido. El espesor total es de 11 metros, ver Figura 1.8.

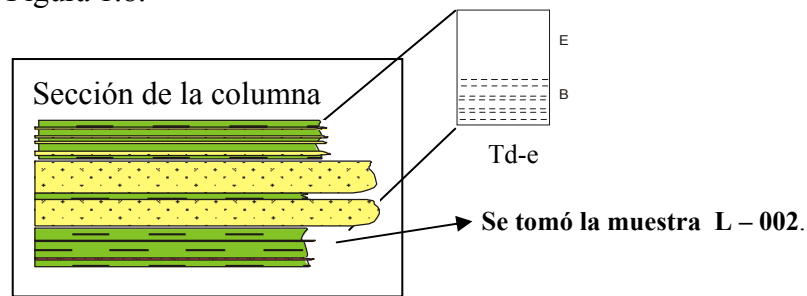


Figura 1.8 Afloramiento característico de la Secuencia según Bouma.  
(Tomado de la columna estratigráfica).

El afloramiento 27 (base de la columna estratigráfica) presenta lutitas más fisiles hacia la base y más compactas en el tope. Contiene vetas de cuarzo y presenta laminación paralela. El color meteorizado es gris parduzco y el color fresco es gris oscuro. Esta secuencia tiene un espesor de 19,80 metros aproximadamente, esto se puede observar en la Figura 1.9.

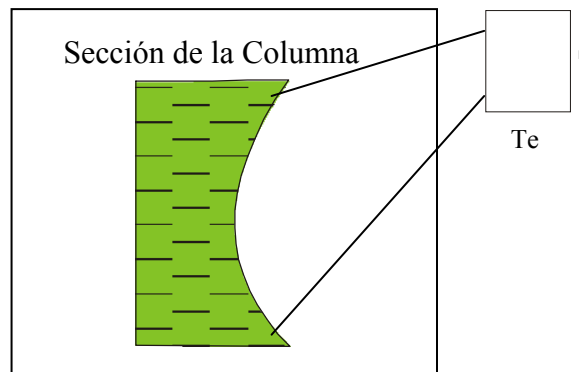
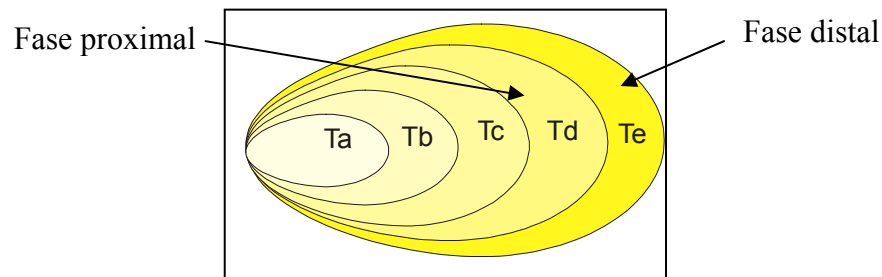


Figura 1.9. Afloramiento característico de la Secuencia según Bouma.  
(Tomado de la columna estratigráfica).

Estas secuencias permiten ubicarse en las facies proximales – distales, dentro de la cuenca turbidítica propiamente dicha, es decir, caracterizada por capas turbidíticas de parte proximal (turbiditas proximales) y una parte distal (turbiditas distales), teniendo muy en cuenta que la transición entre uno y otro tipo de facies es gradual.

Las facies proximales se caracterizan por haberse depositado en una parte de la cuenca de fondo plano por ello el contacto entre los diferentes estratos son casi siempre paralelos. En estas series abundan las arcillas aunque se tiene predominancia de capas gruesas de arenisca de grano medio.

En la Figura 1.10 se observa el sistema de conos de eyección donde se ubican las secuencias estratigráficas de Bouma y las secuencias observadas en la columna estratigráfica. Ésto ratifica el flujo de energía y por ende el tamaño de grano presente en las areniscas estudiadas.



*Figura 1.10. Conos de deyección de una corriente de turbidez.  
(Tomado y modificado del Corrales et al, 1977).*

Finalizando con el período donde se ubican las Formaciones Misoa y Trujillo en el marco tectosedimentario, ocurre un nuevo choque de arco de islas (Panamá – Baudó) al noroeste de suramérica generando la inversión de las cuencas distensivas anteriormente formadas, propiciando el levantamiento Andino Venezolano y la

aparición de extensas fallas transcurrentes como estructuras predominante en el borde noroccidental de la placa suramericana, según se puede observar en la Figura 1.11.

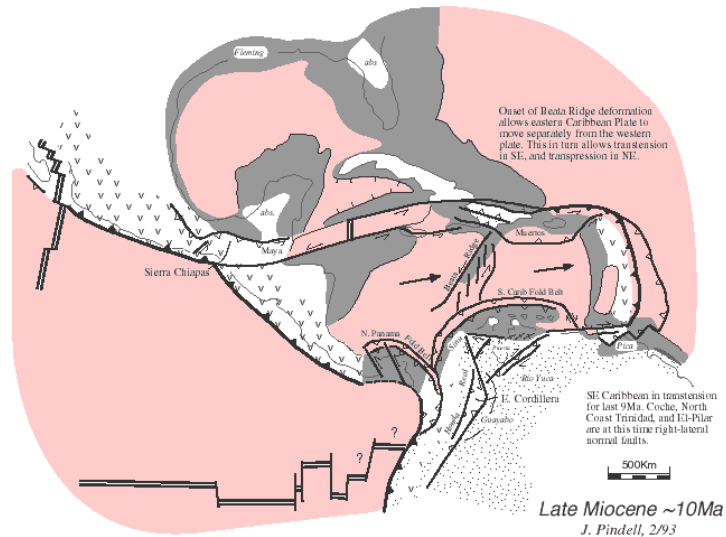


Figura 1.11. Evolución Tectónica del Caribe según Pindell y Barrett (1990).  
(Tomado de [www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html](http://www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html).)

Este choque origina el levantamiento y la deformación de las secuencias estratigráficas depositadas anteriormente, como se puede observar en el corte topográfico-estructural, Figura 1.12, donde se tienen dos unidades muy bien definidas. En la parte superior (1), se aprecia un gran homoclinal cuyas capas presentan un buzamiento promedio de 20 grados al NE y en la parte inferior (2) se tienen un conjunto de pliegues producto del cabalgamiento de la Formación Misoa sobre la Formación Trujillo. En cuanto a las fallas se interpreta una superficie de despegue que se origina simultáneamente con la deformación regional, ubicada en la zona de transición entre las formaciones antes mencionadas, dicha falla coloca en contacto estructural, falla, las formaciones Trujillo y Misoa (ver apéndice 3).

Esta falla se ubicó e interpretó de dicha forma siguiendo los rasgos apreciados en campo y utilizando como marco de referencia el trabajo realizado en la misma zona de estudio por Mathius en el año 1989.

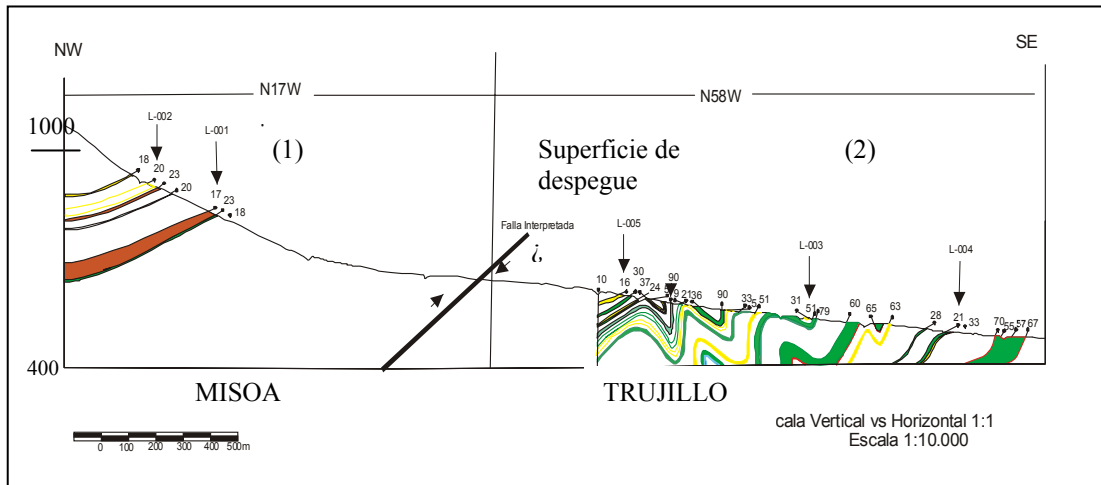


Figura 1.12. Corte Topográfico Estructural  
(Elaborado por Coronado y Rey, 2003.).

En la Figura 1.13 se presenta el mapa geológico de la zona de estudio donde se aprecia la ubicación de la falla y el desplazamiento de las formaciones, así como la localización de la quebrada en el contexto geológico actual.



Figura 1.13. Mapa geológico de la zona de estudio  
(Tomado y modificado de Matiuix J, 1989).

Continuando con la evolución tectosedimentaria que involucra al área de estudio, Según González de Juana C. et al (1980), se tiene que los sedimentos

Oligocenos en esta zona se caracterizan en general por ser transgresivos sobre las unidades previamente erosionadas, debido al levantamiento producido por el choque del segundo arco de islas contra la placa sur-americana. En los Andes, ya en vía de levantamiento no hay evidencia de sedimentos Oligocenos.

Durante el Mio-plioceno, la sedimentación invade el territorio noroccidental en su totalidad y se forman una serie de antefosas en el borde de los Andes y en la Sierra de Perijá. Aquí se puede encontrar los sedimentos Miocenos de mayor espesor, debido a la subsidencia sin orogénesis.

Según Soulas, J. *et al* (1985), establecieron que la orogénesis del Mio-Plioceno tiene una notable expresión en ambos flancos de la cadena Andina, evidenciada por el relleno de dichas antefosas y los grandes intervalos de conglomerados gruesos de ambiente continental, lo que indica que el levantamiento de los Andes Merideños iniciado con la epirogénesis post-Eocena, alcanzó su mayor intensidad durante la orogénesis post-Miocena.

En la actualidad, a consecuencia de la exhumación, el plegamiento y los efectos erosivos en la zona, quedan al descubierto un conjunto de afloramientos de los cuales se extrajeron las muestras de rocas utilizadas en este Trabajo Especial de Grado. La ausencia de marcadores cronoestratigráficos que nos indiquen con certeza la edad de las formaciones en el área de estudio condujo a la utilización del Método de Huellas de Fisión basado en la Técnica del Detector Externo para hallar dichas edades o en dado caso la edad del último evento tectotérmico. Por tal razón, en los siguientes capítulos se explicarán la ley de decaimiento radioactivo que rigen los métodos de datación radiométrica específicamente, el Método de Huellas de Fisión, así como los procedimientos de laboratorio, basados en las técnicas del detector externo aplicados a dicho método.

## **CAPÍTULO II**

### **GEOLOGÍA ISOTÓPICA**

#### **2.1 Introducción**

Desde sus inicios, el descubrimiento de la radioactividad ha tenido un importante impacto en la geología, por tal razón este capítulo tiene como objetivo principal familiarizar al lector con los fundamentos básicos del decaimiento radioactivo y su relación con la geología isotópica.

#### **2.2 La Geología ante el Descubrimiento de la Radioactividad**

##### *Génesis de la Geología*

Según Faure (1977), antes de la aparición de la Geología como ciencia, los aspectos relacionados con la edad de la Tierra y la formación de las rocas eran materia concerniente a la Teología; de hecho fue un sacerdote, Bishop Ussher quien proclamó en el año 1650 que la Tierra había sido creada en el año 4.004 A.C. Ésto produjo consecuencias negativas para el trabajo que realizaban los primeros geólogos que se formaban en la época.

Con el trabajo realizado por James Hutton<sup>1</sup> publicado en su libro "Theory of the Earth" (1785), la Geología comienza a aceptarse como una ciencia. En esta publicación él explica que los procesos geológicos que ocurren actualmente son los mismos que afectaron a la Tierra en el pasado, y que de igual modo lo harán en el futuro. La teoría de Hutton es conocida como el Principio de Uniformitarismo. En esta obra también se menciona que se requieren grandes periodos de tiempo para la depositación de rocas sedimentarias que son acumuladas en diferentes espesores.

<sup>1</sup>Citado en Faure (1977).

Posteriormente nace una nueva generación de geólogos, y con ellos el afianzamiento de la Geología como ciencia con bases teóricas desligadas de la Teología. Sin embargo, entre el año 1862 y 1899 William Thomson<sup>2</sup> realizó una serie de publicaciones, en donde propuso que la edad de la Tierra variaba entre 20 y 40 millones de años, basándose en sus cálculos de la luminosidad del sol, la historia del enfriamiento de la Tierra y el efecto de marea ocasionado por la Luna en la tasa de rotación de la Tierra. A consecuencia, la teoría del Uniformitarismo estuvo fuertemente afectada debido a que no existían hasta ese momento bases para refutar la teoría de Thomson.

### *Descubrimiento de la Radioactividad*

La *radioactividad* es la propiedad que poseen los núcleos de algunos elementos de desintegrarse, emitiendo o absorbiendo radiación (Calzadilla, 1978).

La *radiación* es la emisión de energía en forma de ondas o partículas nucleares. Proceso por el cual la energía es emitida, luego transmitida a través del espacio o de la materia, y posteriormente absorbida (Enciclopedia The New Grolier Webster International Dictionary, 1972).

En 1896 el físico francés Henri Becquerel<sup>3</sup> anunció el descubrimiento de la radioactividad. Unos años más tarde se determinan sus primeras propiedades, entre las cuales está el calor producido por la desintegración de elementos radioactivos. Ésto permitió concluir que la Tierra no era un cuerpo frío como W. Thomson sugería, más bien ésta era caliente debido al calor proveniente del proceso exotérmico originado por la radioactividad natural de las rocas. A partir de este momento, la Geología tendría una nueva visión.

<sup>2,3</sup>Citado en Faure (1977).



El descubrimiento de la radioactividad ocurrió casualmente, mientras se experimentaba con tubos de rayos catódicos y la luminiscencia de sales de uranio. El físico alemán Wilhelm Konrad Roentgen<sup>4</sup> realizó experimentos con los tubos de rayos catódicos, los cuales cubrió con papel negro y por encima de éste colocó una cobertura hecha con platina de bariuro. Él observó la producción de luminiscencia que traspasó el montaje de las láminas.

Posteriormente, Henri Becquerel experimentó nuevamente con las sales de uranio con las cuales había estado trabajando, para determinar si éstas podían emitir este tipo de rayos. Efectivamente los cristales de uranilo sulfato ( $\text{UO}_2\text{SO}_4$ ) emitieron una radiación invisible, quedando ésta evidenciada al recubrir una placa fotográfica con papel negro y colocando sobre ella los cristales de uranio sulfatado y posteriormente la exposición de éste al sol. El resultado fue que la radiación logró penetrar el papel negro y manchó la placa fotográfica.

### *Influencia de la Radioactividad en la Geología*

A partir del descubrimiento de la radioactividad, muchos científicos empezaron a trabajar en esta rama de la física, entre ellos se encuentran: Los esposos Curie, Laborde, Rutherford, Soddy, Thomson, Ramsay y John Joly<sup>5</sup>. Los estudios sucesivos a este descubrimiento y los múltiples experimentos realizados permitieron profundizar en las aplicaciones de la radioactividad, en las causas y consecuencias de ésta. Entre los nuevos aportes realizados se destacan los siguientes:

a) Creación de la teoría de decaimiento y crecimiento radioactivo (Frederick Soddy y Rutherford, 1900). Expresaron a través de una ley matemática la tasa de desintegración radioactiva, la cual será desarrollada en la sección 2.4 de la Ecuación Básica de Decaimiento Radioactivo.

<sup>4,5</sup>Citados en Faure (1977).

b) El decaimiento radioactivo es un proceso exotérmico, es decir, que libera energía (Curie y Laborde, 1903). Esta importante contribución a la ciencia condujo a los geólogos a realizar mediciones de la radioactividad de las rocas y a calcular la tasa de producción de calor, utilizando distintos elementos contenidos en las rocas como el Radio (Ra) (Strutt, 1906). Para el año 1907, John Joly reconoce que halos pleocróicos presentes en las rocas, son causadas por la influencia de la radioactividad en minerales, y posteriormente publica sus conclusiones en 1909 en el libro "Radioactivity and Geology".

c) Determinación de la primera escala de tiempo geológica (Arthur Holmes, 1903)<sup>6</sup>. Él se basó en el espesor acumulado de las rocas sedimentarias, en la formación de helio y en la acumulación primaria del uranio en los minerales. Dicha escala indicó una edad máxima de 1.300 millones de años obtenida por gneisses arqueanos, pero él especuló que las rocas más viejas de este tipo podrían tener hasta 1.600 millones de años.

d) La proporción del cociente U/Ra en minerales de uranio es constante (B. Boltwood, 1904)<sup>7</sup>. Este científico realizó pruebas en tres muestras distintas de uraninita y obtuvo un rango de edad entre 410 y 535 millones de años.

e) La radioactividad es un método que permite medir la edad de rocas y minerales (Rutherford y B. B. Boltwood, 1905). Rutherford propuso que la edad de los minerales de uranio puede ser medida por la cantidad de helio acumulado en ellos. A través de experimentos obtuvo edades de 500 millones de años en este mineral.

<sup>6,7</sup>Citados en Faure (1977).

## 2.3 Decaimiento Radioactivo

### *El Átomo y su Estructura Interna*

El *átomo* es la unidad más pequeña posible de un elemento químico. En la filosofía de la antigua Grecia, la palabra “átomo” se empleaba para referirse a la parte de la materia más pequeña que podía existir, átomo significa en griego “no divisible” que era como se consideraba hasta el siglo XIX. Actualmente, el átomo representa la mínima fracción de materia en forma estable que se ha logrado separar sin alterar sus propiedades. (<http://www.lafacu.com/apuntes/fisica/atomo/default.htm>, 2002). El diámetro de los átomos está en el orden de  $10^{-8}$  centímetros (cms) y está expresado en unidades angstrom ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cms}$ ). El átomo consta de un núcleo y de una envoltura que lo rodea, los cuales contienen partículas sin carga, con carga positiva y negativa denominadas partículas subatómicas, algunas consideradas fundamentales y otras no, debido a que éstas últimas están formadas por unas más pequeñas (Faure, 1977).

El átomo está constituido por un núcleo muy pequeño cargado positivamente y por una nube o envoltura de electrones que se encuentran orbitando alrededor de éste, dispuestos en capas de acuerdo con su número atómico (Figura 2.1). En el núcleo se halla concentrada casi toda la masa del átomo, tiene un diámetro de  $10^{-12}$  cm o  $10^{-4} \text{ \AA}$  y la densidad de la materia nuclear es de  $10^{14} \text{ grs/cm}^3$ . En él se encuentra un gran número de partículas fundamentales diferentes entre las cuales están los neutrones y los protones, conocidos en conjunto como nucleones y considerados como los principales constituyentes del núcleo, debido a la masa y carga eléctrica que le aportan (<http://www.filosofia.org/enc/ros/atomo.htm>, 2002).

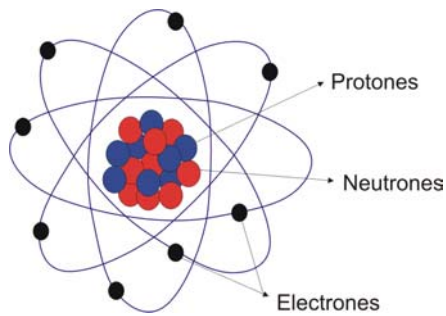


Figura 2.1. Átomo y sus subpartículas.

Un *protón* es una partícula que tiene una carga positiva que es igual en magnitud pero opuesta en polaridad a la carga de un electrón. Los *neutrones* tienen una gran masa muy ligera en comparación a los protones y no tienen carga eléctrica. Los neutrones extranucleares son inestables y decaen espontáneamente para formar protones y electrones con una vida media de 10.6 minutos, ésta será definida en las próximas secciones. Los *electrones* tienen una masa muy pequeña (1/1836.1 menos que los átomos de hidrógeno) y una carga eléctrica negativa. En un átomo neutro el número de electrones extranucleares es igual al de los protones. Los protones determinan cuántos electrones puede tener el átomo, cuando éste es eléctricamente neutral. El número de electrones y su distribución en torno al núcleo determina las propiedades químicas del átomo (Faure, 1977).

El número de protones y electrones presentes en el átomo permite describir la composición de éste. El número de protones ( $Z$ ) es llamado *número atómico* y el número de neutrones ( $N$ ) es el *número neutrónico*. La *masa atómica* ( $A$ ) es el resultado de la suma de los protones y neutrones presentes en el átomo, es decir:

$$A = Z + N$$

Los diferentes átomos de un mismo elemento, a pesar de tener el mismo número de protones y electrones, pueden diferenciarse en el número de neutrones.

Esta variedad de átomos "de un mismo elemento" se denomina isótopo. Por ejemplo  ${}^9_6\text{C}$ ,  ${}^{10}_6\text{C}$ ,  ${}^{11}_6\text{C}$  y  ${}^{12}_6\text{C}$  son isótopos (el número infrayacente representa la cantidad de protones y el valor suprayacente indica el número de masa). En cambio, los isótonos tienen igual número de neutrones pero diferentes cantidades de protones y los isóbaros presentan diferente número tanto de protones como de neutrones, y el número de masa similar. El  ${}^{22}_9\text{F}$ ,  ${}^{23}_{10}\text{Ne}$  y  ${}^{24}_{11}\text{Na}$  constituyen un ejemplo de isótonos, mientras que el  ${}^{16}_6\text{C}$ ,  ${}^{16}_7\text{N}$  y  ${}^{16}_8\text{O}$  son isóbaros.

Los diferentes átomos se ubican en una tabla denominada carta isotópica la cual puede ser apreciada en la Figura 2.2, construida en base al número de neutrones y protones de cada elemento conocido (Faure 1977).

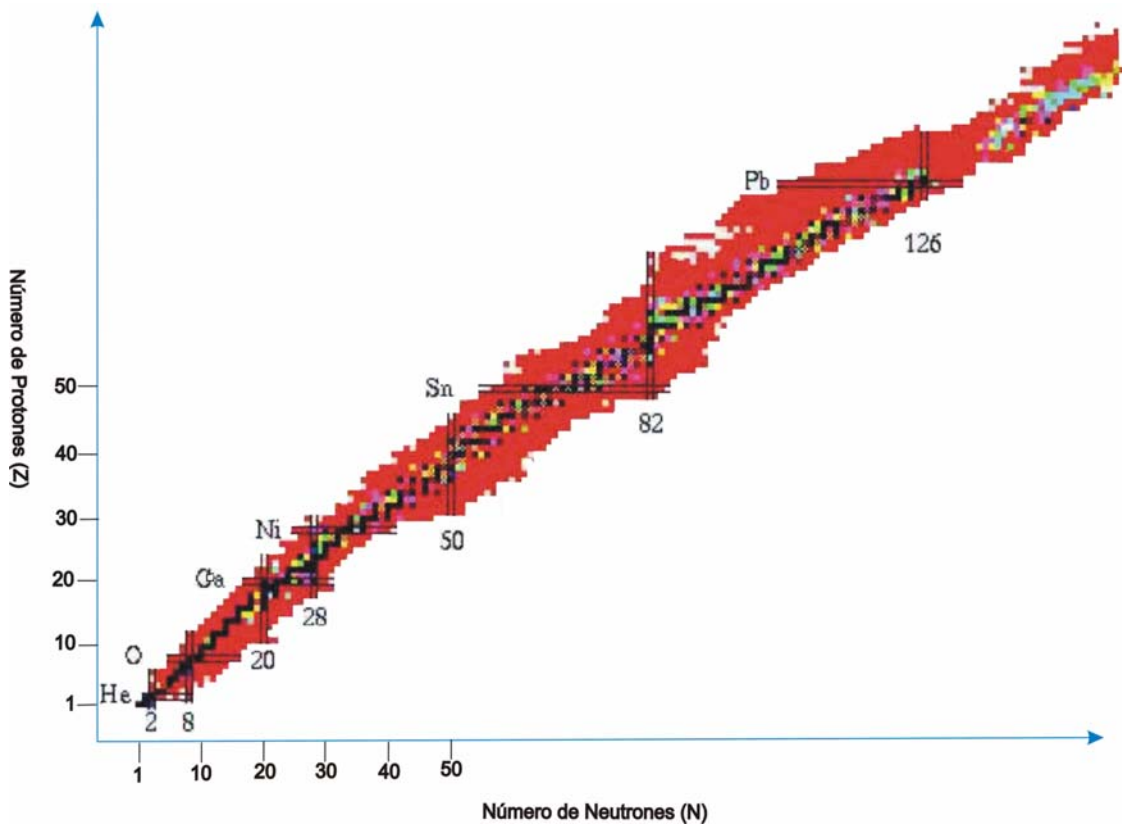


Figura 2.2. Carta Isotópica reducida.

(Tomado y modificado de [www.csl.nist.gov/div837/division/imagenes/nuchart1.gif](http://www.csl.nist.gov/div837/division/imagenes/nuchart1.gif), 2003).

Los diferentes tipos de elementos: isótopos, isótonos e isóbaros, se muestran en la Figura 2.3.

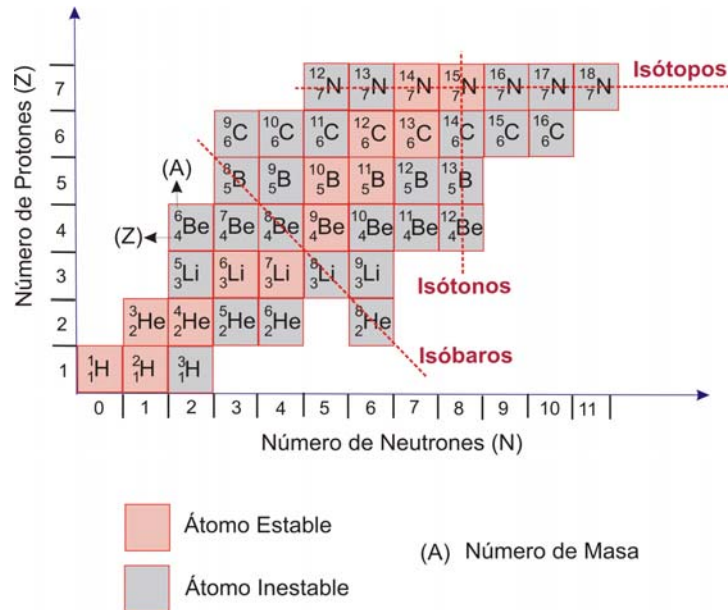


Figura 2.3. Fragmento de la Carta Isotópica, indicando la variedad isótopos, isótonos e isóbaros.

(Tomado y modificado de Faure, 1977)

Según Faure (1977), cuando un átomo se descompone en otras partículas, la masa original de éste (antes de descomponerse) es menor que la suma de las masas de las partículas resultantes, debido a que una porción de éstas es transformada en energía de unión nuclear, la cual mantiene la cohesión de las partículas del núcleo e impide que se repelan entre sí. La masa transformada a energía se denomina *masa defecto*. La masa de un átomo y de las subpartículas es expresada en unidad de masa atómica (amu).

$$1 \text{ unidad de masa atómica (amu)} = \frac{1}{N} \text{ gramos} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

donde  $N = 6,02252 \times 10^{23}$  es el número de Avogadro

La energía de unión nuclear se puede calcular a través de la ecuación de energía cinética dada por Einstein:

$$E_B = \Delta M c^2 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

donde:

$E_B$  = Energía de unión nuclear.

$\Delta M$  = Masa defecto o masa transformada a energía.

$c$  = Velocidad de la luz =  $2,998 \times 10^{10}$  cm/seg.

La unidad básica de energía en el sistema C.G.S. es el ergio (erg). Para cuantificar la cantidad de energía involucrada en la reacción atómica de un átomo simple, la cual es menor que un ergio se emplea el electrón voltio (eV).

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-12} \text{ ergs.}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-12} \times 10^6 \text{ ergs. (1 millón de eV)}$$

Sustituyendo la ecuación (2.1) en la ecuación (2.2), se obtiene la equivalencia de una unidad de masa atómica a energía:

$$E = 1 \text{ amu} \times c^2 \times \text{Conversión} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$E = \frac{(2,998 \times 10^{10})^2}{6,02252 \times 10^{23} \times 1,602 \times 10^{-12} \times 10^6} = 931,6 \text{ MeV}$$

Una unidad de masa atómica (1 amu) equivale a 931,6 MeV de energía. El valor de  $1,602 \times 10^{-12} \times 10^6 = \text{Conversión}$  de ergios a MeV.

Para determinar la energía de unión nuclear empleando la masa de defecto, se utiliza la fórmula de Einstein adaptada:

$$E_B = 931,6\Delta M \text{ MeV} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Por ejemplo, la masa atómica teórica del  ${}_{13}^{27}\text{Al}$  es:

Masa atómica teórica =  $Z \times$  masa (protón) +  $N \times$  masa (neutrón)

Masa atómica teórica =  $(13 \times 1,007825) + (14 \times 1,008665)$

Masa atómica teórica = 27,223035

La masa atómica práctica es 26,981541 amu. La diferencia entre el valor obtenido de la masa atómica teórica y la masa práctica, es la cantidad de masa defecto igual a 0,241494 la cual es transformada en energía de unión nuclear.

Para determinar la energía de unión nuclear del  ${}_{13}^{27}\text{Al}$  se utiliza la ecuación 2.4:

$$E_B = 0,241494 \times 931,6 = 224,97581 \text{ MeV.}$$

$$E_B = \frac{0,241494 \times 931,6}{27} = 8,332 \text{ MeV.}$$

La energía de unión nuclear por átomo puede variar según cada elemento entre 7,5 y 8,8 MeV. Los átomos de hidrógeno, helio, litio y berilio tienen baja energía. Para otros elementos la energía de unión nuclear aumenta levemente con el incremento del número de masa (A).



## *Estabilidad Atómica y Decaimiento Radioactivo*

Según Faure (1977), en la naturaleza existen isótopos estables e inestables, así cada elemento puede contener ambos tipos de isótopos o un solo tipo de ellos.

Los átomos cuyo núcleo es inestable pasan a través de una serie de transformaciones nucleares hasta que logran la estabilidad, implicando variaciones en la cantidad de protones y neutrones presentes en el núcleo, y en otros casos ocurre una reacción nuclear en donde el núcleo se fisiona; éstos procesos son denominados *decaimiento radioactivo*.

Los *átomos estables radiogénicos* son aquellos que se generan a partir del decaimiento de elementos inestables, mientras que los *estables no radiogénicos* se originan en la naturaleza en su estado estable.

Los átomos inestables son denominados *átomos padre* o radioactivo. Éstos pueden transformarse en elementos estables u otros inestables, llamados *átomo hijo*, radiogénico o radioelemento ya sea del mismo elemento químico o de otro distinto, emitiendo partículas radioactivas.

En la Figura 2.4 se muestra un diagrama generalizado que representa la estabilización de los átomos inestables.

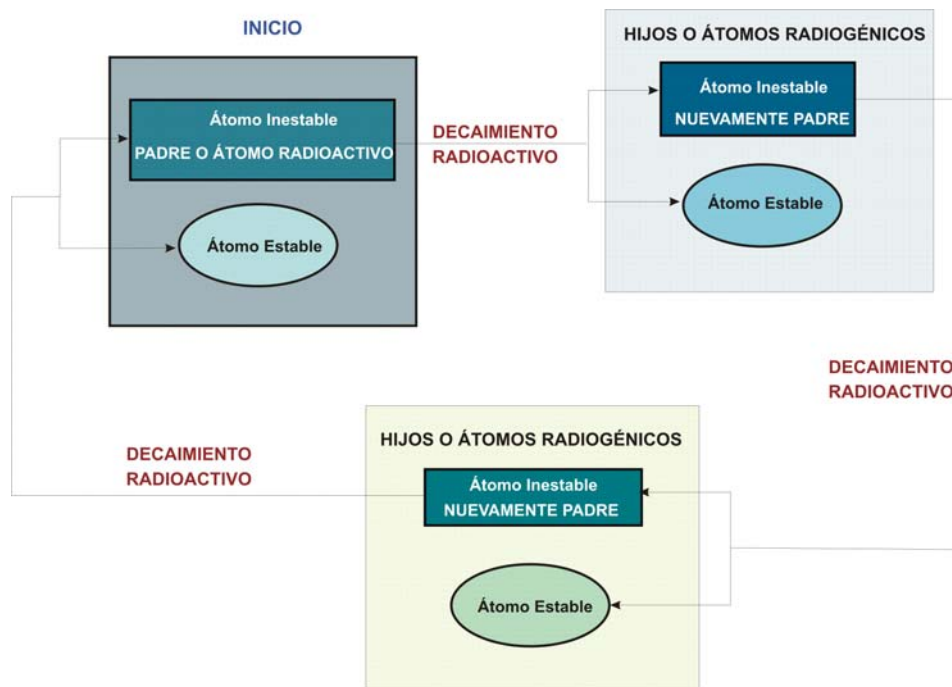


Figura 2.4. Diagrama del proceso generalizado de decaimiento radioactivo.

La *vida media* ( $\tau$ ) se define como el promedio de vida de los átomos de un elemento radioactivo (Calzadilla, 1978).

$$\text{Vida media} = \tau = \frac{-1}{\lambda}$$

El tiempo de vida media o de semidesintegración es el tiempo requerido para que una cantidad de átomos radioactivos decaigan a la mitad (Calzadilla, 1978). La vida de un isótopo radioactivo se mide generalmente por el tiempo que tarda en perder la mitad de su actividad (Gran Enciclopedia del Mundo, 1970).

$$\text{Tiempo de vida media} = T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Según Faure (1977), los isótopos estables e inestables pueden ser considerados de dos formas según la rapidez de la tasa de decaimiento radioactivo: la

primera como átomos que "ocurren de forma natural" en donde la tasa es lenta en comparación con la edad del sistema solar. La segunda forma, en la cual la tasa es muy rápida y difícilmente observable en el tiempo, estos isótopos son producidos artificialmente en el laboratorio.

De los 1700 átomos que se conocen sólo 260 son estables (cantidad variable sometida a nuevos descubrimientos). Este rango de estabilidad se muestra en la carta isotópica (ver Figura 2.2), donde los átomos estables forman un "largo valle" y franjeando a éste, se ubica la zona de los isótopos inestables.

Los átomos inestables que ocurren naturalmente pueden originarse de tres formas distintas:

a) Por decaimiento radioactivo lento, conformado por aquellos átomos que al momento de su formación eran de naturaleza inestable y no decayeron completamente, es decir, que no se produjeron de un átomo padre sino que éstos ya eran inestables desde su origen. Ejemplo:  ${}_{92}^{238}\text{U}$  y el  ${}_{92}^{235}\text{U}$  entre otros.

b) Por elementos inestables, puede ocurrir que los átomos inestables se originen por el decaimiento de padres radioactivos en un período largo de tiempo. Ejemplo:  ${}_{92}^{234}\text{U}$  y  ${}_{90}^{230}\text{Th}$ .

c) Por reacciones nucleares. Consiste en un mecanismo de decaimiento producido por reacciones nucleares en los elementos inestables, donde ocurre fisión del átomo y consecuentemente la fragmentación de éste para formar dos o más átomos. El  ${}_{6}^{14}\text{C}$  y  ${}_{4}^{10}\text{Be}$  se generan a través de fisión.

Existen diversas unidades de medida de la actividad radioactiva, entre ellas el Becquerelio (Bq), y el Curie (Ci).

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Según Calzadilla (1978), en el proceso de decaimiento radioactivo se derivan una serie de partículas en forma de masa y energía (emisión de radiación o partículas radioactivas) denominadas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) y gamma ( $\gamma$ ). Se llama *radiación alfa* al flujo de partículas compuestas por dos protones y dos neutrones. Estas partículas son equivalentes a los núcleos de helio (ver Figura 2.5). La *radiación beta* es por lo general un flujo de electrones (raras veces positrones). La *radiación gamma* está constituida por ondas electromagnéticas, que se diferencian de los rayos X por su mayor frecuencia o menor longitud de onda. Todos los tipos de radiación al atravesar la materia interaccionan y provocan algunos de los siguientes fenómenos: ionización de átomos y moléculas, reacciones químicas, luminiscencia de determinadas sustancias, desprendimiento de calor, entre otros.

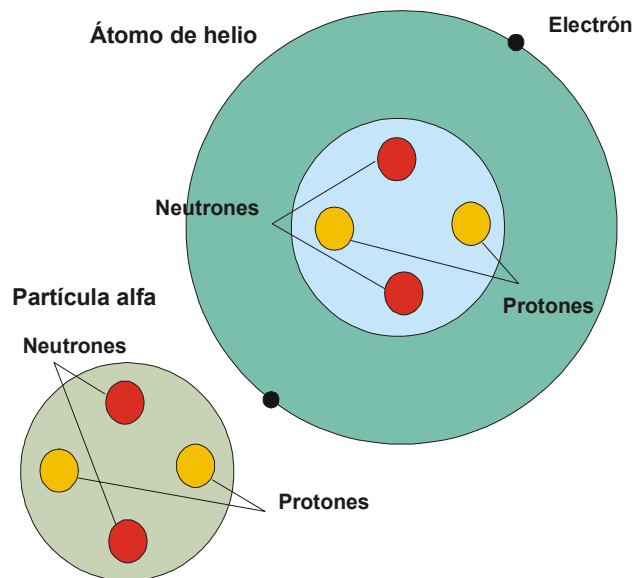


Figura 2.5. Equivalencia entre la partícula Alfa y el átomo de helio.

(Tomado y modificado de la Gran Enciclopedia del Mundo, 1970).

En condiciones normales la radiación alfa puede penetrar en el aire desde 2,5 hasta 8,5 cms, las partículas beta de 10 a 13 m, y las gamma hasta algunos cientos de metros. La radiación alfa puede detenerse con una hoja de papel, las partículas beta con una lámina de aluminio de 0,5 cms de espesor, y la radiación gamma con una placa de aluminio de 50 a 60 cms de espesor.

### *Reglas de Estabilidad Atómica*

No existen reglas determinadas que indiquen si un núcleo particular es radioactivo (inestable) o no y el modo en que éste se desintegraría. Sin embargo, se han obtenido algunas consideraciones teóricas y prácticas. Como por ejemplo:

1. Todo núcleo que contenga más de ochenta y cuatro (84) protones es inestable. Tal es el caso de los isótopos de Uranio ( $Z=92$ ).
2. La regla de los “números mágicos” 2, 8, 20, 50, 82, 126 que corresponden a números de protones o neutrones de isótopos, los cuales generalmente son más estables que sus vecinos de la Tabla Periódica.
3. La paridad de los números  $Z$  y  $N$  de los isótopos como indicativo de la estabilidad, debido a que es muy común que aquellos que presentan números pares de protones y neutrones sean estables, al igual que si uno de ellos es impar, en cambio muy pocos átomos estables (cinco isótopos) presentan ambos números impares.
4. Medida del cociente  $(n/p)$  entre la cantidad de neutrones y protones de un isótopo, la cual permite determinar si éste es estable o no, y bajo el cual se puede establecer zonas de mayor probabilidad de estabilidad.

Una relación 1:1 es para los elementos livianos (con un Z variable entre 1 a 10), en cambio para los números atómicos alrededor de 83, el valor de  $n/p$  es hasta 1,52. Graficando sobre la carta isotópica la relación 1:1 (ver Figura 2.6), se obtienen sectores de mayor probabilidad de decaimiento. En la región izquierda de la franja de estabilidad, los átomos tienden a decaer por el mecanismo beta negatrón debido al exceso de neutrones. A la derecha de la recta de relación 1:1, existe mayor probabilidad de decaimiento beta positrón, originado por el exceso de protones. Entre la recta de relación 1:1 y la franja de estabilidad isotópica, se presenta el sector de átomos que puede decaer por cualquier mecanismo con una probabilidad considerable ([http://www.puc.cl/sw\\_educ/qda1106/CAP4/4B/](http://www.puc.cl/sw_educ/qda1106/CAP4/4B/),2002).

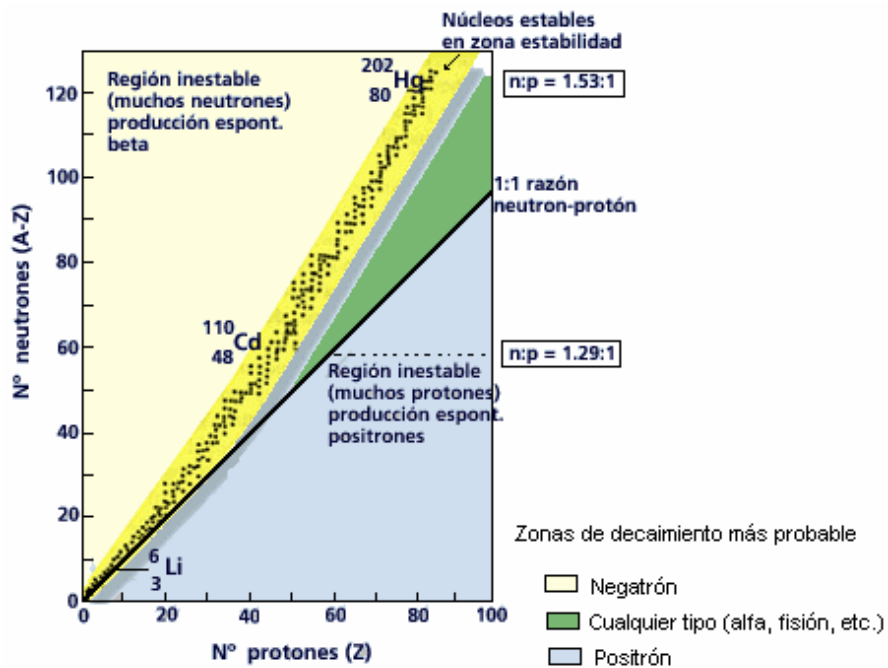


Figura 2.6. Carta isotópica (Z Vs. N) y zonas de mayor probabilidad de decaimiento radioactivo. (Tomado y modificado de [http://www.puc.cl/sw\\_educ/qda1106/CAP4/4B/](http://www.puc.cl/sw_educ/qda1106/CAP4/4B/),2002).

## 2.4 Ecuación Básica de Decaimiento Radioactivo

Esta ecuación fue planteada por Rutherford y Soddy en el año de 1900. Éstos científicos propusieron que los átomos de elementos radioactivos se desintegran espontáneamente formando átomos de otro elemento, mediante el siguiente enunciado: *“La tasa de decaimiento radioactivo de un átomo es proporcional al número de éstos presentes en un instante de tiempo  $t$ ”*

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

en donde  $\lambda$  representa la constante de decaimiento, es decir, la probabilidad con la cual un átomo puede decaer en una unidad de tiempo, y  $N$  es el número de átomos radioactivos presentes en el mismo instante de tiempo.

Separando las variables y luego integrando se obtiene:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \Rightarrow \quad \int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \quad \Rightarrow \quad \text{Ln}(N) = -\lambda(t + c)$$

donde  $c$  es una constante

$$\Rightarrow \quad \text{Ln}(N) = -\lambda t - \lambda c$$

Aplicando la función exponencial a ambos lados de la expresión anterior, se obtiene:

$$N = e^{-\lambda t - \lambda c} \quad \Rightarrow \quad N = e^{-\lambda t} e^{-\lambda c}$$

por ser  $c$  constante, entonces  $e^{-\lambda c}$  también es una constante y se denota con  $k$ . Por lo tanto,

$$N(t) = ke^{-\lambda t} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Suponiendo que la cantidad de átomos presentes al momento de formarse el elemento radioactivo es  $N_0$ , es decir,  $N(0) = N_0$  de la ecuación (2.6), se obtiene el valor de la constante  $k$ :

$$N(0) = ke^{-\lambda(0)} \Rightarrow N_0 = N(0) = k$$

Sustituyendo el valor de “ $k$ ” en la ecuación (2.6):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Despejando el tiempo  $t$  de la ecuación (2.7):

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{N(t)}{N_0} \right] \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

En la ecuación (2.8) no se conocen los valores de  $N(t)$  y  $N_0$ , por tal razón es necesario expresar la ecuación anterior en términos de los padres e hijos. Así el número de átomos hijos, puede calcularse de la siguiente manera:

$$D^* = N_0 - N(t) \quad (\text{Ecuación 2.9})$$



donde:

$$\begin{aligned}N_0 &= \text{Padres inestables iniciales} \\D^* &= \text{Hijos que se formaron en un tiempo } t \\N(t) &= \text{Padres inestables en un tiempo } t\end{aligned}$$

En el caso general, el número de hijos presentes en el decaimiento está dado por:

$$D_h = D_0 + D^* \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

donde:

$$\begin{aligned}D_h &= \text{Hijos totales en toda la historia del decaimiento} \\D_0 &= \text{Átomos hijos en } t(0) \\D^* &= \text{Hijos que se formaron después de } t(0)\end{aligned}$$

Despejando  $N_0$  de la ecuación (2.7) y sustituyendo en (2.9) se obtiene:

$$D^* = N(t)(e^{\lambda t} - 1) \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Debido a que la vida media de los isótopos de uranio es de 4500 millones de años, tienen una gran relevancia en geología. Razón por la cual en este trabajo se estudia la fisión nuclear de éstos. El  $^{238}\text{U}$  decae por fisión nuclear y por decaimiento alfa, por ende la constante de decaimiento  $\lambda_t$  para este caso está dada por:

$$\lambda_t = \lambda_\alpha + \lambda_f \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

$\lambda_\alpha$  = Constante de decaimiento alfa.

$\lambda_f$  = Constante de decaimiento por fisión nuclear.

El decaimiento total  $D_{total}$  está expresado por:

$$D_{total} = D_\alpha + D_f \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

$D_\alpha$  = Decaimiento alfa.

$D_f$  = Decaimiento por fisión nuclear.

Adaptando la ecuación (2.11) para determinar el decaimiento para el caso del  $^{238}\text{U}$ , se obtiene:

$$D_{total} = \frac{\lambda_f}{\lambda_t} {}^{238}\text{U} (e^{\lambda_f t} - 1) + \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_t} {}^{238}\text{U} (e^{\lambda_\alpha t} - 1) \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

En esta investigación se toma en cuenta solamente el decaimiento por fisión, que es el aplicado para el método de datación por Huellas de Fisión, que se describe en el capítulo III. A consecuencia la ecuación anterior se reduce a la siguiente expresión:

$$D_f = \frac{\lambda_f}{\lambda_t} {}^{238}\text{U} (e^{\lambda_f t} - 1) \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Para que esta expresión represente la edad de una roca en Geología es necesario el cumplimiento de las siguientes reglas:

- a) La roca o sistema de minerales no debe haber ganado ni perdido padres o hijos, lo que equivale a decir que el sistema es cerrado.

- b) Debe ser posible la asignación de un valor real  $D_0$ . En este caso  $D^* > D_0$ .
- c) La constante  $\lambda$  debe ser conocida.
- d) Las medidas de  $D_h$  y  $N(t)$  deben ser reales (Gunter , 1977).

## 2.5 Tipos de Decaimiento Radioactivo

Según Faure (1977), existen seis (6) mecanismos de decaimiento radioactivo que ocurren en los átomos inestables. Este decaimiento depende de la naturaleza de cada átomo, los cuales pueden decaer por uno o varios mecanismos. Entre los diversos tipos de decaimiento se tienen: beta negatrón ( $\beta^-$ ), beta positrón ( $\beta^+$ ), captura de electrones ( $K_e$ ), decaimiento ramificado y decaimiento beta de isóbaros, decaimiento alfa ( $\alpha$ ) y fisión nuclear ( $f$ ).

### *Decaimiento Beta Negatrón ( $\beta^-$ )*

En este tipo de decaimiento ocurre una transformación de un neutrón en un nuevo protón, un electrón (partícula  $\beta^-$ ) y un antineutrino, acompañado de la emisión de una energía en forma de rayos gamma. Dicho proceso natural ocurre debido a que en el átomo inestable existe un exceso de neutrones, para tender a estabilizarse se “elimina” uno de sus neutrones. El protón formado queda albergado en el núcleo mientras que la partícula  $\beta^-$  es expulsada hacia la nube de electrones, lo cual puede ser apreciado en la Figura 2.7.

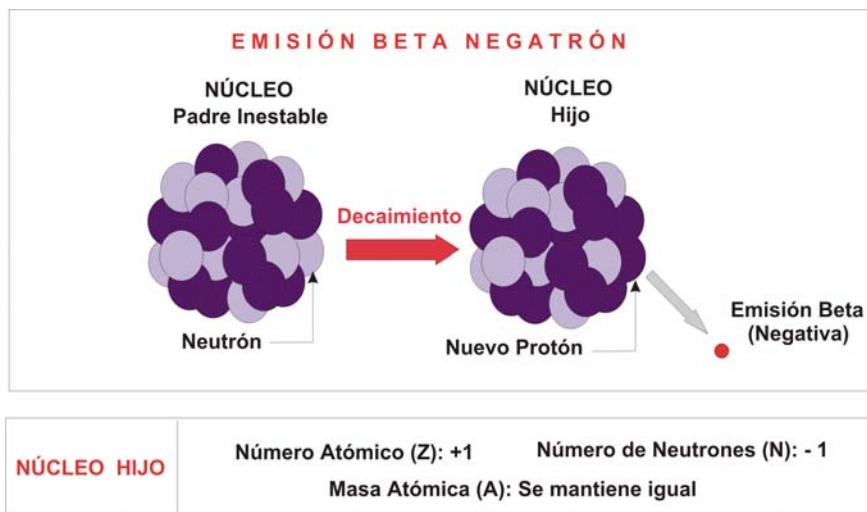


Figura 2.7. Ilustración del decaimiento beta negatrón.

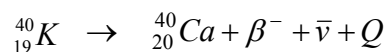
(Tomado y modificado del Tarbuck et al., 1998 )

A consecuencia disminuye en una unidad el número de neutrones, aumenta el número atómico y se mantiene igual el número másico, la configuración final del átomo se puede apreciar en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Configuración inicial y final de los átomos después del decaimiento beta negatrón.  
(Faure, 1977)

<b>Beta negatrón</b>	Número Atómico	Número de Neutrones	Número de masa
Padre	Z	N	A = Z + N
Hijo	Z + 1	N - 1	A = Z + 1 + N - 1

Este tipo de decaimiento puede verse en forma de ecuación de la siguiente manera, para el caso particular del potasio (K):



donde  $Q$  es la energía total que se genera de esta transformación la cual es la sumatoria de la energía emitida por el electrón ( $\beta^-$ ), el antineutrino ( $\bar{\nu}$ ) y los rayos gamma ( $\gamma$ ). Los átomos hijo producto de este tipo de decaimiento son isóbaros.

### *Dcaimiento Beta Positrón ( $\beta^+$ )*

Aquellos núcleos que contengan un exceso de protones van a decaer por el mecanismo beta positrón ( $\beta^+$ ), con la finalidad de aproximarse o llegar al estado estable. Este proceso consiste en la transformación de un protón localizado en el núcleo del átomo a un neutrón, un positrón denominado también electrón con carga positiva (partícula  $\beta^+$ ) y un neutrino ( $\nu$ ), donde las dos últimas partículas son expulsadas del núcleo. El decaimiento antes descrito se ilustra en la Figura 2.8.

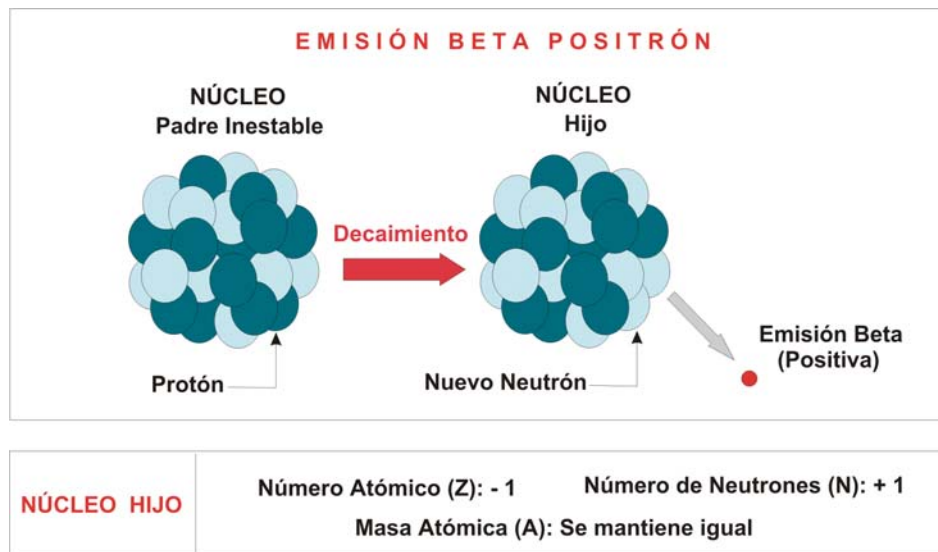
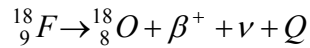


Figura 2.8. Dcaimiento Beta Positrón mostrando la generación de un nuevo neutrón.

(Tomado y modificado del Tarbuck et al.,1998 )

Este tipo de decaimiento puede verse en forma de ecuación de la siguiente manera, para el caso particular del flúor (F):



donde  $Q$ , análogamente al decaimiento antes explicado es la energía total que se genera. Esta energía, es la sumatoria de la energía emitida por el positrón ( $\beta^+$ ), el neutrino ( $\nu$ ) y los rayos gamma ( $\gamma$ ). Los átomos hijo producto de este tipo de decaimiento también son isóbaros (Faure, 1977).

En la Tabla 2.2 se muestra la configuración inicial y final de los átomos antes y después del decaimiento positrón.

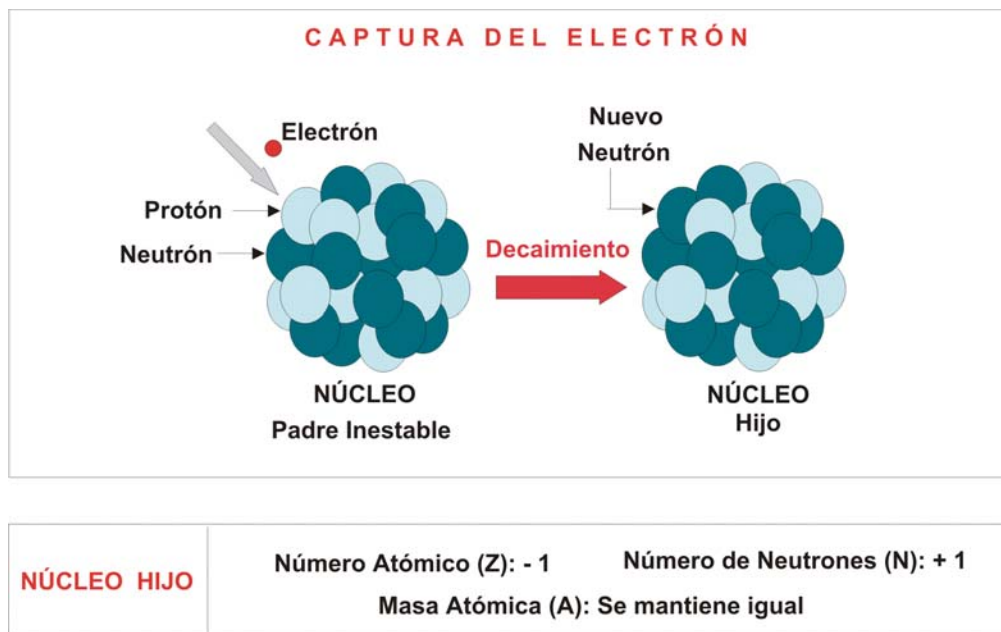
*Tabla 2.2. Configuración inicial y final de los átomos después del decaimiento beta positrón (Faure, 1977).*

<b>Beta positrón</b>	Número Atómico	Número de Neutrones	Número de masa
Padre	$Z$	$N$	$A = Z + N$
Hijo	$Z - 1$	$N + 1$	$A = Z - 1 + N + 1$

#### *Decaimiento por Captura del Electrón ( $K_e$ )*

Este tipo de decaimiento ocurre debido a que el átomo necesita aumentar la cantidad de neutrones y disminuir el número atómico ( $Z$ ).

El núcleo captura un electrón extranuclear el cual va a reaccionar con un protón, para generar un neutrón y un neutrino que es emitido fuera del núcleo, esto es ilustrado en la Figura 2.9.

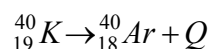


*Figura 2.9. Diagrama del decaimiento por Captura del Electrón.  
(Tomado y modificado del Tarbuck et al., 1998)*

Según las distancias de las órbitas en donde se localizan los electrones al núcleo, puede aumentar o disminuir la probabilidad de captura de un electrón. Ésto es, si un electrón se encuentra en la órbita más cercana al núcleo, será más fácil poder capturarlo, en cambio mientras mayor sea esta distancia más difícil será la captura, más no imposible.

Cada vez que ocurre una captura se emite una serie de rayos  $X$ , posteriormente el espacio libre que dejó el electrón seleccionado es ocupado por otro que proviene de la capa más próxima, y nuevamente se produce un vacío el cual va a tratar de ser ocupado por otro electrón de la siguiente capa, pero los rayos  $X$  interactúan con este último electrón, evitando la ocupación. Por lo tanto, este electrón es expulsado del átomo en forma de energía. Los electrones cuya masa es transformada en energía y que luego son expelidos, se denominan *electrones Auger*.

Este tipo de decaimiento puede verse en forma de ecuación de la siguiente manera, para el caso particular del potasio ( $K$ ):



donde  $Q$  es la energía liberada por este tipo de decaimiento.

Como resultado de este mecanismo, el número de protones y de neutrones disminuye y aumenta en una unidad respectivamente, tal como se resume en la Tabla 2.3.

*Tabla 2.3. Configuración inicial y final de los átomos después del decaimiento por captura del electrón (Faure, 1977).*

<b>Captura del electrón</b>	Número Atómico	Número de Neutrones	Número de masa
Padre	$Z$	$N$	$A = Z + N$
Hijo	$Z - 1$	$N + 1$	$A = Z - 1 + N + 1$

Si el producto formado en el núcleo queda excitado entonces se produce la emisión de un rayo gamma. La hija es un isóbaro con su padre y ocupa la misma posición relativa en la carta de estabilidad de los átomos a su padre, como la hija producto de un decaimiento positrón (Faure, 1977).

#### *Decaimiento Ramificado y Decaimiento Beta de Isóbaros*

Este tipo de decaimiento se fundamenta en la regla de Mattauch (1934)<sup>8</sup>, que demuestra que dos isóbaros adyacentes no pueden ser estables. Por tal razón puede producirse un decaimiento ramificado en el cuál el isóbaro inestable forma dos átomos hijo isobáricamente estables.

<sup>8</sup>Citado en Faure (1977).



Por ejemplo, entre los dos isóbaros estables  $^{40}_{18}\text{Ar}$  y  $^{40}_{20}\text{Ca}$ , se encuentra el  $^{40}_{19}\text{K}$  que es inestable, tal cómo se ilustra en la Figura 2.10.

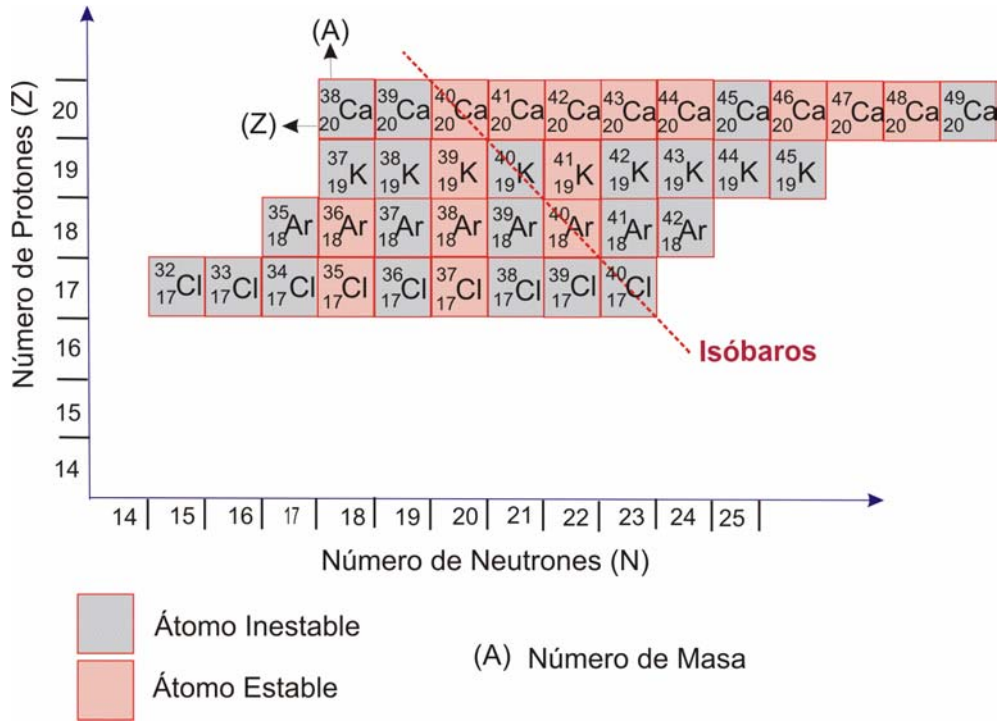


Figura 2.10. Fragmento de la carta isotópica en donde se resaltan los productos del decaimiento del  $^{40}_{19}\text{K}$  (Tomado y modificado de Faure Gunter, 1977).

En la figura 2.11 se ilustra otra forma de ver el decaimiento ramificado del  $^{40}_{19}\text{K}$  en  $^{40}_{18}\text{Ar}$  originado por decaimiento beta positrón y captura de electrón, y el  $^{40}_{20}\text{Ca}$  producido por la emisión de una partícula beta negativa (decaimiento beta negatrón).

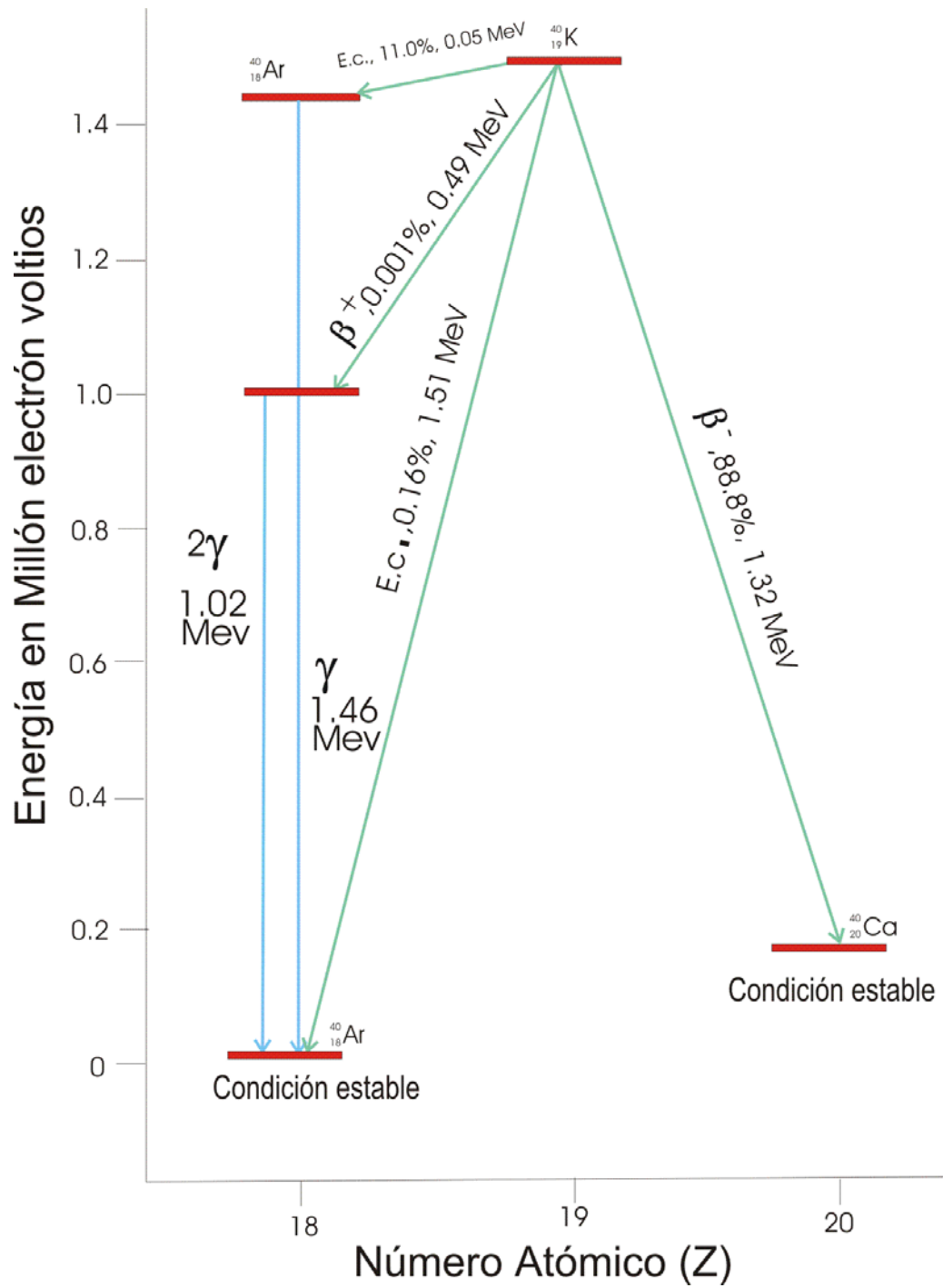


Figura 2.11. Diagrama esquemático del decaimiento ramificado del  $^{40}_{19}\text{K}$ .  
(Tomado y modificado de Faure Gunter, 1977).

## Decaimiento Alfa ( $\alpha$ )

Según Faure (1977), existe en la naturaleza un gran grupo de átomos radiogénicos que decaen por la emisión espontánea de partículas alfa de su núcleo. Este mecanismo puede ocurrir en átomos cuyo número atómico es mayor o igual a cincuenta y ocho ( $Z \geq 58$ ), también puede darse en algunos átomos con bajo número atómico como el  ${}^5_2\text{He}$ ,  ${}^5_3\text{Li}$  y  ${}^6_4\text{Be}$ . Las partículas alfa están compuestas de dos (2) protones y dos (2) neutrones y a consecuencia presentan una carga de +2 (ver Figura 2.5).

La emisión de una partícula alfa reduce los números atómico y neutrónico en dos (2) unidades cada uno, y la masa atómica en cuatro (4) unidades, tal como se muestra en la Figura 2.12. La hija es un isótopo de un elemento diferente y no es un isóbaro de su padre como en el caso de los decaimientos beta y captura de electrón.

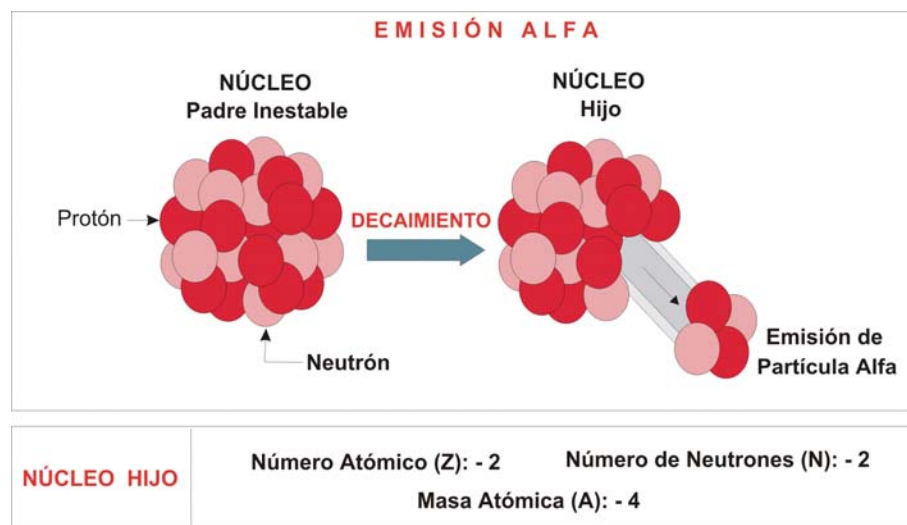
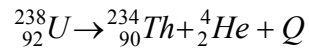


Figura 2.12. Diagrama del Decaimiento Alfa

(Tomado y modificado del Tarbuck et al. 1998)

Este tipo de decaimiento puede verse en forma de ecuación de la siguiente manera, para el caso particular del uranio (*U*):



donde el  ${}_2^4\text{He}$  representa la partícula  $\alpha$ , y *Q* la energía liberada.

En la Tabla 2.4 se muestra la configuración inicial y final de los átomos antes y después del decaimiento por emisión de partículas  $\alpha$ .

Tabla 2.4. Configuración inicial y final de los átomos después del decaimiento por emisión de partículas  $\alpha$  (Faure, 1977).

<b>Decaimiento alfa</b>	Número Atómico	Número de Neutrones	Número de masa
Padre	<i>Z</i>	<i>N</i>	<i>A = Z + N</i>
Hijo	<i>Z - 2</i>	<i>N - 2</i>	<i>A - 4 = Z + N - 4</i>

### *Decaimiento por Fisión Nuclear*

La fisión de átomos inestables es uno de los mecanismos de decaimiento radioactivo que permite al isótopo aproximarse al estado estable.

La fisión nuclear fue descubierta por Otto Hahn y Fritz Strassmann (1938)<sup>9</sup>, cuando bombardearon uranio (*U*) con neutrones y obtuvieron bario (*Ba*). Estos científicos interpretaron la formación de este elemento como una fragmentación en dos o más átomos del uranio inicial, acompañado de la emisión de neutrones.

<sup>9</sup>Citado en Faure (1977).

La fisión de átomos puede ser inducida bombardeando el núcleo de ciertos elementos con neutrones, protones, deuterones, partículas alfa, rayos gamma y rayos X, donde cada evento de fisión emite partículas alfa, neutrones y posiblemente otros fragmentos ligeros con una sumatoria de energía de 200 MeV. (Faure, 1977).

No existen reglas conocidas hasta ahora para determinar cuales isótopos pueden o no fisionarse, esto va a depender de la naturaleza de cada uno de ellos. Por ejemplo, los veintitrés (23) isótopos de uranio que se han descubierto hasta ahora (<http://www2.bnl.gov/ton/cgi-bin/tonmap10?1656,6>), pueden sufrir fisión nuclear con una baja probabilidad o porcentaje, mientras que el decaimiento alfa es mucho más frecuente.

Cuando un átomo se fisiona, se fragmenta en dos o más átomos los cuales no conservan las características físico-químicas del isótopo inicial. Los átomos resultantes de la fisión o átomos hijos, presentan generalmente un exceso de neutrones y se ubican en la sección derecha de la franja de estabilidad en la carta isotópica. Posteriormente los átomos hijo son afectados por el mecanismo de decaimiento beta negatrón para disminuir el número de neutrones emitiendo partículas beta. Por ejemplo, la fisión nuclear del  ${}_{98}^{252}\text{Cf}$  produce dos átomos inestables que luego decaen ambos por beta negatrón, el  ${}_{45}^{108}\text{Ru}$  y  ${}_{54}^{140}\text{Xe}$ , lo cual puede ser observado en la Figura 2.13.

## DECAIMIENTO POR FISIÓN NUCLEAR

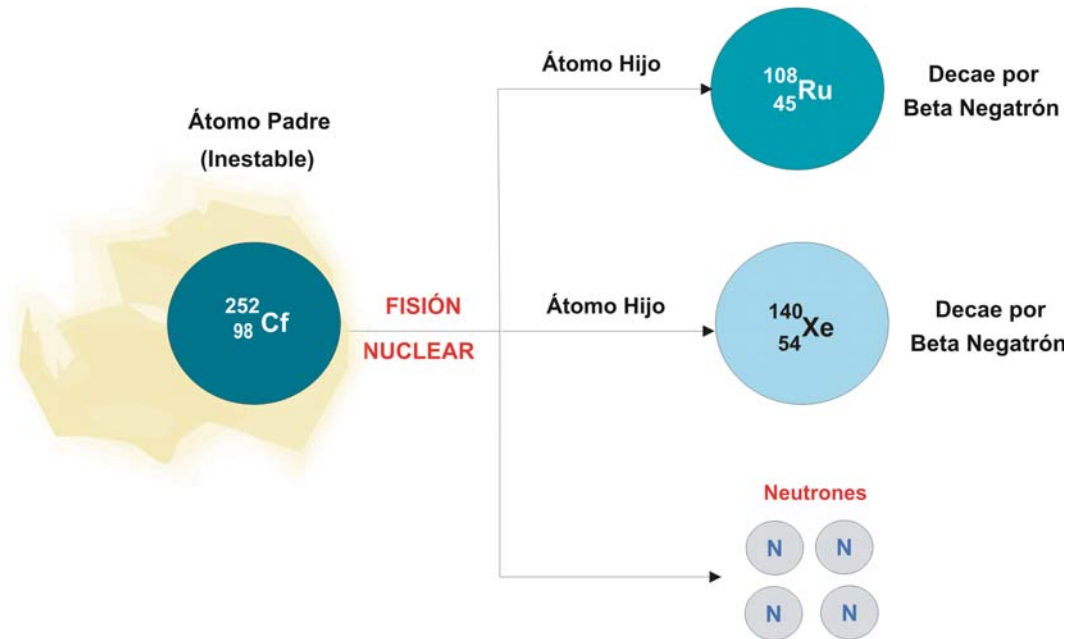


Figura 2.13. Esquema ilustrado del decaimiento por fisión nuclear del elemento Cf.  
(Tomado y modificado del Tarbuck et al., 1998)

El mecanismo de la fisión nuclear postulado por Bohr y Wheeler<sup>10</sup>, explica que el núcleo de un átomo pesado se comporta como una gota de líquido, el cual asume una forma esferoidal cuando se aumenta la tensión superficial alcanzando un tamaño crítico dependiendo de la relación  $Z^2/A$ . En el momento en que la fuerza electrostática de repulsión es más grande que las fuerzas que mantienen al átomo unido, éste se fisiona.

<sup>10</sup>Citados en Faure (1977).

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN (MHF)**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo se estudiarán los fundamentos teóricos que rigen el Método de Huellas de Fisión. Posteriormente se explicarán las técnicas estadísticas más usuales de los laboratorios de huellas de fisión para estimar la edad de un evento geológico y por último, se familiarizará al lector con la obtención de los parámetros contenidos en la ecuación de edad de dicho método según la Técnica del Detector Externo.

#### **3.2 Conceptos Básicos en Huellas de Fisión**

El Método de Huellas de Fisión se fundamenta en el decaimiento por fisión nuclear de los átomos inestables, el cual fue explicado en el capítulo anterior. Durante el proceso de fragmentación de los átomos padres, se van a generar una serie de estructuras o surcos en el sólido donde están contenidos estos átomos. Tales estructuras o surcos se denominan huellas de fisión. El número de huellas de fisión es muy importante, puesto que es uno de los parámetros a utilizarse en la fórmula conocida como ecuación práctica de edad según el Método de Huellas de Fisión, que será reseñada en la sección 3.4 de este capítulo. A continuación se definen algunos conceptos empleados en este método de datación según Wagner (1992):

*Huella de Fisión:* es un canal o surco con una trayectoria lineal medida en micras ( $\mu$ ) o nanomicras ( $n\mu$ ), que se forma en un medio sólido, como resultado de la fragmentación o fisión de un isótopo inestable. Cada fragmento es expelido en dirección opuesta al centro de ubicación espacial del átomo original en el sólido, colisionando con la estructura mineralógica y generándose una huella de fisión.

*Rango de la huella:* es la medida de la trayectoria de la zona de daño o surco creado por la partícula al hacer fisión nuclear en el sólido. También puede definirse, como el vector que conecta el punto de inicio con la posición final de la partícula. La longitud normal de una huella de fisión está entre los 20 y 16 micrones ( $\mu$ ).

*Detector:* se llama detector al sólido en el cual se registran las huellas. Existen detectores de diferentes materiales entre los cuales están plásticos, vidrios, micas, entre otros. En la naturaleza se encuentran detectores naturales en donde no sólo se registran las huellas sino que también se originan espontáneamente, tales detectores pueden ser minerales como el apatito, circón, etc., pero en este trabajo sólo se aplica el término detector en el sentido estricto de registrar huellas y no de producirlas.

*Detector Externo:* es una lámina de mica natural o sintética (plástico), la cual se coloca sobre la superficie del mineral que contiene las huellas. Cuando este montaje es irradiado en el reactor nuclear, se generan nuevas huellas en el mineral las cuales son registradas en el detector.

*Estándar o muestra de edad conocida:* Es un mineral de edad conocida, por otro método de datación radiométrica como por ejemplo: potasio-argón (K/Ar), rubidio-estroncio (Rb/Sr) entre otros. Se utiliza con la finalidad de determinar el Factor Z o factor de calibración, el cual será explicado en las próximas secciones. En la Tabla 3.1 se citan varios tipos de monitores y la localidad de donde son extraídos.



Tabla 3.1. Ejemplo de monitores (Tomado de Wagner, 1992).

Mineral	Localidad	50 % Temperatura de retención (°C)					
		1 hora	1 año	100 años	10 <sup>4</sup> años	10 <sup>6</sup> años	10 <sup>8</sup> años
Apatito	Sljudjanka	336	220	174	138	108	80
	Eldora	330	220	175	140	110	80
	Flockenbach	340	225	175	140	115	85
	Liebersbach	330	240	200	165	140	120
	Durango	335	225	180	145	115	90
Olivino	Mar Rojo	510	370	320	280	240	205
Circón	Indochina	700	550	480	420	370	330

*Grabado o Revelado Químico (Etching)*: es una técnica que se emplea para ensanchar y alargar las huellas de fisión que interceptan a la superficie del sólido de manera que sean visibles bajo un microscopio. El revelado químico es un método destructivo que consiste en la inmersión del detector o del sólido en un reactivo químico, que ataca preferentemente a las zonas previamente dañadas, es decir, a las huellas de fisión formadas.

*Temperatura de Cierre y Zona de Desvanecimiento Parcial (P.A.Z.)*: existen valores de temperatura específicos que actúan como un límite a partir del cual pueden comenzar a formarse las huellas, denominada temperatura de cierre o “closure temperature”. Disminuyendo el valor de la temperatura de cierre, se ubica la zona de retención de huellas, en donde éstas se generan. Por encima de esa temperatura límite se localiza la zona de desvanecimiento parcial o “partial annealing zone” en la cual las huellas son desvanecidas.

Las zonas de desvanecimiento parcial, de retención de huellas, y la temperatura de cierre varían según el mineral. En el caso particular del apatito, como se ilustra en la Figura 3.1, la zona de retención de huellas comprende desde los 125

°C (temperatura de cierre) hasta los 60°C, aunque pueden generarse huellas cercanas a la superficie, debido a la naturaleza aleatoria del proceso de decaimiento radioactivo. Por debajo de los 125 °C se encuentra la zona de desvanecimiento parcial, en donde comienzan a borrarse las huellas.



Figura 3.1. Gráfico ilustrativo de la temperatura de cierre y de las zonas de producción de huellas y de desvanecimiento parcial, en apatitos.

### 3.3 Nociones de Huellas de Fisión

#### *Estructura de la Huella*

Según Wagner (1992), existen básicamente dos tendencias que explican la estructura de la huella de fisión. Mientras una de ellas afirma que la huella presenta un carácter continuo, la otra se inclina hacia la intermitencia o discontinuidad de ésta.

La primera observación que se realizó sobre la estructura de una huella de fisión se hizo utilizando el microscopio de transmisión electrónica. Se concluyó que la huella constaba de una trayectoria de daño correspondiente a una zona estrecha de desplazamiento de los átomos.

Yada *et al* (1981, 1987)<sup>11</sup>, empleando un microscopio con alta resolución de 0.15 a 0.2  $n\mu$ , observó que la estructura cristalina en donde se encontraba el centro de la huella estaba destruida y alterada en un estado casi amorfo. En las zonas vecinas

de los canales de las huellas y en los bordes de éstas se observaron puntos defectuosos, mientras que en los planos del enrejado cristalino aparecía una deformación justo en la intersección de este plano con la huella. La deformación alrededor de la huella había sido observada anteriormente en las franjas de interferencias de Moiré según Morgan and Van Vliet<sup>12</sup>.

A través de observaciones realizadas con el microscopio electrónico en sulfato de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ), se determinó que las huellas latentes pueden ser discontinuas. Realizando experimentos con dispersión de rayos X de bajo ángulo en micas, feldespato plagioclásico y olivino, se observó la estructura discontinua de la huella y dos tipos de defecto en ésta, la cual es ilustrada en la Figura 3.2. El defecto extendido es un espacio que se forma por el paso del núcleo fragmentado, y se caracteriza por presentar una alta tasa de grabado. El segundo tipo de defecto se denomina puntos de defecto, que representan una pequeña fracción de espacios dañados en comparación al defecto extendido, dispersados como puntos, y contenidos en áreas llamadas “gap” o huecos localizadas entre las zonas centrales. Los puntos de defecto presentan una tasa de grabado mayor que el material no dañado, y menor que los defectos extendidos. Si la densidad lineal de los defectos extendidos es lo suficientemente alta, este tipo de defectos pueden solaparse creando una huella continua.

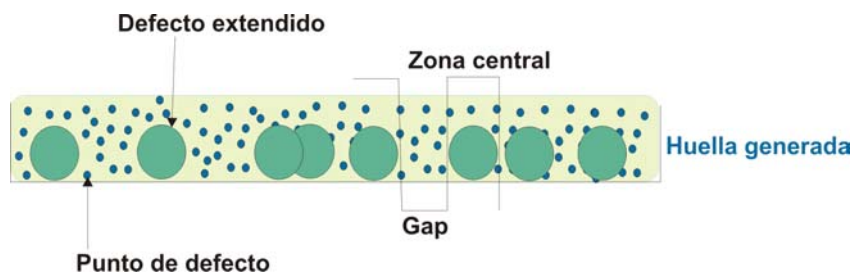


Figura 3.2. Modelo de la estructura de la huella de fisión. Muestra la zona de defecto, los puntos de defecto y el “gap”.  
(Tomado y modificado de Wagner, 1992)

<sup>11,12</sup>Citados en Wagner (1992).

El modelo “gap” no ha tenido una aceptación general y fue criticado por un grupo de científicos alemanes. Las huellas de fisión observadas en olivino con un microscopio electrónico de transmisión normal, mostraban aparentemente una estructura intermitente, y que luego empleando un microscopio con las mismas características pero con mayor resolución, se verificó la continuidad de la huella. La intermitencia determinada al principio fue justificada por falta de contraste, éstas observaciones fueron realizadas por Thiel *et al*<sup>13</sup>.

Para determinar el rango o la longitud de daño, se realizaron distintos experimentos debido a la complejidad que añade el tamaño microscópico de la huella. Uno de los métodos consistió en el uso del microscopio de transmisión de electrones, que permitió tomar microfotografías bombardeando con un rayo de electrones a micas sintéticas y naturales, que contenían huellas latentes ocasionadas por la fisión de uranio. En las microfotografías se observó que la longitud de la trayectoria de daño de una huella puede medir alrededor de 10 nm (nanomicras). Posteriormente, una mejora en la resolución de este tipo de microscopio permitió observar el enrejado de cristales de circón y sus huellas de fisión. La longitud de estas huellas variaba entre 1.5 y 4  $n\mu$  dependiendo del ángulo que formaban con los planos del enrejado. Actualmente, a través de múltiples experimentos se concluyó que la longitud de daño de una huella de fisión puede alcanzar hasta 20  $\mu$ .

#### *Formación de las Huellas*

Cuando el átomo se fisiona, los fragmentos expelidos van a interactuar con el medio sólido o detector en donde se encuentran, creando a su paso una trayectoria de daño. Finalmente cuando estas partículas se detienen, ya han generado lo que se conoce como huella de fisión.

La interacción de la partícula con el sólido origina la pérdida de energía y velocidad de ésta. Tal proceso se denomina poder de detenimiento (stopping power),

el cual está integrado por un poder de detenimiento nuclear (nuclear stopping power) ocasionado por el choque entre la partícula y el enrejado cristalino del sólido, y el poder de detenimiento electrónico (electronic stopping power) originado por las interacciones con los electrones que produce la excitación o expulsión de sus órbitas, y también la ionización del enrejado. Las interacciones con los electrones son importantes en la formación de huellas de fisión. El poder de detenimiento viene dado por la siguiente expresión:

$$\frac{-dE}{dx} = \left( \frac{-dE}{dx} \right)_n + \left( \frac{-dE}{dx} \right)_e \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde los índices  $n$  y  $e$  se refieren a las interacciones con los núcleos del enrejado y con los electrones respectivamente. Dependiendo de la cantidad de energía, puede dominar uno de los tipos de poder de detenimiento. En el caso de que la energía sea alta, la velocidad de la partícula excede a la de los orbitales de sus electrones y éstos son expulsados, quedando sólo el átomo que luego atraerá a otros electrones contenidos en el enrejado atómico, es decir, que a alta energía predominan las interacciones electrónicas. Si la energía es baja, las colisiones con el enrejado son dominantes (Wagner, 1992).

### Teorías sobre la Formación de Huellas

Hasta ahora no se ha logrado entender completamente el mecanismo de la formación de las huellas. Según Wagner (1992) varias teorías han tratado de explicar cómo se genera una huella, pero ninguna ha logrado justificar completamente todas las interrogantes relacionadas con los procesos que la originan. Entre las teorías están:

<sup>13</sup>Citado en Wagner (1992).

a) Los investigadores Fleischer, Price (1962, 1964)<sup>14</sup> y otros colegas propusieron dos tasas diferentes de energía que intervienen en la producción de huellas. La tasa total de energía perdida  $(-dE/dx)$  fue considerada de gran importancia para la formación de huellas, mientras que una tasa mínima  $(-dE/dx)_{crit}$  no podría registrar huellas en el sólido, aunque realmente estuvieran.

b) Años más tarde, Fleischer *et al* (1975)<sup>15</sup>, se inclinan por la teoría de la ionización primaria, es decir, denominada explosión iónica “spike” (ion explosion spike), que representa el número de iones formados por unidad de distancia a lo largo del recorrido de la partícula. En la Figura 3.3 se aprecia el aspecto de las huellas de fisión en forma de estrellas lo que indica una formación de tipo “spike”. Según esta teoría, una huella de fisión se genera en tres pasos:

- La partícula cargada induce un estallido de ionización a través de interacciones electrónicas, y origina un conjunto de iones positivos en la estructura cristalina del sólido.
- Los iones adyacentes con la misma carga son repelidos dentro de sus posiciones intersticiales, y algunas veces se forman una serie de espacios vacíos o vacantes.
- La estructura cristalina trata de equilibrarse.



Figura 3.3. Forma estrellada de las huellas de fisión.

<sup>14,15</sup>Citados en Wagner (1992).

En la Figura 3.4 se observa la formación de la huella de fisión según la teoría del “ión spike”.

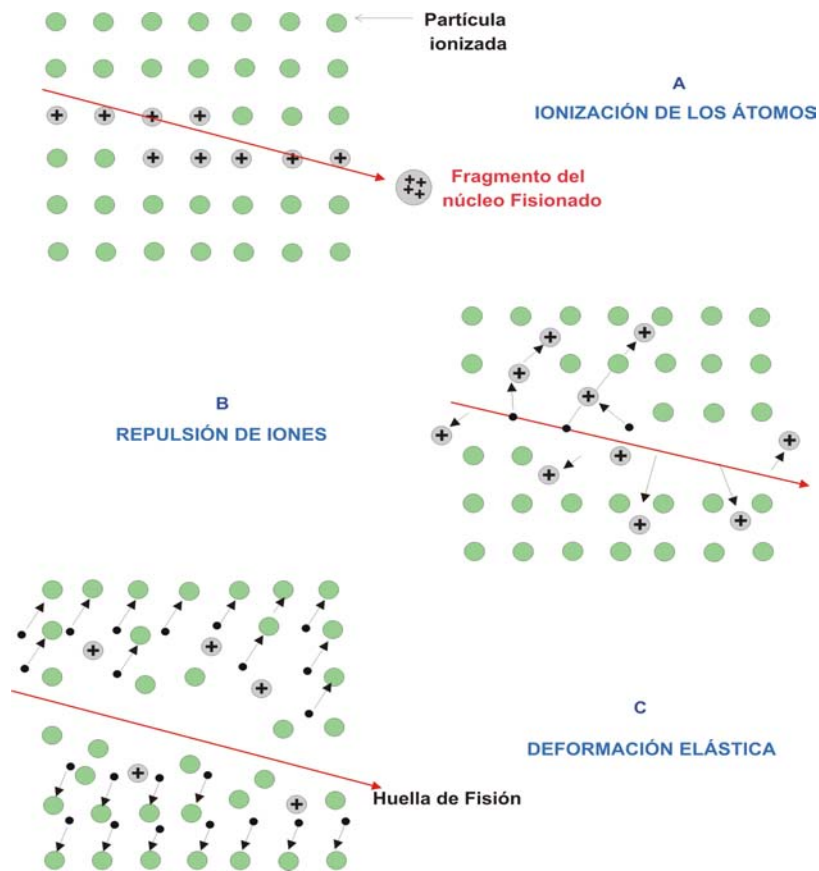


Figura 3.4. Etapas de la formación de una huella de fisión.  
(Tomado y modificado de Wagner, 1992).

c) Langevin y Daraud (1982)<sup>16</sup>, plantean que si existen dos tipos de defecto (defecto extendido y puntos de defecto) en la estructura de la huella, entonces dos procesos distintos de ionización están involucrados en la formación de la huella, o debe ocurrir algún cambio en la energía que ocasiona que los defectos extendidos no puedan formarse.

d) En el año 1984, Tombrello<sup>17</sup> postula que en los sitios aislados a lo largo de las trayectorias de ionización de las partículas ocurre que los electrones se enlazan

fuertemente. Los átomos que son inestables decaen por procesos Auger, y éstos ocasionan regiones puntuales de alta ionización.

### *Tipos de Huellas*

#### a) Según su formación

Según Wagner (1992), existen dos tipos de huellas clasificadas según la forma en que se haya generado la fisión nuclear. La fisión puede producirse de dos maneras, la que se origina en la naturaleza se denomina fisión espontánea y la que ocurre empleando un reactor nuclear es llamada fisión inducida. La primera es un proceso natural que depende del tiempo que cada isótopo requiera para su decaimiento, el cual puede ser desde unos segundos hasta millones de años, originándose las huellas espontáneas. La segunda forma acelera el proceso de decaimiento de los átomos inestables, es decir, que es una técnica experimental para producir decaimientos rápidamente, formándose las huellas inducidas.

Ambos tipos de huellas se pueden distinguir empleando un microscopio de transmisión de electrones tanto en el detector como en el sólido. Las huellas espontáneas son más pequeñas y generalmente presentan una forma hemiesferoidal, mientras que las huellas inducidas son alargadas y bien definidas. Las huellas espontáneas e inducidas pueden ser apreciadas en la Figura 3.5.

<sup>16,17</sup>Citados en Wagner (1992).



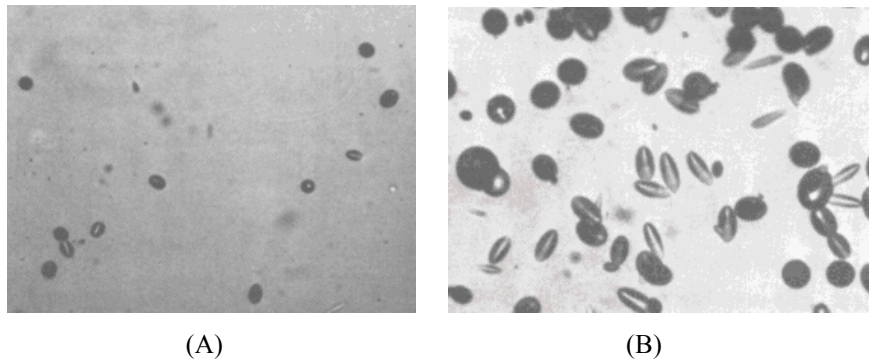


Figura 3.5. Huellas de fisión observadas bajo el microscopio. (A) Huellas espontáneas, (B) Huellas inducidas (Tomada de Bermúdez, et.al, 2003)

Los isótopos  $^{235}_{92}\text{U}$  y  $^{238}_{92}\text{U}$  se encuentran en una relación proporcional constante en la naturaleza (Wagner, 1992). Cuando se aplica un bombardeo de neutrones al sólido que contiene a estos isótopos, el  $^{235}_{92}\text{U}$  por tener mayor probabilidad de ser afectado por el flujo de neutrones, ya que su sección transversal es mayor que el  $^{238}_{92}\text{U}$ , golpea a este último ocasionando su fisión, y por ende se genera una huella. Se debe emplear un bombardeo de neutrones específico para que la fisión del  $^{235}_{92}\text{U}$  sea lo suficientemente significativa. Este proceso se representa en la Figura 3.6.

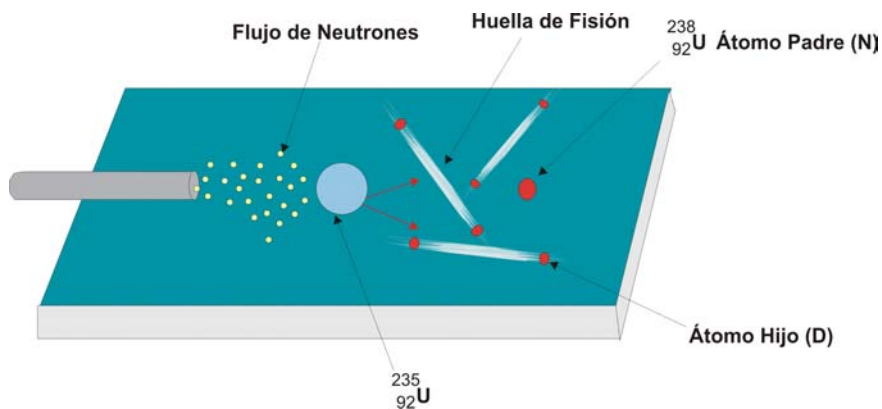


Figura 3.6. Huellas originadas por la fisión inducida del  $^{238}_{92}\text{U}$  en el laboratorio.

b) Según la capacidad de observación

No todas las huellas generadas en el detector pueden ser observadas con el microscopio de transmisión de electrones. La huella latente o “latent track”, no es distinguible con ninguna herramienta y requiere de tratamiento químico para su revelado, es decir, que necesita ser ensanchada para su observación (Wagner, 1992).

c) Según la ubicación espacial de la huella en el detector

Dependiendo de la localización de las huellas dentro del sólido, éstas pueden interceptar a la superficie o estar en el interior del detector, tal como se muestra en la Figura 3.7. El primer grupo es denominado semi-huellas o “semi-tracks” y son las que se utilizan en el Método de Datación por Huellas de Fisión, mientras que el segundo grupo definido como huellas confinadas o “confined tracks”, su longitud de daño no alcanza a la superficie de dicho detector quedando embebidas en su interior (Wagner, 1992).

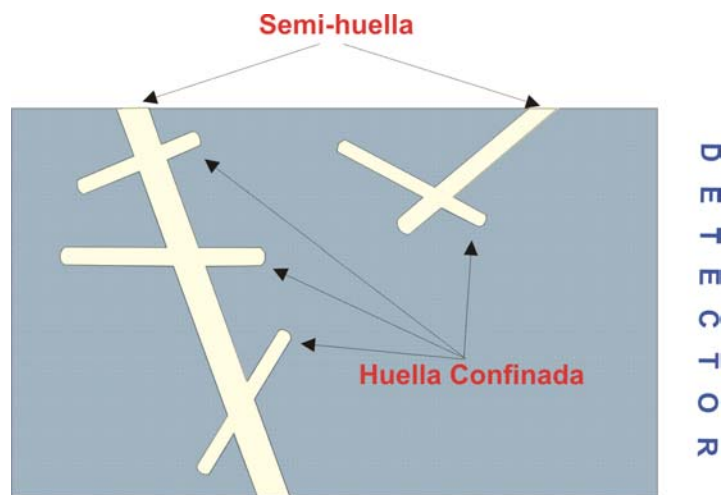


Figura 3.7. Huellas de fisión confinadas y semi-huellas.

(Tomado y modificado de Wagner, 1992).

### 3.4 Densidad Volumétrica y Superficial de las Huellas

Según Wagner (1992), las huellas de fisión generadas en el sólido presentan tres dimensiones. La cantidad de huellas por unidad de volumen en dicho sólido, se denomina *densidad espacial*. Cuando las huellas van a cuantificarse para ser utilizadas en el método de datación es necesario llevarlas de tres dimensiones a dos, mediante un procedimiento de laboratorio que permite disminuir el espesor del sólido conocido como la técnica de pulido (ver Capítulo IV). El número de huellas observadas en dos dimensiones por unidad de área recibe el nombre de *densidad areal* o *superficial*.

Existe una relación teórica entre ambos tipos de densidad, que permite contar las huellas en dos dimensiones, la cual se basa en las siguientes suposiciones:

- a) Los átomos fisionados presentan una distribución homogénea en todo el volumen del sólido.
- b) Todas las huellas en el sólido tienen igual longitud  $l$  y la ubicación de cada átomo fisionado está en el centro de cada huella. La longitud  $l$  es igual a dos veces el rango de daño ( $l=2R$ ). Realmente, las huellas no presentan igual longitud, pero su variación es pequeña para un tipo de detector y de elemento fisionado.
- c) La huella no presenta una dirección preferencial, es decir, que puede formarse en cualquier dirección.

Las tres suposiciones anteriores permiten concluir que el modelo básico es una esfera, la cual puede ser apreciada en la Figura 3.8.

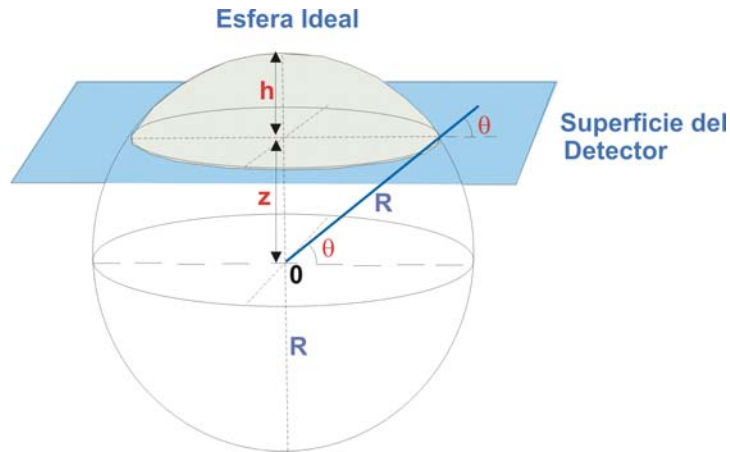


Figura 3.8. Modelo esférico para construir la relación entre la densidad espacial y la areal.  
(Tomado y modificado de Wagner, 1992).

$N_f$  = Número de núcleos fisionados por unidad de volumen.

$z$  = Distancia del centro de la esfera donde se localiza la capa que contiene a la huella, hasta el detector (medida vertical).

$R$  = Rango de la huella, que es igual al radio de la esfera.

$\theta$  = Ángulo entre la superficie del detector externo y la recta generada por la huella.

$$\theta = \arcsen\left(\frac{z}{R}\right) \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Considerando que:

$$z = \text{sen}(\theta)R \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

$$h = R - R\text{sen}(\theta) \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

La probabilidad  $P(z)$  que tiene una huella en formar un ángulo mayor o igual a  $\theta$ , está dada por el cociente de las áreas del casquete o zona gris y el área de la semiesfera de radio  $R$ . Así  $P(z)$  está dada por:

$$P(z) = \frac{2\pi R h}{2\pi R^2} = \frac{h}{R} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

sustituyendo (3.4) en (3.5), se obtiene:

$$P(z) = 1 - \text{sen } \theta \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

La densidad de las huellas latentes  $\rho_l$  es la suma en toda la semiesfera del producto de la probabilidad  $P(z)$  por el número de huellas, es decir, matemáticamente la densidad de huellas latentes viene dada por:

$$\rho_l = \int_0^R P(z)N_f dz \quad \Rightarrow \quad \rho_l = \int_0^R (1 - \text{sen } \theta)N_f dz \quad \Rightarrow \quad \rho_l = \int_0^R N_f \left(1 - \frac{z}{R}\right) dz$$

Resolviendo la integral:

$$\rho_l = N_f \int_0^R \left(1 - \frac{z}{R}\right) dz \quad \Rightarrow \quad \rho_l = N_f \int_0^R dz - N_f \int_0^R \frac{z}{R} dz \quad \Rightarrow \quad \rho_l = \left[ zN_f \right]_0^R - \left[ \frac{N_f R^2}{2R} \right]_0^R$$

$$\rho_l = \frac{RN_f}{2} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

En caso de que la superficie investigada sea interna situada dentro del volumen del detector, las huellas pueden originarse a ambos lados de dicha superficie, y la densidad viene dada por:

$$\rho_l = N_f R \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Ambas ecuaciones se pueden obtener da la siguiente expresión general:

$$\rho_l = gN_f R \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

El factor  $g$  puede tener un valor de 0,5 denominado geometría  $2\pi$ , o 1 llamado geometría  $4\pi$ . Cuando una sola mica se coloca sobre el mineral se emplea el factor de geometría  $2\pi$ , en cambio si son dos micas, una por encima y otra por debajo de dicho mineral, se utiliza la geometría  $4\pi$ .

### *Observación y Revelado de Huellas*

Según Wagner (1992), la observación de las huellas se realiza con un microscopio electrónico debido a la pequeña longitud que éstas presentan. El microscopio debe estar dotado con luz reflejada y transmitida, y además de poseer una platina motorizada con controles coaxiales manuales de los ejes  $x$ ,  $y$ , el microscopio debe contener objetivos de alta resolución (ver Capítulo IV).

Para la identificación de las huellas de fisión en el detector, existe un criterio desarrollado por Fleischer y otros investigadores (Fleischer y Price, 1964d; Fleischer et al., 1975), citado en Wagner (1992).

Las huellas presentan las siguientes características de forma general:

- Presentan una longitud de daño no mayor a  $20 \mu$ .
- Tienen forma recta.
- No exhiben una orientación preferencial.
- Desaparecen al ser sometidas a una temperatura mayor a la de la zona de retención de huellas.

Básicamente este criterio se basa en las características de las huellas latentes. Puede ser aplicado a huellas grabadas en minerales (ver sección 3.2, Grabado o Revelado Químico) con la salvedad de que ellas se encuentren libres de residuos de ácido, y las condiciones de revelado sean idénticas tanto en el sólido como en el

detector. Los defectos falsos son reconocidos por su curvatura o por el hecho de que ellos ocurren en grupos paralelos.

Según Wagner (1992), existen varias técnicas de revelación las cuales se pueden dividir en dos grupos, las llamadas técnicas de decoración y las de ataque químico. El primer grupo aplica segregaciones y precipitaciones de metales, entre otras sustancias, a lo largo de la trayectoria de daño para hacerla más visible y ancha, seguidamente se realiza una polimerización para teñir la huella ampliada. La segunda técnica consiste en emplear un reactivo químico durante un tiempo determinado (ver Tabla 3.2), que elimina el material adyacente a la zona de daño dejada inicialmente por la fisión. El efecto del ataque químico será más rápido en las zonas de defecto (defecto extendido y puntos de defecto) de la estructura de la huella, que en el resto de ésta y de las otras zonas del detector en donde no hubo daño por fisión. Análogamente, si el detector presenta fisuras o pequeñas grietas, el reactivo actuará de la misma manera. De los dos tipos de técnicas, solo el revelado químico es útil en huellas de fisión. En el próximo capítulo, se explicará la forma práctica de la aplicación de esta técnica sobre el detector.

*Tabla 3.2. Algunos reactivos químicos y el tiempo de grabado para diferentes minerales (Tomado de Wagner, 1992).*

<b>REVELADO</b>			
<b>Mineral</b>	<b>Reactivo Químico</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo</b>
Apatito	0,5% a 65% HNO <sub>3</sub>	20 – 30	10 - 80 seg
Clorita	48 % HF	23	10 min
		60	35 - 40 min
Biotita	20 % HF	23	1 - 2 min
Muscovita	48 % HF	23	10 - 40 min
Topacio	KOH (aq)	150	100 min

Existen tres fases en el proceso de grabado de las huellas que indican la evolución geométrica de éstas, según el tiempo de exposición del detector en el reactivo químico, tal como se ilustra en la Figura 3.9.

Estas fases son las siguientes:

a) Fase cónica: es la primera fase que el reactivo genera cuando ataca a la huella. La forma geométrica originada es un surco alargado cuya vista de perfil es un cono.

b) Fase de transición: es posterior a la fase cónica. En ella se produce un ensanchamiento de la huella dejando de verse (de perfil) la forma de un cono. El canal o surco se observa redondeado sin llegar a ser esférico.

c) Fase esférica: es la última fase. En ella la huella se ha ampliado, perdiendo su forma aguda para redondearse totalmente, facilitando la observación en el microscopio para su identificación y conteo. El tiempo de exposición del detector en el reactivo no debe excederse, ya que ocasionaría la destrucción completa de la huella.

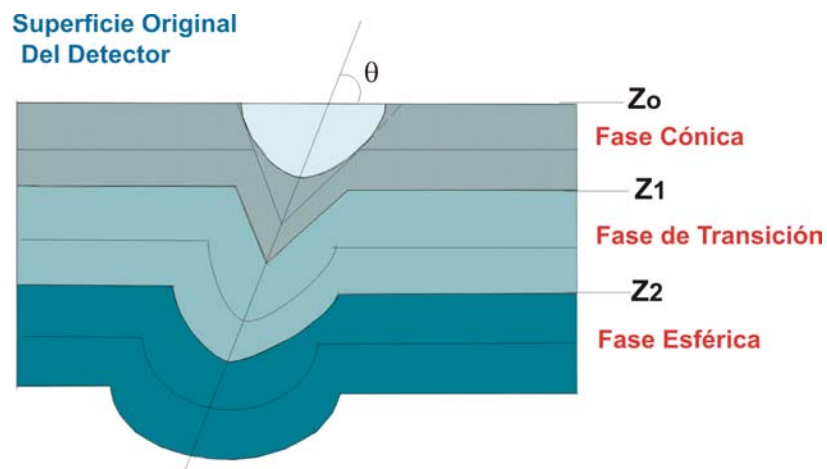


Figura 3.9. Evolución del revelado de la huella.

(Tomado y modificado de Wagner, 1992).



### 3.5 Métodos de Conteo para Determinar las Densidades

Las densidades de las huellas espontáneas e inducidas  $\rho_s$  y  $\rho_i$  se obtienen utilizando las siguientes expresiones:

$$\rho_{sj} = \frac{N_{sj}}{A_{sj}} \quad \text{(Ecuación 3.12)}$$
$$\rho_{ij} = \frac{N_{ij}}{A_{ij}}$$

donde  $N_{sj}$  y  $N_{ij}$  denotan la cantidad de huellas espontáneas e inducidas contadas en el j-ésimo cristal del mineral accesorio (apatito o circón) y  $A_{sj}, A_{ij}$  denotan el área del j-ésimo cristal donde se realizó el conteo de las huellas. Para realizar tal conteo existen dos grandes métodos en la literatura (Bermúdez et.al 2003).

#### *Método de Poblaciones*

Comúnmente utilizado para datar material rocoso usando el mineral accesorio apatito, este método consiste en dividir un gran número de granos de este mineral en dos porciones. La primera, la cual será revelada químicamente con la finalidad de determinar la densidad de las huellas espontáneas  $\rho_s$ , la segunda porción es enviada al reactor para ser irradiada y así poder estimar  $\rho_i$ . Para ésto existen dos alternativas:

a) De la segunda porción que ha sido irradiada se obtiene una densidad total  $\rho_t = \rho_i + \rho_s$ , así:  $\rho_i = \rho_t - \rho_s$ . Esta es llamada *Método con Sustracción*.

b) Mediante técnicas experimentales, las huellas de fisión son desvanecidas antes de la irradiación y así  $\rho_s = 0$ . Después de la irradiación todas las huellas observadas en los separados son inducidas, esta alternativa es llamada *Método Sin Sustracción*.

Según Wagner (1992) el Método de Poblaciones proporciona resultados muy precisos siempre y cuando la distribución del  $^{238}\text{U}$  sea uniforme o el mineral tenga una única historia térmica. Con la finalidad de eliminar pequeñas heterogeneidades en el contenido del  $^{238}\text{U}$  y algunos efectos de la orientación del cristal se seleccionan aquellos granos cuyo eje es paralelo al eje C.

### *Métodos Grano a Grano*

Consisten en el análisis de las huellas espontáneas e inducidas dentro del mismo grano del mineral, de esta manera, puede obtenerse el valor del cociente  $\frac{\rho_s}{\rho_i}$  para cada grano y por lo tanto puede determinarse la edad individual por el MHF utilizando la ecuación (3.10). Estos métodos pueden ser utilizados cuando existen grandes heterogeneidades en la distribución del  $^{238}_{92}\text{U}$  o la muestra esté compuesta por granos de diferentes edades de huellas de fisión, ésto último sucede en rocas detríticas, es decir, aquellas que se encuentran en las cuencas sedimentarias geológicas. Dentro de estos métodos existen tres técnicas, éstas son:

#### Técnica de Regrado

En ésta las huellas de fisión inducidas se obtienen mediante un segundo revelado después de la irradiación de la muestra que contiene las huellas espontáneas, la forma de distinguir ambos tipos de huellas está basado en el tamaño de ellas, sin embargo, cuando no hay una distinción clara, es necesario aplicar el método con sustracción. Aunque las huellas espontáneas e inducidas son reveladas en el mismo material.

### Técnica de Repulido

Inicialmente se cuentan las huellas espontáneas, posteriormente la muestra es pulida por medio de lijadoras o pulidoras especiales hasta desvanecer las huellas espontáneas, luego es irradiada y revelada nuevamente obteniéndose de esta manera  $\rho_i$ . Como este ensayo es muy destructivo no permite revisar el valor inicial de  $\rho_s$  razón por la cual no es muy utilizado.

### Técnica del Detector Externo (TDE)

Consiste en tomar un separado de minerales accesorios (apatitos, circones, esfenas, etc.) cementarlos sobre un portaobjetos usando para ello una resina y un endurecedor, y pulirlos con la finalidad de exponer su superficie interna para luego revelar las huellas espontáneas  $\rho_s$ . Luego este montaje es cubierto con una película de mica de muy bajo contenido de uranio con la finalidad de ser irradiado y así estimar  $\rho_i$ . Separando esta mica del primer montaje y revelándola se obtienen las huellas inducidas. Luego con mucho cuidado y precisión pueden ubicarse sobre los granos las huellas espontáneas y las huellas inducidas justo en las mismas coordenadas sobre la mica, de esta manera como las huellas espontáneas e inducidas son contadas exactamente sobre la misma área que se tiene, y usando las expresiones (3.12) se obtiene que:

$$\frac{\rho_{sj}}{\rho_{ij}} = \frac{N_{sj}}{N_{ij}}$$

Para el conteo de las huellas espontáneas e inducidas  $N_{sj}$  y  $N_{ij}$  del j-ésimo cristal se utiliza una malla  $10 \times 10$ , cuya empleo se explicará en el próximo capítulo. Esta última técnica combina las ventajas del análisis grano a grano con el hecho de que las huellas espontáneas e inducidas son reveladas y contadas en montajes

separados, lo que permite revisar rápidamente los valores de  $\rho_s$  y  $\rho_i$ , además de discriminar entre fuertes heterogeneidades en las distribuciones de las huellas, las cuales pueden ser imputadas a errores experimentales o a posibles eventos tectotérmicos.

### 3.6 Ecuación Práctica del Método de Huellas de Fisión

Después de extraer los minerales accesorios de las muestras obtenidas en campo, es posible obtener de ellos una gran cantidad de información que es necesaria en la ecuación práctica del método de huellas de fisión. La adaptación en detalle de la ecuación fundamental de edad estudiada en el capítulo II a la ecuación práctica para el MHF puede ser estudiada en Bermúdez et. al (2003). Esta última viene dada por la siguiente expresión:

$$t_d = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[ \lambda_\alpha \left( \frac{N_s}{N_i} \right)_d GZ\rho_m + 1 \right] \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

donde:

$t_d$  Edad desconocida de la muestra recolectada por el MHF.

$\lambda_\alpha$  Decaimiento por emisión de partículas alfa,  $\lambda_\alpha = 1,55125 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ .

$N_s$  Número de huellas espontáneas.

$N_i$  Número de huellas inducidas.

$\rho_m$  Densidad de la mica o monitor.

$G$  Factor de geometría.

$Z$  Factor  $Z$  de Hurford (1983)<sup>18</sup> o Método de Aproximación  $\xi$ . Las variables que se utilizan para hallar el factor  $Z$ , se determinan en el laboratorio de irradiación nuclear. Este factor se obtiene de muestras de edad conocida ( $t_c$ ) y se sustituye en la muestra de edad desconocida. La fórmula para hallar dicho factor es:

$$Z = \frac{QI\theta\phi B}{\lambda_\alpha} = \frac{\exp(\lambda_\alpha t_c) - 1}{\lambda_\alpha \left( \frac{N_s}{N_i} \right)_c G \rho_m} \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

$Q$  Factor de procedimiento.

$I$  Proporción de  $\frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}}$  la cual es constante en la naturaleza.

$\theta$  Sección transversal del uranio.

$\phi$  Afluencia de neutrones en el reactor.

$B$  Constante de proporcionalidad entre el monitor de densidad de uranio conocida y la afluencia  $\phi$ .

### 3.7 Efecto de la temperatura sobre las huellas y el posible significado geológico

La temperatura representa un parámetro muy importante en la generación y borrado de las huellas de fisión. Si un mineral u otro sólido en donde se hayan formado huellas, se somete a una temperatura mayor al límite de la temperatura de cierre, dichas huellas comenzarán a borrarse. Este proceso es conocido como desvanecimiento o “annealing”, en donde disminuye parcialmente la longitud de las

huellas. Según se aumente la temperatura y el tiempo de exposición a ella, la longitud o rango de huella comienza a disminuir hasta que finalmente desaparece del detector. Este fenómeno representa un “reset” del tiempo acumulado en dicho sólido. Si el sólido se enfría, nuevamente comenzará a generar huellas pero la edad que registrará éste será la acumulada a partir del último enfriamiento.

Es importante establecer que para la interpretación de la edad obtenida por el Método de Huellas de Fisión, se debe tomar en cuenta el contexto geológico de la zona en donde se obtuvieron las muestras de roca, es decir, características de sedimentación, tectónica, subsidencia de cuencas, etc., pueden producir un cambio en la ubicación de la temperatura de cierre en el sistema, lo cual se registraría en el sólido. A través de la datación por el Método de Huellas de Fisión pueden obtenerse una o varias edades, representando más de un evento geológico y por ende, se debe integrar este dato a la geología para determinar correctamente la edad. Por ejemplo, puede ocurrir que una cuenca en donde se depositaran los sedimentos que ya habrían comenzado a acumular edad, subsidiera. A consecuencia, según la tasa de subsidencia que se genere, presentará una variación de las isócronas traduciéndose en un incremento de la temperatura, que afectaría a las zonas de desvanecimiento parcial, así como también, a la temperatura de cierre. El resultado es un posible desvanecimiento de las huellas, parcial o total, que generaría un cambio en la edad que los detectores registren, es decir, una variación considerable de la temperatura puede disminuir o aumentar la longitud de huella, inclusive borrarla totalmente. En la Figura 3.10 se representa el contexto geológico en donde se desarrolla el proceso descrito.

<sup>18</sup>Citado en Wagner (1992).

FORMACIÓN DE HUELLAS DE FISIÓN

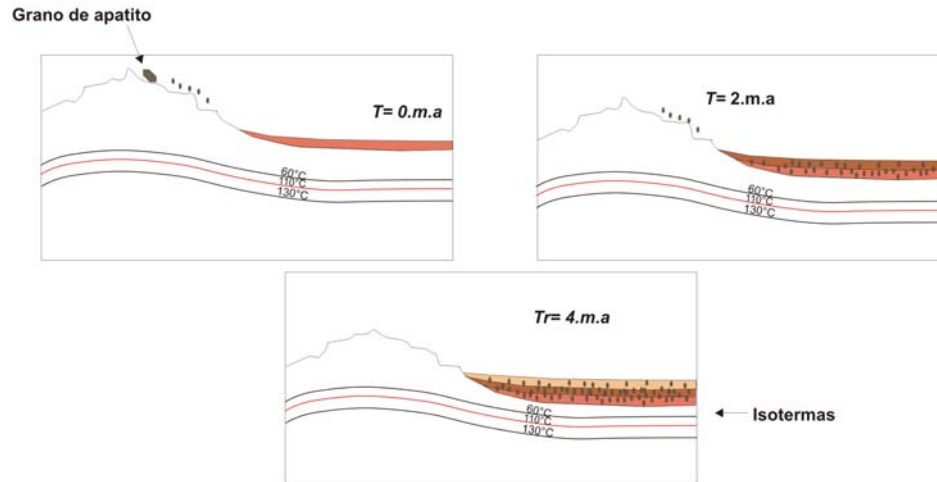


Figura 3.10. Subsidencia de una cuenca.

(Tomado y modificado de Mora, 1995).

En contraste, si se produce levantamiento de la zona, la isoterma crítica se traslada a otro nivel en donde los minerales accesorios comenzarán a registrar huellas de fisión al pasar por ésta (temperatura de cierre), a medida que se acercan a la superficie, éstos son expuestos por procesos erosivos, y así la recolección de ellos en campo permitirían obtener la edad del último evento tectotérmico. Tal como se aprecia en la Figura 3.11.

FORMACIÓN DE HUELLAS DE FISIÓN

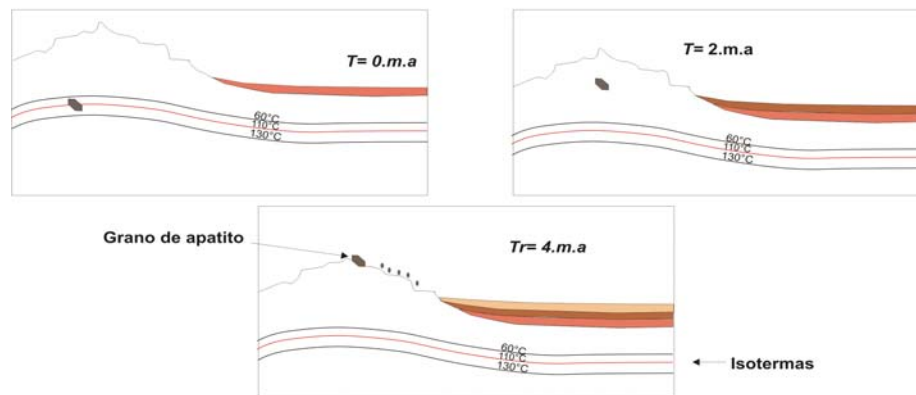


Figura 3.11. Levantamiento tectónico de una cuenca.

(Tomado y modificado de Mora, 1995).

# **CAPÍTULO IV**

## **RECOLECCIÓN DE MUESTRAS, PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS**

### **4.1. Introducción**

En este capítulo se describirán los criterios utilizados para la recolección de las muestras así como los procedimientos de laboratorio necesarios para su procesamiento con la finalidad de fecharlas por el Método de Huellas de Fisión. Además de esto, se utilizarán una serie de herramientas estadísticas necesarias para calcular la edad de un solo evento geológico según el método de datación antes mencionado.

### **4.2. Criterios utilizados para la recolección de muestras en campo**

Los criterios para recolección de muestras son:

- Constatar que en el área seleccionada no hayan ocurrido incendios de gran magnitud, ya que dañaría las huellas formadas en la estructura del mineral.
- Verificar la existencia de afloramientos aprovechables para la extracción de las muestras.
- El tamaño de grano de la muestra a tomar debe estar comprendido entre 0,5 a 0,25 mm (tamaño arena), debido a que los granos de apatito se encuentran entre dichos parámetros.
- Ubicar en el afloramiento una capa gruesa de arenisca de donde se extraerá la muestra.



- Excavar en dicha capa lo suficiente hasta que la muestra se encuentre fresca, aprox. 50 cm. de profundidad.
- El espaciamiento de extracción entre una muestra y otra es de 125 Mts aproximadamente en espesor verdadero.
- Debido a que se trabaja con arenisca donde el porcentaje de apatito es bajo, se recomienda tomar aprox. 50 Kgs de roca para asegurar la obtención de una cantidad suficiente del mineral.
- Las muestras recolectadas se colocan en bolsas cuidadosamente etiquetadas y almacenadas en un lugar seguro.

### 4.3 Guía de procedimientos de laboratorio

Los equipos y materiales utilizados se resumen en la siguiente tabla 4.1

*Tabla 4.1 Equipos y materiales fase 1.*

EQUIPOS	MATERIALES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trituradoras de mandíbula.</li> <li>• Trituradora de rodillo o pulverizador, marca Denver-McCool, motor 5 Hp.</li> <li>• Mesa de secado con bombillos de 150 vatios, dispuestos a 50cms del sedimento, manufactura propia.</li> <li>• Tamizadora marca Vorti-Siv, modelo H-59915-80.</li> <li>• Tolvas o Alimentadoras Volumétricas, modelos RS-TO-3/4, Marca Carpco, F-TOC Y CFMC-TOC, marca Syntron.</li> <li>• Mesa de sacudidas (Wilfley), modelo 5614</li> <li>• Separador magnético Frantz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamices de mallas # 200 y malla # 60.</li> <li>• Cepillos de limpieza</li> <li>• Máscaras antipolvo</li> </ul>

*Trituradoras.*

Trituradora de mandíbula

El triturador de mandíbula toma los pedazos pequeños y los rompe en pedazos aun más pequeños a través de la acción de movimiento de dos platos de acero, esto puede ser apreciado en la Figura 4.1. El tamaño de los pedazos aplastados depende del tamaño de la apertura de la mandíbula. Una cuña detrás de uno de los platos permite reducir el tamaño de la apertura, por ende el tamaño del fragmento partido. Es necesario tomar las medidas de seguridad pertinentes debido a que algunos fragmentos de rocas son bastantes quebradizos y angulosos los cuales podrían causar daño a la piel.



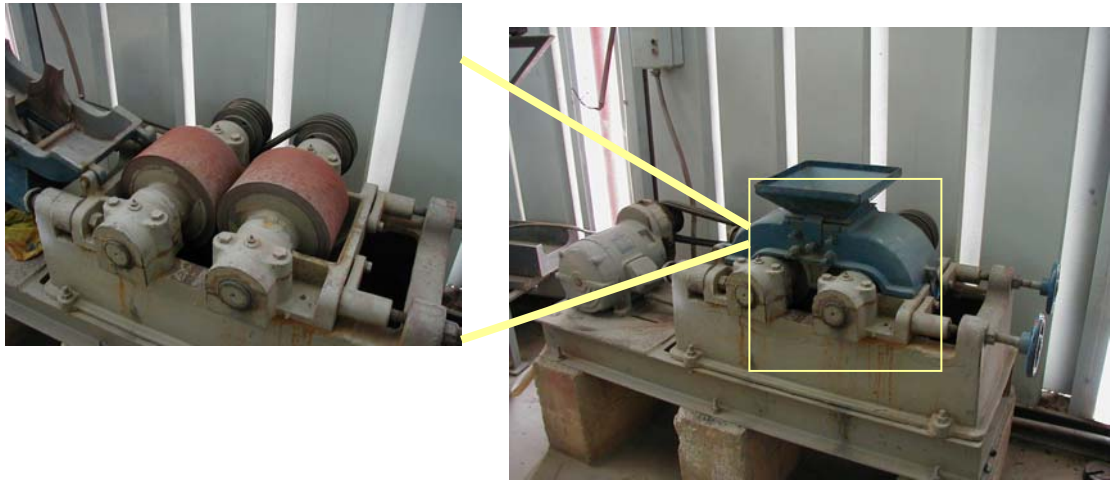
*Figura 4.1. Trituradora de mandíbula.*

Instrucciones:

- 1) Limpie completamente la máquina usando aire presurizado y un cepillo.
- 2) Coloque una cacerola debajo del equipo para recoger la muestra triturada y luego introduzca poco a poco la roca por la boca de ésta, siempre asegúrese de que sea una cantidad pequeña.
- 3) Deje caer, despacio, los pedazos pequeños en la mandíbula. Si éstos son demasiado grandes la trituradora se trancará y en consecuencia se detendrá. Si esto sucede, apague la maquina y quite el trozo que obstruye la mandíbula.
- 4) Periódicamente detenga la máquina y engrase. El equipo de grasa debe estar colgando sobre la máquina.
- 5) Una vez procesada la muestra entera, limpie el equipo y el área de trabajo.
- 6) Las muestras ya trituradas deben ser guardadas en bolsas Ziploc® de cuarto de galón, previamente etiquetadas.

#### Pulverizador o triturador de rodillo.

Luego que la muestra se ha triturado, el pulverizado la reduce a un tamaño de grano más fino. Es sumamente importante tomar la precaución de utilizar una máscara, debido a que en este proceso se desprende gran cantidad de polvo de sílice que podría causar graves daños a la salud, ver Figura 4.2.



*Figura 4.2. Trituradora de Rodillo.*

Instrucciones:

- 1) Limpie Completamente todas las partes de la máquina. Remueva la bandeja de la muestra y asegúrese que no quede ningún resto de muestras anteriores.
- 2) Cierre la tapa de protección del equipo.
- 3) Alimente lentamente el pulverizador con la muestra, puesto que, si la alimentación es más rápida a la velocidad de trituración el equipo se puede bloquear.
- 4) Asegúrese de retirar la muestra pulverizada periódicamente, para que el depósito no se rebose.
- 5) Recoja la muestra en las mismas bolsas que se usaron en el triturador de mandíbula.
- 6) Al finalizar limpie el equipo con un paño húmedo antes de procesar la próxima muestra.

### *Tamizadora*

Este equipo está diseñado para la separación y agrupación de rocas pulverizadas según su tamaño de grano, ver Figura 4.3, para el caso particular y según el método de datación por huellas de fisión se encuentra en el rango comprendido entre 0.25 mm (tamiz # 60) y 0.074 mm (tamiz # 200).

El procedimiento utilizado consiste en agregar la muestra a la tamizadora utilizando una tolva de 15 Kgrs., para luego recoger el sedimento en las salidas del equipo por medio de bolsas rotuladas según sea la fracción que se está recolectando.



*Figura 4.3. Tamizadora.*

#### Instrucciones:

- 1) Limpie cuidadosamente los tamices con aire presurizado y un cepillo de cerdas metálicas finas.

- 2) Limpie la parte interior de la tamizadora y las salidas de rocas pulverizadas para evitar cualquier contaminación de la muestra.
- 3) Coloque las rocas trituradas en la tolva ubicada en la parte superior de la tamizadora.
- 4) Coloque las bolsas rotuladas según la fracción a recoger en las salidas de la tamizadora
- 5) Encienda la tamizadora y posteriormente la tolva.

### *Mesa de Wilfley*

Es un equipo diseñado para la separación de minerales según su densidad. La mesa consiste en un tablero inclinado de movimiento continuo el cual está provisto de una serie de listones paralelos entre sí y a la dirección de la sacudida, los cuales permiten la distribución adecuada de la muestra hacia los depósitos ubicados en la parte baja de la mesa, ver Figura 4.4.



*Figura 4.4. Mesa de Wilfley*

Instrucciones:

- 1) Limpie el equipo antes de correr la muestra para evitar que la misma se contamine.
- 2) Coloque la muestra en la tolva ubicada en la parte superior de la mesa de Wilfley para realizar un aporte adecuado de la muestra.
- 3) Encienda la mesa de sacudidas Wilfley y comience con el aporte tanto de la muestra como del caudal de agua.
- 4) Al finalizar la corrida recoja la muestra recuperada en los envases y distribúyala en la mesa de secado.

#### *Mesa de Secado*

El equipo está constituido por una plancha de acero y sobre ella una serie de bombillos de 80 voltios, colocados a una distancia aproximada de 50 cms de la muestra. La finalidad de este equipo es suministrar calor artificial para acelerar el proceso de secado de la muestra, sin afectar las posibles huellas espontáneas presentes en los minerales accesorios, ver Figura 4.5.



*Figura 4.5. Mesa de secado*

### *Separación de minerales pesados mediante Bromoformo.*

Es necesario concentrar la muestra con la finalidad de poseer una mayor cantidad de minerales pesados, por tal razón se emplea el Bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ ), para obtener una fracción mayor o igual a  $2.96 \text{ grs/cm}^3$ . También se puede emplear tetrabromuro (Tetrabromoetano; acetil tetrabromuro; TBE tetrabromoacetileno o líquido de Muthmann's)

#### Instrucciones:

- 1) Limpie todos los equipos e instrumentos antes de comenzar el procedimiento de separación de minerales por densidad.
- 2) Coloque el Bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ ) en un balón de 1000 ml hasta el área de mayor curvatura, posteriormente agregue y revuelva la muestra con una varilla de vidrio en el balón.
- 3) Deje reposar la muestra y cuando ya no hayan partículas en suspensión, se habrá efectuado la separación de la muestra según su densidad.
- 4) Coloque un vaso 50 ml y un papel filtro dentro de él, debajo del balón para recolectar la muestra ya separada.
- 5) Cambie el papel de filtro donde se encuentra la fracción pesada y coloque otro limpio, donde se filtrará la fracción más liviana.
- 6) Por último lave con acetona o metanol las fracciones recuperadas bajo la campana, identifíquelas y almacénelas en lugares adecuados.



### *Separador magnético Frantz*

El separador magnético Frantz puede usarse para separar minerales magnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos de los no magnéticos dependiendo de su grado de susceptibilidad magnética.

Luego de secar la muestra, ésta se coloca en el depósito del separador magnético para comenzar la corrida. Al finalizar el proceso el equipo almacena en dos recipientes la muestra, en uno la fracción magnética y en el otro la no-magnética, dependiendo de la configuración de los parámetros del equipo (vibración, amperaje, pendiente lateral e inclinación posterior) ver Figura 4.6.



*Figura 4.6. Separador magnético Frantz*

#### Instrucciones:

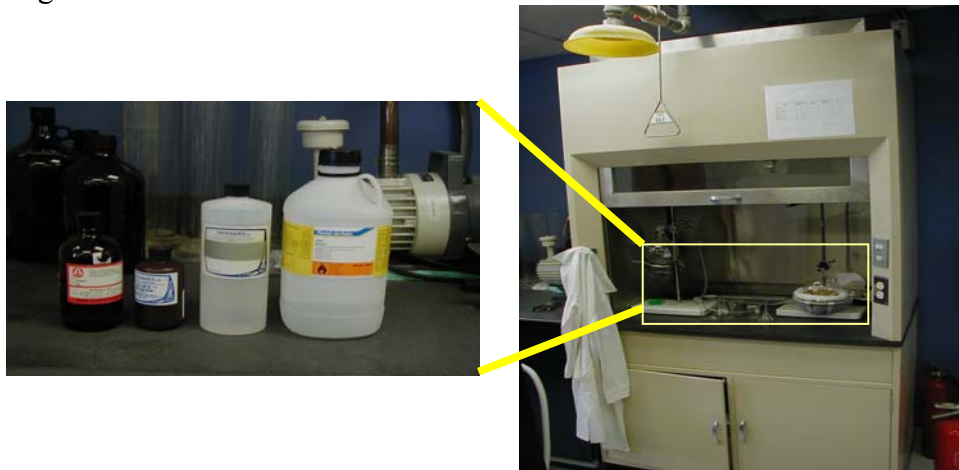
Los parámetros sugeridos según Hess (1959) para la selección de apatitos es:  
Inclinación posterior = 20°; pendiente lateral = 5° en contra del usuario.

- 1) Cumpla las normas de seguridad y limpie el equipo completamente antes de iniciar la corrida, para evitar que no se contamine la muestra.

- 2) Seleccione los parámetros indicados para la separación de los minerales, según Hess (1959) manual para la separación por susceptibilidad magnética.
- 3) Prenda el equipo y comience con la corrida.
- 4) Tenga cuidado de no alimentar mucho el equipo se corre el riesgo de rebosar y perder la muestra.

*Refinamiento de fracción pesada por combinación de líquidos pesados*

Cómo la densidad del apatito es de aproximadamente  $3.22 \text{ gr/cm}^3$ , es necesario hacer una preparación de líquidos pesados que estén cercanos a esta densidad. Combinando DiIodometano ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ ) cuya densidad es de  $3.30\text{-}3.33 \text{ gr/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$  con Benzil-benzoato ( $\text{C}_{14}\text{H}_{12}\text{O}_2$ ) cuya densidad es de  $1.120$  a  $25^\circ\text{C}$  se obtiene una densidad cercana a la del apatito, la proporción de ésta combinación depende del volumen de líquido a preparar y se obtiene de unas tablas disponibles en el Laboratorio de Termocronología, para garantizar que la solución obtenida está en un rango entre  $3.22$  y  $3.23 \text{ gr/cm}^3$  se emplean unas cápsulas de densidad especiales, ver Figura 4.7.



*Figura 4.7. Líquidos pesados utilizados para la separación y campanas de extracción*

Instrucciones:

- 1) Cumpla con las normas de seguridad y limpie las campanas antes de iniciar la separación.
- 2) Coloque todos los embudos de separación de 50 ml. en un soporte y asegúrese de que las llaves estén cerradas.
- 3) Asegúrese de la cantidad de solución a preparar y revise las tablas indicadoras de proporción.
- 4) Coloque el líquido más pesado en un vaso precipitado de 80 ml., Introduzca las dos cápsulas de densidad (3.22 y 3.23 grs/cm<sup>3</sup>).
- 5) Agregue la cantidad que indiquen las tablas del líquido más liviano (Benzil-benzoato).
- 6) Si la cápsula más liviana aún no se encuentra flotando debe agregar unas gotas más de benzil-benzoato, hasta que las dos cápsulas se encuentren separadas verticalmente una de otra (una en el fondo y otra en la superficie).
- 7) Retire las cápsulas con cuidado usando pinzas.
- 8) Agregue los líquidos en los embudos y la muestra.
- 9) Repita el mismo procedimiento para el caso del bromoformo.

### *Selección de Apatitos, Montaje y Pulido*

En esta etapa, se seleccionan los granos de apatitos, de las muestras y se prepara la sección fina definitiva. Los materiales utilizados se resumen en la Tabla 4.2.

*Tabla 4.2. Equipos y Materiales fase 2.*

<b>EQUIPOS</b>	<b>MATERIALES</b>
Horno isotérmico. Plancha térmica. Termómetro digital. Pulidora Buehler de frecuencia constante.	Lupa de 8X, 10X, 30X y 50X con luz reflejada. Pincel de una cerda. Micropipetas plásticas desechables marca wilpedorf. Endurecedor Epoxide y Resina Epoxicure marca BUEHLER. Portaobjetos de acetato. Arandelas PVC y base para las arandelas en baquelita. Vaselina o aceite natural. Silicona y pistola para silicona. Pastas de diamante de 9 y 1 micrones ( $\mu$ ). Alúmina micropolish de 0.3 micrones ( $\mu$ ). Lijas grano 1200 y 600. Paños Textmet P 8” para pulido

### Selección de los apatitos

En este paso se seleccionan los granos de apatito con ayuda del pincel el cual se utiliza para empujar el apatito hasta un recipiente donde se almacenarán. Luego se coloca la fracción seleccionada en un frasco rotulado color ámbar con tapa hasta el próximo paso, el cual puede ser observado en la Figura 4.8.



*Figura 4.8. Envases utilizados para almacenar los “apatitos” seleccionados*

En la Tabla 4.3. se presentan todas la propiedades y características físicas para facilitar el reconocimiento del mineral.

*Tabla 4.3. Características y propiedades físicas del Apatito*

Color	A base de tonalidades verdosas o pardas, también azul, violeta o pardas. De transparente a traslúcido. En nuestro caso en particular es de coloro pardo claro.
Raya	Blanca.
Brillo	Vítreo.
Dureza	Cinco (5).
Densidad	3.2 g/cm <sup>3</sup>
Óptica	Índices de refracción bajos, uniaxial negativo, baja birrefringencia.

Los cristales de apatito observados se presentan de hábito marcadamente prismáticos, cortos o tabulares, terminados a veces en pirámides, de color pardo claro, según se puede apreciar en la Figura 4.9.



*Figura 4.9. Características físicas del apatito*

#### Montado del apatito y preparación de la sección fina (pastilla)

En esta etapa se elaboró una arandela en PVC y un soporte de baquelita para ésta. En la arandela se realiza el montaje de la muestra según la técnica del detector externo y las especificaciones del reactor, tal como se ilustra en la Figura 4.10.

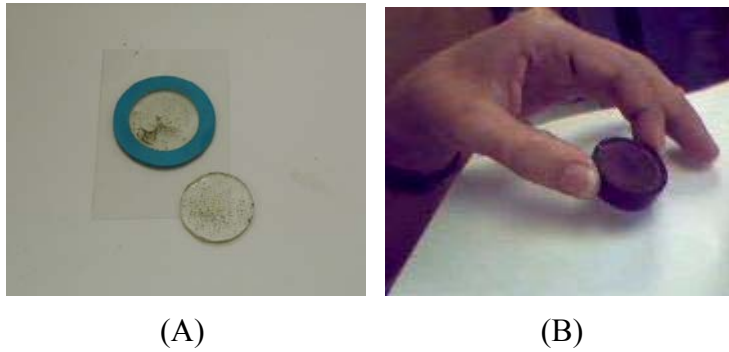


Figura 4.10. Montaje de la muestra. (A) Sección fina, (B) Soporte de baquelita

Instrucciones:

- 1) Se precalienta la plancha térmica a una temperatura de 30° grados centígrados y sobre ella preparamos el epoxy.
- 2) Coloque una superficie lisa, vidrio o acetato, bajo el aro prediseñado para preparar la muestra en forma de pastilla.
- 3) Distribuya la muestra en una pequeña cantidad de epoxy sobre la superficie para adherir los granos de apatito y el aro.
- 4) Coloque el aro y rocíe los granos, aproximadamente unos 25 granos por sección.
- 5) Después de unos minutos coloque el preparado sobre la plancha térmica y rellene el aro con el epoxy.
- 6) Por último coloque el preparado en el horno isotérmico a una temperatura de 30°C por una semana para garantizar el secado de la muestra.

Los materiales utilizados para la preparación y montaje de la muestra pueden ser apreciados en la Figura 4.11.



*Figura 4.11. Materiales a usar para la preparación de las secciones finas*

### Pulido

En esta etapa las pastillas obtenidas en el paso anterior son pulidas de manera uniforme con la finalidad de exponer la superficie de la mayor cantidad de granos de apatito, esta etapa debe realizarse con sumo cuidado ya que se corre el riesgo de perder todos los minerales pesados separados hasta el momento. En la Figura 4.12 se puede observar el equipo utilizado en este proceso.



*Figura 4.12. Equipo Buehler utilizado para pulir las muestras*

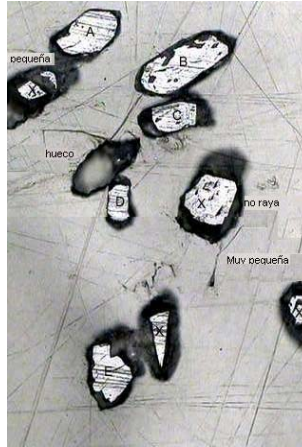
Instrucciones:

- 1) Con una lija de grano 1200 se retira el excedente de resina sobre la arandela.

- 2) Con mucho cuidado y revisando constantemente bajo la lupa comience a debastar con la lija de grano 1200, cuando esté cerca de la muestra, deténgase.
- 3) Tome un paño Texmet limpio y rocíelo con agua destilada, colóquelo sobre la pulidora y aplique una pequeña cantidad de pasta de diamante de 9 micras, si está muy dura es necesario agregar el lubricante especialmente diseñado para ésta.
- 4) No pase mucho tiempo sobre la pulidora y revise la muestra usando un microscopio con luz reflejada a 30X y 50X, en intervalos de treinta (30 seg.) segundos.
- 5) Al llegar a los granos, **con mucho cuidado** siga puliendo hasta exponer la mayor cantidad de superficies.
- 6) Inmediatamente retire la muestra de la pulidora, cambie el paño, y aplique la pasta de 1 micra, con la finalidad de eliminar los surcos dejados en los pasos anteriores.
- 7) Luego retire el paño colocado en el paso (6) y cámbielo por otro paño y aplique la alúmina micropolish de 0.3 micras y pula la sección hasta que los granos se vean como un espejo.
- 8) Limpie la muestra con agua destilada y protéjalos del polvo ya que este podría rayarlas.
- 9) Fije las pastillas a unos vidrios portaobjetos, utilizando la resina epóxica y coloque el número de las muestras con una cuchilla de diamantes en la parte superior derecha del portaobjeto.



En la figura 4.13 se aprecia la disposición de los granos pulidos, notándose que aquellos granos marcados con X el pulido no es efectivo, mientras que en los granos marcados con A, B, C, D y E presentan la mayor superficie pulida del grano.



*Figura 4.13. Apariencia de los granos pulidos usando luz reflejada a 125X  
(Tomada de Garver, 2002)*

*Revelado, montaje del detector externo (mica)*

En esta etapa se graban las huellas de fisión espontáneas y se coloca el detector para su posterior envío al reactor. En la Tabla 4.4 se resumen los equipos y materiales utilizados.

*Tabla 4.4. Equipos y materiales empleados en la etapa de revelado y montaje del detector externo*

EQUIPOS	MATERIALES
Termómetros. Vasos precipitado de 50 y 400 ml. Horno. Microscopio de luz transmitida de 30 y 50X.	Acido Nítrico (HNO <sub>3</sub> ). Agua destilada. Cronómetro. Pinzas.

## Revelado

En esta fase se expondrán las huellas de fisión espontáneas presentes en los granos de apatito.

Instrucciones:

- 1) Prepare una solución de  $\text{HNO}_3$  a 5N, antes de comenzar el grabado o revelado.
- 2) Tome la temperatura ambiental.
- 3) Llene a  $\frac{3}{4}$  un vaso precipitado de 50 ml con la solución preparada en (1). Coloque este vaso dentro de otro que contenga agua, ésto con la finalidad de regular la temperatura del ácido. Mantenga una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  agregando agua fría al vaso precipitado de mayor tamaño.
- 4) Coloque otro vaso precipitado de 400 ml lleno con agua desionizada con el fin de lavar la muestra.
- 5) Use el cronómetro y sumerja la pastilla en el ácido por 20 segundos.
- 6) Extraiga la pastilla con una pinza e inmediatamente sumérgjala en el vaso de precipitado con agua.
- 7) Tenga cuidado de no tocar la superficie de la sección fina después de que haya culminado el revelado.
- 8) Inspeccione bajo el microscopio de luz transmitida si las huellas son visibles o no.
- 9) Deje secar la muestra bajo la campana.

10) Lave la muestra con jabón neutro.

#### Montaje del detector externo (mica)

Una vez que los preparados de apatito ya han sido revelados suficientemente, puede contar las huellas espontáneas en este momento (opcional). Luego monte la mica o detector de bajo contenido de uranio. La mica a utilizar es una mica de moscovita del Brazil o puede ser obtenida en la empresa B&M Mica Co. Inc, USA.

#### Instrucciones:

- 1) No toque la superficie limpia, pulida y revelada de los apatitos
- 2) En una mesa limpia ordene las secciones finas y las micas precortadas.
- 3) Tome una cinta plástica Scotch<sup>®</sup> de doble engomado y fijela a la mesa, conjuntamente tome las micas con una pinza y presiónela sobre la cinta plástica, de manera que quede completamente adherida a la cinta, con un lápiz páselo por detrás de la cinta para exfoliar la mica.
- 4) Continúe este proceso hasta que el folio tenga aproximadamente un espesor uniforme de 0.18 mm utilizando un vernier micrométrico.
- 5) Cuidadosamente lleve la mica adherida a la cinta, colóquela sobre el portaobjeto que contiene los apatitos, y envuélvalo con cinta plástica mediante una sola pasada, corte la cinta utilizando un exacto.
- 6) Con un punzón fino de 1 micra haga dos agujeros uno en la esquina superior izquierda y otro en la esquina inferior derecha de manera de tener un control de la

posición de la mica, al retirarla de la sección fina después de la irradiación; estos agujeros serán de importante ayuda al momento de contar las huellas de fisión ya que permiten una ubicación precisa de los granos y de la platina motorizada del microscopio.

- 7) Todas las muestras ya están listas para ser irradiadas, ahora es necesario empaquetarlas según las diversas especificaciones de los centros de irradiación.
- 8) Comuníquese con el centro de irradiación para conocer las especificaciones y acuerde con los investigadores de ese centro, el programa de irradiación.
- 9) Envíe las muestras al reactor nuclear.

*Preparación de la sección fina para el conteo de las huellas*

Una vez que las muestras hayan sido irradiadas y se tienen de nuevo en el laboratorio, se separa la pastilla y la mica sobre el mismo portaobjeto, a fin de contar las huellas espontáneas e inducidas. En la Tabla 4.5 se resumen los equipos y materiales utilizados.

*Tabla 4.5. Equipos y materiales empleados en sección definitiva según la técnica del detector externo.*

EQUIPOS	MATERIALES
Desionizador de agua Plancha térmica Horno isotérmico Termómetro Medidor digital de pH.	Esmalte de uñas transparentes (brillo). Exacto. Agua desionizada. Hidróxido de sodio (NaOH). Acido Fluorhídrico (HF). Resina o epoxy

### Revelado de la mica después de la irradiación

En esta fase se revelarán las huellas inducidas ( $Ni$ ) necesarias para la datación de las muestras por el método de huellas de fisión.

Instrucciones:

- 1) Después de la irradiación remueva la mica del montaje. La cinta plástica que une el montaje debe ser retirada con un exacto.
- 2) Los bordes de la mica deben insertarse en las ranuras de una manguera tipo tygon, de manera que éstas se mantengan juntos para el revelado.
- 3) Coloque la mica en un vaso precipitado de ácido fluorhídrico (HF) por 18 minutos, asegúrese que el ácido está a una temperatura entre 20 y 23°C.
- 4) Retire la mica y colóquelas en hidróxido de sodio (NaOH) concentrado y agregue el agua desionizada, manténgalas en esta solución de 2 a 5 minutos. Revise el pH del agua usando un medidor de pH digital para asegurarse que el agua no se ha acidificado. Es importante que todo el ácido fluorhídrico (HF) haya sido removido de las muestras, ya que este ácido podría revelar otros elementos microscópicos.
- 5) Limpie cada mica con alcohol (metanol) y seque ésta en posición vertical en el horno isotérmico una temperatura de 30°C.
- 6) Revise la calidad de la huella, sea muy cuidadoso con la calidad del grabado ya que el ácido fluorhídrico (HF) tiende a perder sus propiedades a medida que se efectúa el revelado.
- 7) Limpie todas las micas y la zona de trabajo.

### Arreglo del montaje para el conteo

En esta fase se obtiene la sección fina definitiva para el conteo de las huellas espontáneas ( $N_s$ ) e inducidas ( $N_i$ ) bajo el microscopio, según se muestra en la Figura 4.14.

#### Instrucciones:

- 1) Tome un portaobjetos y coloque sobre éste la pastilla y la mica ya revelada de acuerdo al número de muestra.
- 2) Sobre este portaobjeto y utilizando un marcador con punta de diamante (bisturí) coloque la siguiente información: sobre el borde derecho el número de irradiación y la posición que ocupaba en el contenedor, y en el borde izquierdo el número de la muestra.
- 3) Retire la pastilla y la mica con cuidado de no invertirlas.
- 4) Usando un brillo para uñas pegue tanto la pastilla como la mica en el portaobjeto de los pasos (1) y (2).
- 5) Debe alinear cuidadosamente la mica y la pastilla, usando los agujeros realizados en la etapa del montaje. Recuerde que de esto depende la precisión del microscopio y por ende de la edad obtenida.

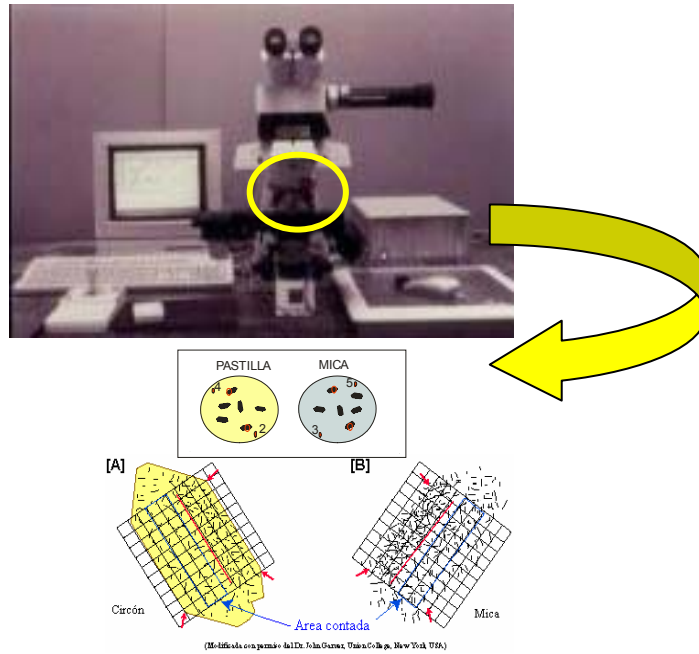


Figura 4.14. Mallas de conteo observadas bajo el sistema automatizado del microscopio

#### 4.4. Cálculo de edades para muestras estándar y factor Z.

Para hallar la edad de las muestras (L-001, L-002, L-003, L-004, y L-005) es necesario calcular el Factor Z, este factor se obtiene de la irradiación de muestras de edad conocida.

Para el momento de finalizar el trabajo Especial de Grado no se disponían de los granos de las muestras seleccionadas ya irradiadas, por lo tanto, se procede a calcular por el método de huellas de fisión la edad del apatito de Durango, cuyo evento geológico se asocia a un enfriamiento del magma expulsado en los volcanes que se encuentran en el cerro Mercado, Durango, México, la edad es conocida por el método de Argón-Argón y es de  $31,4 \pm 0.7$  M.a.

La densidad  $\rho_m$  a utilizar para calcular la edad de este estándar se obtiene irradiando vidrios de densidades de uranio conocidas (ejemplos. CN1, CN5, etc.) y luego se interpolan entre los diversos valores de densidad arrojados.

Para el cálculo de dicha edad se tienen los siguientes datos, disponibles en el laboratorio y presentados en la tabla 4.6.

*Tabla 4.6. Datos del reactor para el apatito de Durango*

<b>NS</b>	<b>NI</b>	<b>Cuadrícula</b>	$\rho_m$	<b>Tiempo individual</b>
13	65	25	3,97E+06	37,24987034
10	56	25	3,97E+06	33,26909271
10	57	25	3,97E+06	32,68690166
7	51	25	3,97E+06	25,58679109
15	75	25	3,97E+06	37,24987034
9	55	25	3,97E+06	30,49315692
9	60	25	3,97E+06	27,95756245
10	51	25	3,97E+06	36,52154576
10	54	25	3,97E+06	34,49799007
9	54	25	3,97E+06	31,05648694
6	59	25	3,97E+06	18,96750891
5	26	12	3,97E+06	35,82115606
14	78	25	3,97E+06	33,4392617
4	34	25	3,97E+06	21,93774717
11	74	25	3,97E+06	27,706233
14	79	25	3,97E+06	33,01706203
4	28	15	3,97E+06	26,62899579
13	65	25	3,97E+06	37,24987034
12	67	25	3,97E+06	33,36814685
8	57	25	3,97E+06	26,16276714

Sobre estos datos se calculó los estimados de edad para el estándar Apatito de Durango, por los siguientes métodos:

a) Edad Pooled: se calcula mediante la siguiente expresión:



$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln[\lambda_\alpha R_p GZ\rho_m + 1]$$

donde:

$$R_p = \frac{\sum_{j=1}^n Nsj}{\sum_{j=1}^n Nij}$$

Para este conjunto de datos se obtuvo:

Edad Pooled
31,40823574

b) Tiempo promedio, consiste en tomar la suma de los tiempos individuales y dividirla entre el numero total de éstos, donde el tiempo individual  $t$  es calculado según la expresión (3.8). Es decir:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j$$

Este método nos da una edad de:

Edad Promedio
31,04340086

c) Edad por ajuste de isócronas: el cual consiste en hacer una regresión lineal con el intercepto igual a cero de los pares  $(N_s, N_i)$ . La pendiente de esta recta es considerada como el estimador del cociente  $\frac{N_s}{N_i}$ .

Edad Isócrona
31,73185474

Donde la ecuación de la recta esta dada por  $y = 0,1703x$  y el error cuadrático sobre la regresión lineal por  $R^2 = 0,7737$ . Ver Figura 4.15.

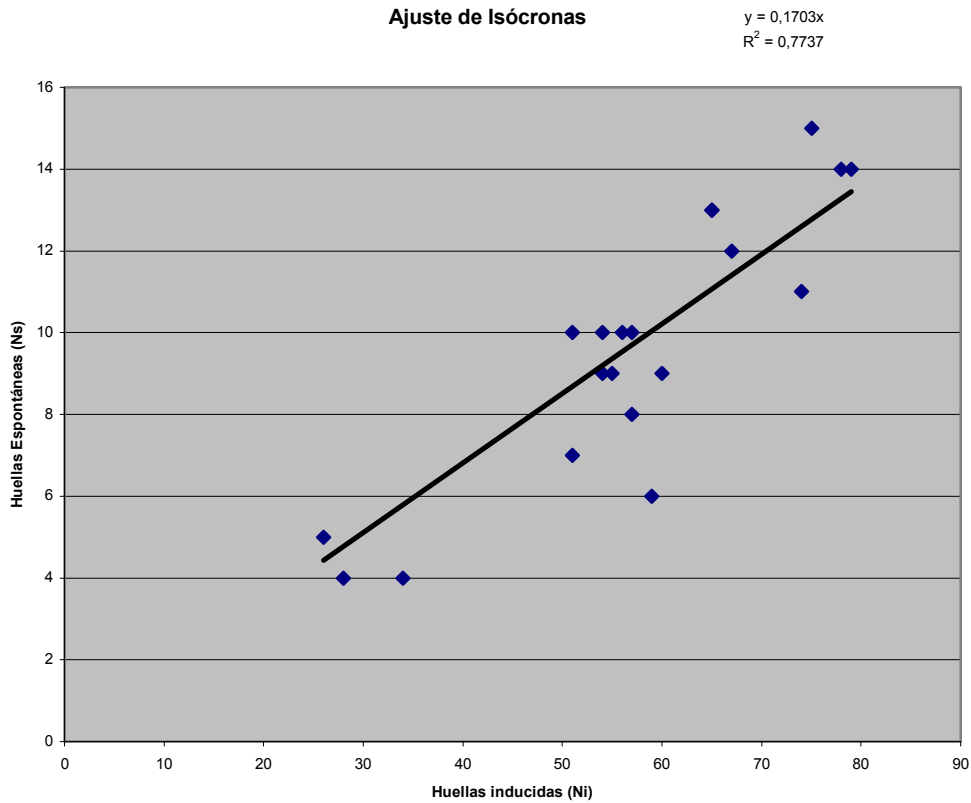


Figura 4.15. Ajustes por isócrona para el conjunto de datos de Durango.

El cálculo de la edad estándar por huellas de fisión permite calibrar el flujo de neutrones del reactor, con las edades estándar se calculan el factor Z que es necesario para estimar la edad de la muestra desconocida, hay dos formas de obtener el factor Z:

a) La fórmula de la estimación del Z pooled (Green, 1986) viene dada por:

$$Z_p = \frac{\exp(\lambda_\alpha t_c) - 1}{\lambda_\alpha \left( \frac{\sum_{j=1}^n N_{sj}}{\sum_{j=1}^n N_{ij}} \right)_c G\rho_m}$$

donde  $t_c$  es la edad del estándar, en este caso el apatito de Durango.

b) La estimación del Factor Z por promedios viene dada por:

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_j$$

Cualquiera de estos valores se sustituye en la ecuación (3.8) para la muestra de edad desconocida y así se obtienen las edades individuales.

En este trabajo no se calculó el factor Z explícitamente, debido a que no se cuenta con los datos de irradiación tanto de la muestra estándar como de las muestras seleccionadas en campo y los vidrios monitores, por ende, sólo se explicó anteriormente la manera cómo se determina la edad por el MHF para el caso de un solo evento geológico, específicamente para algunos datos pertenecientes al apatito de Durango, proporcionados por el Prof. Jorge L. Mora del Laboratorio de Termocronología de la UCV.

Posiblemente las muestras recolectadas para este trabajo tienen diversas edades o son de componentes mixtos debido a la cercanía de diversos terrenos fuentes pertenecientes a los Andes Venezolanos y a otros eventos tectónicos como la erosión del prisma de acreción dejado durante el paso del Arco de Islas con la placa suramericana. Por esta razón, es necesario hacer un análisis más amplio para descomponer esta mezcla. Una aplicación de este tipo, y la obtención del factor Z específico del usuario puede estudiarse detalladamente en Yegres (2003).

#### 4.5 Resultados de la Separación de Minerales

En esta fase se procedió con la trituración y el tamizado de las muestras obtenidas en campo (tabla 4.7), donde se observan el número de pasos realizados y la variación en peso (Kgrs.) de éstas según las diversas trituraciones y tamizados realizados

Tabla 4.7. Datos de trituración y tamizado de las muestras, expresado en Kg.

Muestra	1° Triturac.	2° y 3° Triturac.	1° Tamizada		4° Triturac.	2° Tamizada		Total Fr < 60	3° Tamizada	
			> 60	< 60	> 60	< 60	< 200		(60,200)	
L001	28,80	27,40	21,40	5,50	20,95	17,05	3,70	9,20	3,70	3,50
L002	26,70	24,20	17,05	6,20	16,85	14,05	2,40	8,60	3,50	5,95
L003	26,10	24,40	18,15	6,25	17,60	15,55	1,90	8,15	3,00	4,90
L004	26,20	24,40	17,65	6,40	17,30	15,55	1,45	7,85	3,30	4,60
L005	27,60	25,65	19,90	5,35	18,95	16,90	1,95	7,30	3,60	3,70

Luego se pasa a la mesa de Wilfley, donde se obtienen los una mayor concentración de fragmentos de roca y minerales pesados, concentrados según su densidad. Como resultado de este proceso se obtiene las siguientes porciones en kilogramos, resumidos en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Resultados obtenidos en la mesa de Wilfley, cantidad en kilogramos.

Muestra	Deslamado	Porción Concentrados		Porción Mixtos		Porción Estériles	
L001	2,600	0,650	0,250	0,050	0,400	0,700	0,400
L002	4,300	0,355	0,250	0,055	0,650	1,500	1,200
L003	3,100	0,750	0,650	0,070	0,400	0,550	0,350
L004	2,900	0,600	0,650	0,250	0,250	0,600	0,400
L005	2,250	0,450	0,250	0,100	0,280	0,600	0,325

Se hicieron diversas pruebas, para garantizar una mayor producción de minerales pesados. En la tabla anterior, llama la atención que el primer envase de la mesa de Wilfley no arrojó resultados en ninguna de las pruebas hechas, posiblemente esto se deba a la gran cantidad de fragmentos de roca y poca concentración de minerales pesados. La mayoría de éstos, quizá por la continua trituración quedaron

reducidos, disminuyendo así su tamaño crítico para que sean separados por densidad, por tal razón se encontró una mayor concentración de éstos en los envases 2 y 3.

Continuando con el procedimiento de obtención de minerales pesados se realizó una primera separación por medio del Bromoformo, esto permitió que la porción pesada se transformara en fragmentos con densidades mayores a 2.96 grs/cm<sup>3</sup>. Posteriormente dicha fracción se pasó por el separador magnético Frantz con la finalidad de utilizar las propiedades de susceptibilidad magnética de los minerales pesados. Los resultados obtenidos en éstas dos separaciones son resumidos en la Tabla 4.9.

*Tabla 4.9. Resultados de la separación por Bromoformo y el separador Magnético Frantz, expresados en gramos.*

Muestra	MINERALES PESADOS			
	Separados por Bromoformo		Separados Frantz	
L001	4,341	-	1,205	-
L002	3,313	1,846	0,465	1,598
L003	11,293	-	7,780	-
L004	7,771	-	3,766	-
L005	4,661	-	2,609	-

Luego se procede a una separación más minuciosa de acuerdo al capítulo anterior utilizando la combinación de líquidos pesados de Diodometano con Benzilbenzoato de manera de obtener una fracción de minerales y fragmentos de roca entre 3.22 y 3.23 grs/cm<sup>3</sup>. Siendo éste el último proceso de concentración de minerales pesados. Finalmente se realiza una separación a través de una lupa a 4X, donde se seleccionaron la mayor cantidad de granos de apatitos, estos apatitos por su color marrón oscuro podrían tener una gran cantidad de huellas de fisión espontáneas, sin embargo, esto se sabrá después de la fase de pulido, revelado y posterior irradiación, los resultados obtenidos son resumidos en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Resultados de la separación, expresado en gramos.

<b>Muestras</b>	<b>Resultados de la separación</b>	<b>% de granos del total recolectado</b>	<b>% de granos de apatito x Kilo</b>
L001	0,189	0,656 %	0,02277 %
L002	0,138	0,517 %	0,0193 %
L003	0,180	0,689 %	0,0264 %
L004	0,142	0,542 %	0,0207 %
L005	0,100	0,362 %	0,01313 %

**Promedio por cada Kilo de muestra recolectada**  
**0,02045 %**

Al momento de culminar este Trabajo Especial de Grado se comenzó el proceso de pulido, cada frasco contentivo de las muestras posee aproximadamente 500 granos de apatitos, en el primer montaje realizado o pastilla, la cantidad de granos esparcidos está en el orden de los 50 granos, por lo tanto, se espera 10 secciones finas por muestras, para el proceso de montaje del detector externo e irradiación. Cuando se termine esta etapa se anexará a este trabajo los resultados obtenidos de las edades.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método de huellas de fisión en apatitos detríticos representa una herramienta muy útil en la datación del último evento tectotérmico para las Formaciones Misoa y Trujillo.

Se adaptó la metodología para el procesamiento de las muestras en la separación de minerales pesados y montaje de apatitos, para la aplicación del método de huellas de fisión en el laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela.

Desde un punto de vista práctico, este trabajo aportó una nueva técnica para el montaje de los apatitos de manera tal, que se aprovechó al máximo el espacio en los contenedores utilizados para la irradiación en el reactor, se redujo el tiempo de pulido y se ahorró la mayor cantidad de materiales utilizados en esta etapa.

En este trabajo, a pesar de que no se logró fechar las muestras seleccionadas, se constató que las areniscas de las formaciones consideradas tienen una alta proporción de minerales pesados que pueden ser datados por el método de Huellas de Fisión, en particular, granos de apatito y circón.

Esto último, es uno de los aportes principales de este trabajo, razón por la cual es necesaria la irradiación de las muestras para determinar si hay mezclas de edades y cuales son los posibles terrenos fuentes o sitios de proveniencia de estos minerales, y si ellos, registran la última exhumación de estructuras producidas por el choque del Arco de Panamá, evidenciarían una relación existente entre estas edades y las del levantamiento de los Andes Venezolanos.

### *RECOMENDACIONES.*

Se recomienda utilizar el separador magnético industrial de alta densidad y el magstream modelo 50 para acelerar el procedimiento de separación de los apatitos detríticos, ya que el costo disminuiría notablemente. Se sugiere realizar análisis geoquímicos, difracción de rayos X, entre otros, para comprobar la génesis mineralógica.

Adyacente a la zona de estudio se encuentra el Granito del Baño, para investigaciones futuras sería interesante, que después de obtener las edades de las muestras recolectadas en este trabajo: L001, L002, L003, L004 y L005, fechar por el método de huellas de fisión este granito, para determinar si éste pudo ser o no fuente de estos sedimentos.



## REFERENCIAS

- Bermúdez M. (2002), Estudio de métodos estadísticos para la datación de material rocoso en cuencas sedimentarias usando huellas de fisión. Tesis de Maestría. Inédito. Universidad Central de Venezuela, 92 p..
- Banks, P. (1984) Mesozoic Pleistocene fission track Ages an rocks of the Venezuelan Andes y their tectonic implications Geological Society of America, Memoria, 162 p. 365-384.
- Bermúdez, M. Alson, P. y Mora, J. (2003) Ecuación Fundamental de la Edad para la datación de material rocoso y su adaptación a la Ecuación Práctica para el Método de Huellas de Fisión. Artículo enviado a la Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 7 p.
- BROOKHAVEN. National Laboratory. Disponible:  
<http://www2.bnl.gov/ton/cgi-bin/tonmap10?1656,6>  
[Consulta: 2.003, 26 Enero].
- Chemical Science & Technology Laboratory. Carta Isotópica. USA. Disponible:  
[www.cstl.nist.gov/div837/division/imagenes/nuchart1.gif](http://www.cstl.nist.gov/div837/division/imagenes/nuchart1.gif) [Consulta: 2003, 25 Marzo].
- Calzadilla, M. (1978) Radiometría. Ministerio de Educación. Editorial Pueblo y Educación. Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. 130 p.
- Corrales, I., (1977) Estratigrafía. Editorial Rueda. Madrid, España. 718 p.

Diccionario Soviético de Filosofía. Ediciones Pueblos Unidos, Montevideo. Pag 29 – 30. Disponible: <http://www.filosofia.org/enc/ros/atomo.htm>. [Consulta: 2002, 28 Agosto].

Enciclopedia The New Grolier Webster International Dictionary (1972). Volúmen II. Grolier Incorporated, New York, 675 p.

Faure, G. (1977) Principles of Isotope Geology. John Wiley & Sons. New York. 95 p.

Gleadow, A. (1974) The Effect of Weathering on Fission Track Dating. Earth Planet. Sci. Letters, 22, pp. 163-168.

Gonzales de Juana, C., y Picard, X., (1980) Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Ediciones FONINVES. Caracas. Tomos I y II.

Green, P. (1981). A new look at statistics in fission track dating Nucl. Tracks. Vol. 5. No.1/2. Great Britain pp. 77-86.

Khon, B. and Shagam, R. (1984) Mesozoic Pleistoceno Fission Track Ages on rock of the Venezuela Andes and their Tectonic implications. Geological Society of America Memory 162.

Khon, B. P., O'Sullivan, P. and Shagam, R. (1995) Apatite fission track ages from the Venezuelan Andes and their tectonic significance. Geological Society of America Annual Meeting. Geological Society of America Abstracts with Programs. New Orleans, November 1995, 27, 6 pp. A229.

LAFACU. El átomo. Disponible:

<http://www.lafacu.com/apuntes/fisica/atomo/default.htm>, 2002.

[Consulta: 2002, 28 Agosto].

Lugo, J. (1991). Cretaceous to Neogene Tectonic Control on Sedimentation: Maracaibo Basin, Venezuela. Unpubl. PhD dissertation. The University of Texas at Austin, Texas, U. S. A. 218 p.

Magnitudes y Unidades Radiológicas. Disponible en:

<http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0504-01/magnitudes.html>. [Consulta: 2.003, 25 Marzo].

Mathius., X. (1989) La Serranía de Trujillo – Ziruma aux confins du bassin de Maracaibo, de la Sierra du Facon et de la Chaîne Caraibe (Venezuela). Tesis Doctoral. Inédito. L'Universite de Bretagne Occidentale (UBO). 264 p.

Mora, J. (1995) Método de Huellas de Fisión como una herramienta útil para la datación de rocas en cuencas sedimentarias. Universidad Central de Venezuela 71 p. Informe LAGOVEN.

Pindell y Barrett (1990). Evolución Tectónica del Caribe. Disponible en: [www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html](http://www.fiu.edu/orgs/caribgeol/Caribreconstr.html). [Consulta: 2.003, 20 Enero].

Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Química y Departamento de Desarrollo Académico (1999). Química Nuclear y Radioactividad. Capítulo 4. Reglas de Estabilidad. Disponible:

[http://www.puc.cl/sw\\_educ/qda1106/CAP4/4B/](http://www.puc.cl/sw_educ/qda1106/CAP4/4B/) [Consulta: 2.002, 28 Agosto].

Serway. (1992). *Física*. Editorial McGraw-Hill, p. 632.

Chu, S. (1999) Tabla de Isótopos. Disponible: <http://ie.lbl.gov/toi/>. [Consulta 2.003, 22 Marzo].

Tarbuck, E.; Lutgens F. (2.000). Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física. Sexta Edición. Madrid. Prentice Hall. 610 p.

The American Heritage Dictionary of the English Language. (2.000) Fourth Edition. Editado y publicado por Houghton Mifflin Company. E. E. U. U. 2.074 p.

Todo-Ciencia. Radioactividad.

Disponible: <http://www.todo-ciencia.com/quimica/0i4124600d990264174.php>.  
[Consulta: 2.002, 26 Agosto].

Venezuela. Ministerio de Energía y Minas. (1997) Léxico Estratigráfico de Venezuela. 3<sup>era</sup> Edición. M. J. Editores. Caracas. Tomos I y II.

Wagner, G; Van Den Haute, P. (1992) Fission-Track Dating. Solid Earth Sciences Library. Kluwer Academic Publishers. E.E.U.U. 285 p.

Yegres C. (2003) El Método de Huellas de Fisión basado en la técnica del detector externo para el cálculo de la edad de la Formación Betijoque. Trabajo de Grado no publicado, UCV. 115 p.

# APÉNDICES