

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EL MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN EN APATITOS BASADO EN LA TÉCNICA DEL DETECTOR EXTERNO EN EL CÁLCULO DE LA EDAD DE LA FORMACIÓN BETIJOQUE, UBICADA EN EL ESTADO TRUJILLO DE LOS ANDES VENEZOLANOS.**

Presentado ante La Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al Título de Ingeniero  
Geólogo Por la Br. Carmen Yegres

Caracas, abril 2003

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EL MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN EN APATITOS BASADO EN LA TÉCNICA DEL DETECTOR EXTERNO EN EL CÁLCULO DE LA EDAD DE LA FORMACIÓN BETIJOQUE, UBICADA EN EL ESTADO TRUJILLO DE LOS ANDES VENEZOLANOS.**

TUTORES: Prof. Mauricio Bermúdez

Prof. Jorge Mora

Presentado ante La Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al título de Ingeniero  
Geólogo Por la Br. Carmen Yegres

Caracas, abril 2003

**Yegres B; Carmen E.**

**EL MÉTODO DE HUELLAS DE FISIÓN EN APATITOS  
BASADO EN LA TÉCNICA DEL DETECTOR EXTERNO EN EL  
CÁLCULO DE LA EDAD DE LA FORMACIÓN BETIJOQUE,  
UBICADAS EN EL ESTADO TRUJILLO DE LOS ANDES  
VENEZOLANOS.**

**Tutores académicos: MSc. Mauricio Bermúdez, MSc. Jorge Mora. Tesis.  
Caracas, U.C.V, FACULTAD DE INGENIERIA, ESCUELA DE GEOLOGIA,  
MINAS Y GEOFISICA (GEOLOGIA), 2003, 250 p.**

**Palabras claves:** Método de huellas de fisión, técnica del detector externo, ecuación de edad, datación, Andes Venezolanos.

**Resumen**

En el presente trabajo especial de grado se describió detalladamente la metodología utilizada para fechar sedimentos pertenecientes a la Formación Betijoque, Miembro Vichú, Estado Trujillo perteneciente al flanco norte de los Andes Venezolanos por el método de huellas de fisión, siguiendo la técnica del detector externo.

También fueron descritos los fundamentos teórico-prácticos que rigen el método de huellas de fisión, se elaboró un manual donde se especifican los principales equipos utilizados, los procesos de separación de minerales pesados por diferentes técnicas (magnéticas, centrífugas, líquidos pesados), así como también las fases de la preparación de las secciones finas para este método de datación, las etapas de montaje y pulido, hasta la obtención de las edades por el método de huellas de fisión. Se proporcionan indicaciones necesarias acerca del trabajo geológico de campo y la recolección de las muestras para su posterior datación y algunos lineamientos de seguridad utilizados en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.

En cuanto a los resultados obtenidos, se determino dos poblaciones para el conjunto de granos estudiados, las cuales coinciden con la validación realizada por el programa BINOMFIT; en cuanto a las edades de los últimos eventos geotérmicos, se tiene que el paso de los granos de apatitos, por la isoterma de 110 °C permiten definir un rango mínimo comprendido entre 5 y 6 M.a y otro máximo comprendido entre 21 y 26 M.a. estas edades, coinciden con las proporcionadas en las investigaciones sobre en los granitos realizadas por Shagam (1995), en una zona muy cercana al área de estudio, de este trabajo.

## DEDICATORIA

*A mis amados Padres Lucia y Orlando,  
a la memoria de T.J Lionel, que compartió  
conmigo muchos años de su vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mis más sinceras palabras de agradecimiento a la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por todo lo que he recibido hoy y siempre. A mis tutores Prof. Mauricio Bermúdez, por su orientación, apoyo, colaboración y dedicación; al Prof. Jorge Mora, por traer y adquirir todos los equipos que me ayudaron a realizar este trabajo, el cual brinda grandes oportunidades de estudios científicos y tecnológicos a los estudiantes de la UCV.

A Dios y la Madre Maria de San José, por sus muchos milagros.

Al FONICIT por su ayuda económica, al Núcleo de la UCV en Cagua y todos sus profesores, en especial al Prof. Ennodio Reyna por creer en mí.

A mis queridísimos padres Lucia y Orlando, por su cariño de siempre, por apoyarme a realizar mi gran sueño que hoy apenas comienza.

A mis hermanos Mariela, Ramón y Orlando, por ser los mejores hermanos del mundo, por siempre estar conmigo y creer en mí como un ejemplo de dedicación.

A mi cuñada Marítza, por su gran colaboración cuando la necesito, a mis sobrinos Cesar Augusto y Gabriela Andrea, por nacer y dar luz a mi vida, los amo.

A mis primos, Cecilio Alfredo, Cecilio José, Rafael, Juan Luis, Elisa, Zully, Asdrúbal Carlos y Mairobys, por el apoyo y cariño que siento de ustedes.

A mis tíos Gisela, Elba, Elira, Ferdinan y Máchela por todo lo que me han dado y muy especialmente a mi segunda mamá MARÍA, por enseñarme lo que es el amor, gracias por estar siempre a mi lado.

A mis hermanos del alma Soleddy de Balleby y Félix Vegas, por estar conmigo en las buenas y en las malas, sin ustedes mi vida aquí en Caracas, no sería lo que hoy es, los

amo y espero que siempre estemos juntos, muchas gracias por todo lo que he recibido de ustedes.

A mis sobrinos del alma Gabriel y Emily Chang, por todo el amor que me brindan.

A Luiraima Salazar, porque siempre conté contigo en los peores días y me levante a tu lado.

A las familias González del Castillo y Urbina, por acogerme y hacerme sentir parte de ellos, a la familia Vega, por todo su cariño.

A mis amigos, Jorge, Mariale, Claudia, Eskeila, Humberto, Mauricio, Marcos, Pelón Jesús, Erickson, Gustavo, Martín, Luis Manrique y Paul por apoyarme en algún momento.

A los profesores Winkler, Méndez, Mederos, Sandoval, Domínguez, Desantís, Martríz, Alezone, Rey, León, González, Ichazo, Navarro, Fournier, Estévez, Meléndez y Di Simone, por brindarme la oportunidad de aprender de ustedes.

A mis compañeros en el Laboratorio de Termocronología: Richard, por el mapa, la columna y los días de campo, a Juan, por el trabajo en el cilindro y el campo, a Imerú, Matías y José, por su colaboración en algún momento y especialmente a Jolimar Coronado por escucharme y estar conmigo en todo el trabajo en el laboratorio y en el cilindro en Metalurgia.

A la señora Morella, Eduardito, Eunice, Maria Auxiliadora, en la Escuela, a los obreros en el cilindro en Metalurgia y a los vaquéanos en la quebrada Vichú.

A mis Estudiantes de Geología, Minas, Geofísica, Petróleo, Civil y Geografía.

A los Bomberos Universitarios, que me atendieron cuando me lesioné la columna.

A todas aquellas personas que no recuerdo ahora, pero que de alguna forma me han ayudado.

*Muchas Gracias*

## INDICES GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

pp.

LISTA DE FORMULAS.....	x
LISTA DE FIGURAS. ....	xi
LISTA DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvi

## CAPITULO

I Fundamentos teóricos del método de huellas de fisión.....	1
1.1.- Decaimiento radiactivo.....	1
1.2.- Ecuación de edad para el método de huellas de fisión.....	5
1.3.- Aproximación de la edad estándar o método de calibración Z.....	13
1.4.- Método de poblaciones.....	16
1.5.- Método grano a grano.....	16
1.5.1.- Técnica del regrabado.....	17
1.5.2.- Técnica de repulido.....	17
1.5.3.- Técnica del detector externo.....	17
1.6.- Ventajas del método de huellas de fisión.....	20
II Geología regional y local.....	21
2.- Geología regional.....	22
2.1.- Geología histórica regional.....	22
2.2.- Marco estructural de Venezuela occidental.....	26
2.3.- Estratigrafía regional de Venezuela occidental.....	27
2.3.1.- Formación Betijoque.....	28

2.3.1.1- Miembro Vichú.....	31
2.3.1.2- Miembro San Alejo.....	32
3.- Geología local.....	33
3.1.- Marco geológico.....	34
3.2.- Estratigrafía local.....	34
3.2.1.- Miembro Vichú.....	34
3.3.- Criterio para la selección de muestras.....	38
III Procesamiento de las Muestras.....	39
4.1.- Fase 1: Secado, Tamizado y Separación Gravimétrica.....	39
4.1.1.- Mesa de secado.....	40
4.1.2.- Tolva o alimentadora.....	41
4.1.3.- Tamizadora.....	42
4.1.4.- Mesa de sacudidas Wilfley.....	44
4.2.- Fase 2: Separación por densidades y separación magnética.....	50
4.2.1.- Separación por medio denso (Bromoformo).....	51
4.2.2.- Separación magnética.....	55
4.2.3.- Separador ultrasónico.....	59
4.2.4.- Secado por el horno isotérmico.....	60
4.2.5.- Separación con líquidos pesados Benzyl Benzoato y Diodo metano.....	61
4.3.- Fase 3: Selección de apatitos, montaje y pulido.....	61
4.3.1.- Selección de apatitos en las muestras de sedimentos.....	62
4.3.2.- Preparación de la sección fina (pastilla).....	64
4.3.3.- Pulido.....	65
4.4.- Fase 4: Revelado, montaje del detector externo (mica).....	68
4.4.1.- Revelado.....	68
4.4.2.- Montaje del detector externo (mica).....	69
4.5.- Fase 5: Preparación de la sección fina para el conteo de las	

huellas.....	71
4.5.1.- Revelado de la mica después de la irradiación.....	72
4.5.2.- Arreglo del montaje para el conteo.....	73
IV Datación de muestras y Resultados.....	77
5.1.- Descripción de los parámetros necesarios para la ecuación de edad práctica del MHF.....	77
5.2.- Cálculo de edades para las muestras de apatito recolectadas en campo.....	77
5.3.- Validación de las poblaciones.....	90
5.4.- Análisis de los resultados.....	98
APENDICE 1.....	100
1.- Equipo utilizado para ser llevado a Campo.....	100
2.- Descripción de la libreta donde se lleva la litología.....	101
3.- Descripción de la libreta donde se lleva la poligonal.....	101
4.- Descripción de como se debe tomar una Muestra.....	105
APENDICE 2.....	107
1.- Calibración de la tolva o alimentadora.....	107
2.- Calibración de la mesa de sacudidas de Wilfley.....	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	115
ANEXOS.....	120

## INDICES DE FIGURA

	pp.
Figura 1: Mapa de Localización Geográfica.....	xvii
Figura 2: Formación de una huella de fisión.....	6
Figura 3: Zonas de retención parcial de huellas de fisión para el apatito y circón...6	
Figura 4: Proporción de átomos $^{238}\text{U}$ y $^{235}\text{U}$ en una muestra.....	8
Figura 5: Posición del detector según la geometría.....	10
Figura 6: Revelado de una huella.....	11
Figura 7: Cuadrícula para contar el área total.....	15
Figura 8: Tiempo de fases de grabados.....	18
Figura 9: Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	21
Figura 10: Mapa geológico estructural de Venezuela occidental.....	26
Figura 11: Columna estratigráfica generalizada de la región.....	28
Figura 12: Miembro Vichú, intercalaciones de areniscas y limonitas.....	32
Figura 13: Miembro San Alejo intercalaciones de conglomerados con areniscas...33	
Figura 14: Miembro Vichú, vista de la quebrada.....	35
Figura 15: Laminación paralela.....	36
Figura 16: Arenisca con lentes de conglomerados.....	36
Figura 17: Intercalaciones de areniscas con limonitas.....	37
Figura 18: Huellas de cargas en lutitas.....	37

Figura 19: Lignito en las lutitas.....	37
Figura 20: Mesa de secado.....	40
Figura 21: Tolva.....	41
Figura 22: Tamizadora.....	42
Figura 23: Tamiz.....	44
Figura 24: Distribución de los productos en la mesa de sacudida de Wilfley.....	45
Figura 25: Mesa de sacudidas.....	46
Figura 26: Separación del sedimento, en la mesa de sacudidas.....	47
Figura 27: Distribución del agua.....	48
Figura 28: Separador magnético Frantz.....	57
Figura 29: Configuración paramagnética.....	58
Figura 30: Separador ultrasónico.....	59
Figura 31: Horno isotérmico.....	60
Figura 32: Montaje de los apatitos. (A) materiales a usar para la preparación de las secciones finas. (B) secciones finas terminadas.....	65
Figura 33: Equipo Buehler utilizado para pulir las muestras.....	67
Figura 34: Apariencia de los granos pulidos usando luz reflejada a 125X.....	67
Figura 35: Separación de la mica necesaria para el montaje según la técnica del detector externo.....	70
Figura 36: Resumen de la fase 4, pulido, revelado y montaje del detector externo..	71
Figura 37: Arreglo del montaje de la pastilla y de la mica para el conteo.....	74
Figura 38: Diagrama de flujo utilizado para el procesamiento de muestras bajo	

la técnica del detector externo con la finalidad de datar según el método de huellas de fisión.....	76
Figura 39: Mallas 10×10 de conteo usadas para estimar $\rho_s$ y $\rho_i$ según la TDE: (A) en un grano de apatito, (B) en la mica colocada en contacto cerrado sobre el mismo grano.....	78
Figura 40: Dispersión de los pares ( $N_i, N_s$ ) con líneas suavizadas para los datos B01.....	85
Figura 41: Ajuste de Isócronas de los datos B01: (A) para la tendencia mínima, (B) para la tendencia máxima.....	86
Figura 42: Dispersión de los pares ( $N_i, N_s$ ) con líneas suavizadas para los datos B02.....	88
Figura 43: Ajuste de Isócronas de los datos B02: (A) para la tendencia mínima, (B) para la tendencia máxima.....	89
Figura 44: Histogramas con líneas de densidades de probabilidades para las muestras B01 y B02.....	90
Figura 45: Resultados arrojados por el programa BINOMFIT para la muestra B01.....	93
Figura 46: Discriminación de edades para el conjunto de datos B01. (A) Gráfico de densidades de probabilidades con los mejores ajustes, (B) Gráficos de dispersión radial “Radial Plot”.....	94
Figura 47: Resultados arrojados por el programa BINOMFIT para la muestra B02.....	96
Figura 48: Discriminación de edades para el conjunto de datos B02. (A) Gráfico de densidades de probabilidades con los mejores ajustes, (B) Gráficos de dispersión radial “Radial Plot”.....	97
Figura 49: Mapa geológico de los Andes Venezolanos donde se especifica la toma de muestras realizada por Kohn et. al (1984) y Shagam et. al (1984).....	99
Figura 50: Diagrama de representación de la historia de levantamiento y subsidencia de los Andes Venezolanos fechada por el Método de Huellas de Fisión.....	99

## INDICES DE FORMULAS

Formula	pp.
(01) Tasa de decaimiento del número de átomos (N).....	1
(02) Número original de átomos padres radioactivos.....	2
(03) Número de elementos estables (hijos).....	3
(04) Ecuación de decaimiento de un átomo padre en cualquier tiempo $t$ .....	3
(05) Ecuación básica para calcular edades isotópicas.....	3
(06) Ecuación fundamental de la edad.....	4
(07) Ecuación de número de huellas espontáneas $N_s$ .....	7
(08) Ecuación de decaimiento de átomos total.....	8
(09) Número de huellas inducidas $N_i$ .....	8
(10) Número huellas inducidas, tomando en cuenta la abundancia isotópica.....	9
(11) Ecuación fundamental del método de huellas de fisión o ecuación de Fleischer y Price.....	9
(12 a) Densidad de las huellas espontáneas.....	10
(12 b) Densidades de las huellas inducidas.....	10
(13) Ecuación práctica del MHF.....	13
(14) Ecuación práctica para determinar edades conocidas.....	14
(15) El factor de calibración $Z$ .....	14
(16) Ecuación práctica para la muestra de edad desconocida.....	15
(17 a) Densidad de huellas desconocidas.....	15
(17 b) Densidad de huellas inducidas.....	15
(18) Densidad de la huella inducida por el método de sustracción.....	17

Tabla 3.0: Separación del tamaño de grano, según el tipo de tamiz a utilizar.....	43
Tabla 3.1: Minerales pesados colocados en grupos de acuerdo a su índice de susceptibilidad magnética.....	58
Tabla 3.2: Escala ópticas del Apatito.....	63
Tabla 3.3: Escala de refringencia ópticas para minerales pesados.....	63
Tabla 3.4: Escala de birrefringencia ópticas para minerales pesados.....	63
Tabla 4.0: Datos de entrada pertenecientes al apatito de Durango (D1) para el cálculo del Factor Z.....	80
Tabla 4.1: Datos de salida del programa en Basic ZAGE (Brandon, 1995).....	81
Tabla 4.2: Base de datos en Excel, para el calculo del factor Z, según los métodos pooled y mean.....	82
Tabla 4.3: Parámetros utilizados para el cálculo de las edades individuales.....	83
Tabla 4.4: Conjunto de datos y tiempos individuales para cada grano de la muestra B01.....	84
Tabla 4.5: Datos ordenados por tiempo y estimaciones de las edades máximas y mínimas para B01.....	86
Tabla 4.6: Conjunto de datos y tiempos individuales para cada grano de la muestra B02.....	87
Tabla 4.7: Datos ordenados por tiempo y estimaciones de las edades máximas y mínimas para B02.....	89
Tabla 4.8: Entrada de los datos B01 en el programa BINOMFIT.....	92
Tabla 4.9: Entrada de los datos B02 en el programa BINOMFIT.....	96
Tabla A-1: Descripción del Afloramiento.....	102
Tabla A-2: Descripción de la Poligonal.....	104

TablaA-3: Calibración de la tolva para la tamizadora.....108

Tabla A-4: Calibración de la tolva para la Mesa de Sacudidas.....109

## INTRODUCCIÓN

En la década de los 90, el Departamento de Geología, a través del Profesor Jorge Mora, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela adquirió una serie de equipos con la finalidad de datar eventos tecto-térmicos reflejados en sedimentos y rocas siguiendo la metodología del método de datación radiométrica por huellas de fisión. Debido a que la aplicación de este método en nuestra universidad es novedosa, en este trabajo se resalta la metodología necesaria para el procesamiento de las muestras bajo esta técnica.

Este trabajo especial de grado tiene como objetivo general describir detalladamente cada una de las secuencias necesarias para aplicar el método de huellas de fisión, siguiendo la técnica del detector externo. En particular, se aplicó toda la secuencia necesaria para fechar los sedimentos de la Formación Betijoque, en el flanco norte de los Andes Venezolanos. Para tal fin, se establecerán los fundamentos teóricos del Método de Huellas de Fisión basados en el cálculo de edades de sedimentos utilizando la fisión espontánea de los átomos de Uranio ( $^{238}\text{U}$ ), como isótopo común en los minerales accesorios (apatito, circón, esfenas, entre otros). Estos átomos al decaer producen una zona de daño en la roca la cual se conoce como huella de fisión (Wagner, 1992).

El presente trabajo se divide en cuatro capítulos: El primero trata acerca de los fundamentos teóricos del método de huellas de fisión, desde el enunciado de Rutherford y Soddy para explicar matemáticamente el proceso de decaimiento radioactivo, hasta la adaptación de esta teoría a la práctica por el Método de Huellas de Fisión (MHF). El segundo capítulo se refiere al estudio de la geología regional y local de la zona estudiada. En el tercer capítulo se describen los procedimientos para el procesamiento de las muestras de sedimentos tomadas en la región de estudio, con la finalidad de fecharlas por el MHF. Posteriormente en el cuarto capítulo, se analizaron los resultados individuales de las edades obtenidas por el MHF basados en



## ANTECEDENTES

Del Método de Huellas de Fisión

Silk y Barnes (1959), fueron los que observaron las huellas por primera vez.

Price y Walker (1962a), determinaron que estas huellas pueden ser ampliadas y hechas visibles bajo un microscopio óptico y grabadas con soluciones adecuadas a causa del incremento de la solubilidad.

Price y Walker (1962b), descubrieron las huellas de fisión espontáneas o naturales en micas. En años posteriores probaron que estas huellas de fisión se producían principalmente por la fisión espontánea del  $^{238}\text{U}$ .

Price y Walker (1963a), determinaron otras aplicaciones de las huellas de fisión en partículas por la fisión del  $^{238}\text{U}$ .

Fleischer y Price (1964a), usaron este método para datar tektitas y vidrio del desierto de Libia, Obteniendo resultados satisfactorios concordantes con el método de K-Ar.

Fleischer y Price (1964b), establecieron las bases sobre las cuales el método de huellas de fisión pasó a ser un método usual e ideal para datar una variedad de minerales, tanto naturales, como en vidrio, esto es aplicable para muestras relativamente jóvenes que no han sido recalentadas desde su periodo de formación.

Fleischer *et al*; (1964c), Bigazzi (1967), Welin *et al*; (1972); trabajaron con la técnica del ataque químico, la de detectores externo y la técnicas grano a grano.

Fleischer *et al*; (1964), y Koshimiz (1981), estudiaron el pulido sobre superficies externas de minerales con alto contenido de uranio como el circón.

Wagner (1966), Naeser *et al*; (1980), utilizaron la técnica de sustracción aplicada a vidrios.

Bigazzi (1967), aplicó la técnica de detector externo sobre una mica con bajo contenido de uranio.

Fleischer, *et al*; (1969), establecieron el concepto de zona de desvanecimiento parcial en la cual las huellas de fisión se desvanecen a diversas temperaturas.

Watanabe y Suzuki (1969), utilizaron la técnica sobre rocas jóvenes.

Bertine *et al*; (1970), trabajaron en sedimentos pertenecientes a los mares profundos.

Wagner (1974), y Fleischer (1975), compilaron todos los fundamentos teóricos y prácticos del método de huellas de fisión y lo publicaron en sus respectivos libros.

Khan y Ahmad (1975), Naeser *et al*; (1980), trabajaron con la técnica de población de grano con huellas espontáneas e inducidas en el mismo mineral.

Fleischer *et al*; (1975), Naeser (1979), Gleadow (1981), Hurford y Green (1982), Storzer y Wagner (1982), trabajaron con la técnica y procedimientos para datar con huellas de fisión.

Gleadow (1978), trabajo con el proceso de metamitización.

Gleadow (1978, 1981), Naeser *et al*; (1980), trabajaron en la técnica grano a grano sobre las huellas espontáneas e inducidas.

Gleadow (1978, 1981), estudio el efecto del ataque químico o revelado sobre las huellas de fisión.

Gleadow (1978), Van den Hauten, (1986), llegaron a determinar que la coloración en el circón tal vez es una señal de daño Alfa ( $\alpha$ ), pero también pueden estar relacionado con otras causas.

Gleadow (1981), analizó la incidencia de las huellas usando diferentes zonas del grano.

Gleadow (1981), trabajo con el método de repulido tomando en cuenta la densidad de las huellas.

Kohn y Shagam (1984), trabajaron con huellas de fisión para datar rocas de los Andes Venezolanos a un conjunto de granitos usando la técnica de poblaciones.

Van den Haute y Chambaudet (1990), determinaron que la técnica de población de grano, se trabaja en forma homogénea.

Mora, J. (1994), determinó algunas edades sobre los flancos norte y sur de los Andes Venezolanos en un trabajo inédito publicado para Lagoven, C.A.

Kohn, B. P., O'Sullivan, P., y Shagam, R., (1995), determinaron la relación que hay entre las edades por huellas de fisión y sus implicaciones tectónicas. Trabajaron con 45 muestras y aplicaron el método huellas de Fisión a 22 apatitos, 21 circones y 2 esfenas con diversos rangos de edades, que van desde los 2 hasta los 25 millones de años, interpretadas como edades relativas en el levantamiento de cobertura rocosa.

Erikson, J.P.,y S.A. Kelley, (1996), calcularon algunas edades acerca del levantamiento de Los Andes Venezolanos en sedimentos de la cuenca de Barinas pero no se publicó el trabajo por algunas inconsistencias.

## CAPITULO I Fundamentos teóricos del método de huellas de fisión

### Introducción

En este capítulo se estudiará el decaimiento radioactivo basándose en la teoría establecidas por Rutherford y Soddy, además se establecerán las ecuaciones de edad fundamental y se realizará su adaptación al método de huellas de fisión, posteriormente se explicarán los métodos poblaciones y de grano a grano, haciendo énfasis en la técnica del detector externo (TDE), bajo la cual se procesaran las muestras.

### 1.1.- Decaimiento Radiactivo:

El decaimiento, es un proceso exotérmico que permite medir la radioactividad de las rocas y calcular la tasa de producción de calor en ellas. Esto fue demostrado por Curie y Laborde (Faure, 1985).

De esta manera, Rutherford y Soddy, establecieron en el año 1902 que: *“la tasa de decaimiento de un padre inestable es proporcional al número de átomos (N) a lo largo del tiempo t”*. Traduciendo esto a un lenguaje matemático, tenemos:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

Esta ecuación representa, la tasa de decaimiento del número de átomos N en el instante de tiempo t, N el número de átomos padres y  $\lambda$  es la constante del decaimiento radioactivo.

El valor numeral de  $\lambda$  es considerado característico de los nucleidos radiactivos y es expresado en la unidad de tiempo recíproca ( $\frac{1}{\text{años}}$ ). La constante de decaimiento representa la probabilidad de que un átomo decaiga dentro de una unidad de tiempo.

Luego, separando las variables se obtiene:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Integrado a ambos lado de la misma:

$$\int \frac{dn}{N} = -\lambda \int dt$$

esto, lleva a:

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

Aplicando exponencial a ambos lados de la ecuación, se tiene:

$$N(t) = e^{-\lambda(t+c)} \Rightarrow N(t) = e^{-\lambda t} \cdot e^{-\lambda c}$$

Ahora llamando:

$$e^{-\lambda c} = K$$

$$N(t) = K \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Donde  $N(t)$  da el número original de átomos padres radioactivos en cualquier tiempo  $t$ .

Suponiendo que la cantidad de átomos presentes en el tiempo inicial ( $t = 0$ ) es  $N_0$ , es decir,  $N(0) = N_0$  y sustituyendo esta condición inicial en la ecuación (2), se obtiene:

$$\begin{aligned} N(0) &= K e^0 \\ N_0 &= K \end{aligned}$$

Por lo tanto la ecuación (2), quedaría como:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Por otra parte, el número de elementos estables  $D$  (hijos) producto del decaimiento radiactivo de los isótopos inestables (padres  $N$ ) está dado por:

$$D = N_0 - N \quad (4)$$

Sustituyendo (3) en la expresión anterior, obtenemos:

$$D = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

Esta es la ecuación básica de la mayoría de los métodos de datación radiométrica, incluso el método de huellas de fisión, ahora, es necesario calcular los átomos padres e hijos en una roca, cuyos átomos de  $^{238}\text{U}$  decaen por fisión nuclear, es por tal razón que se necesita una ecuación para la práctica.

En el caso que ha decaído la mitad de los elementos  $N_0$  y despejando  $t$ , se obtiene:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

el cual es llamado el *tiempo de vida media*. Como en el isótopo más abundante es el  $^{238}\text{U}$ , tiene una vida media de 4.500 Ma. Es de gran importancia para la datación de eventos geológicos.

Despejando  $t$  de la ecuación (5) tenemos:

$$\frac{D}{N_0} = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left( \frac{D}{N_0} + 1 \right) \quad (6)$$

Esta última expresión es llamada ecuación fundamental de la edad (Wagner, 1982). Esta ecuación es utilizada para calcular la edad de una roca según el tipo de decaimiento radiactivo, pero no se puede aplicar en la práctica ya que no se conoce  $N_0$  por lo que es necesario adaptarla al Método de Huellas de Fisión.

Geológicamente para poder calcular  $t$ , es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- 1) “La roca o sistemas de minerales deben ser *sistemas cerrados* con respecto al padre y el hijo”. Esta condición es equivalente a decir que el sistema no han ganado ni perdido padres e hijos de manera que el cociente  $D/N$  ha cambiado solamente como un resultado del decaimiento radioactivo.

- 2) Debe ser posible asignar un valor real a  $D/N$ . Esto puede ser usado realmente, especialmente cuando  $D > N$ .
- 3) El valor de la constante de decaimiento  $\lambda$  es conocido.
- 4) Las medidas de  $D/N$  deben ser aproximadas y representativas de la roca o mineral a ser datado.

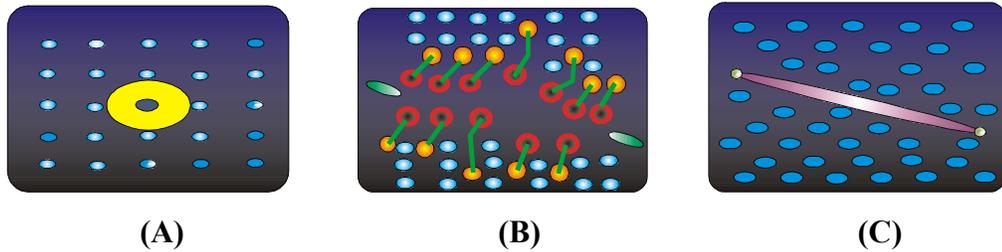
Cuando estas cuatro condiciones son satisfechas y cuando los datos pueden ser asociados con un evento geológico significativo, la solución de la ecuación (6) proporciona un dato el cual puede representar la edad de la roca o mineral.

### **1.2.- Ecuación de Edad para el Método de Huellas de Fisión:**

En principio el método de huellas de fisión, no es diferente a otros métodos isotópicos para el cálculo de edades, éste se basa en el decaimiento radioactivo natural del átomo de uranio presente en el mineral accesorio. Tal decaimiento, puede ser explicado de manera sencilla como sigue:

En la Figura 2, se puede observar la formación de una huella del átomo de uranio mediante la fisión nuclear, esto consiste de la siguiente manera:

La Figura (A) muestra el enrejado cristalino o disposición atómica de un mineral hipotético en el centro se encuentra un átomo  $^{238}\text{U}$  del cristal, en un estado excitado, luego en la Figura (B) se puede apreciar que por acción de la fisión nuclear del isótopo  $^{238}\text{U}$  y la ionización del átomo del cristal se separa el núcleo en direcciones opuestas cuyos fragmentos chocan con el enrejado de los enlaces, dejando un espacio que no retoma su forma original, finalmente en la Figura (C), se muestra la zona de daño, llamada huella de fisión.



**Figura 2:** Formación de una huella de fisión

La longitud de una huella de fisión es de aproximadamente 16 micrones ( $16\mu$ ). Sin embargo la longitud de estas huellas pueden ser reducidas cuando ellas son sometidas a temperaturas mayores a la temperatura a la cual se forman las huellas, llamadas *temperatura de cierre* o “closure temperature” (Wagner, 1992). Estas zonas donde las huellas de fisión se reducen, son conocidas como *zona de desvanecimiento parcial* o “Partial Annealing Zone” (PAZ). En la figura 3 se aprecian las zonas de retención parcial de las huellas de fisión para los minerales apatito y circón. En el caso del apatito esta zona está entre los  $60^{\circ}\text{C}$ , y  $125^{\circ}\text{C}$ , a una profundidad de 5 km, por encima de esta temperatura las huellas comienzan a desvanecerse, y de esta zona crítica hacia abajo es la que se conoce como zona de desvanecimiento parcial. En el caso del circón la zona de retención o de formación de huellas de fisión, están entre los  $230^{\circ}\text{C}$  y  $310^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 3:** Zonas de retención parcial de huellas de fisión para el apatito y circón  
(Modificada de [http://pangea.stanford.edu/structure/projects/fission\\_track.html](http://pangea.stanford.edu/structure/projects/fission_track.html))

Retomando la ecuación (6) para adaptarla a la ecuación de edad del método de huellas de fisión, las huellas espontáneas de los isótopos del átomo hijo ya están presentes en la roca; Es necesario determinar las huellas inducidas, en las cuales el

producto del decaimiento del  $^{238}\text{U}$ . El uranio-238 no solo decae por la fisión espontánea, sino también por la emisión de las partículas  $\alpha$ . Los productos de este tipo de decaimiento en el  $^{238}\text{U}$  son los más comunes y los que más se encuentran en la naturaleza, por lo tanto la constante de decaimiento total para el  $^{238}\text{U}$ , enfocado en la práctica, puede calcularse como:

$$\lambda_T = \lambda_\alpha + \lambda_f$$

Las variables, representan:

$\lambda_T$  = Constante del decaimiento total

$\lambda_\alpha$  = Constante de decaimiento por emisión de las partículas  $\alpha$

$\lambda_f$  = Constante de decaimiento por fisión nuclear

Asumiendo que cada átomo que se genera produce una huella de fisión espontánea ( $N_s$ ) el número total de decaimiento de los átomos de  $^{238}\text{U}$ , después de un tiempo  $t$ , está dado por:

$$N_s(t) = {}^{238}N(e^{\lambda t} - 1)$$

Donde  ${}^{238}N$  representa el número de átomos de  $^{238}\text{U}$ . El número de decaimientos producto de la fisión espontánea se mantienen en la proporción fija ( $\lambda_f / \lambda_T$ ), al número total de decaimiento del  $^{238}\text{U}$ . Por lo tanto el número de huellas espontáneas  $N_s$  que se habrá acumulado (por unidad de volumen), está dado por:

$$N_s = \frac{\lambda_f}{\lambda_T} {}^{238}N(e^{\lambda t} - 1) \quad (7)$$

La constante de decaimiento para la fisión espontánea, es de menor orden de magnitud que la de la constante de decaimiento por emisión de partículas  $\alpha$ , (es decir  $\approx 8.5 \times 10^{-17} a^{-1}$  versus  $1.5 \times 10^{-10} a^{-1}$ ), por lo tanto  $\lambda_T \approx \lambda_\alpha$ .

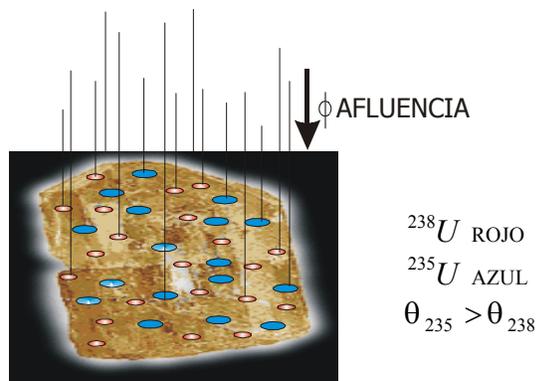
Despejando  $t$  de la ecuación (6) se obtiene:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[ \left( \frac{\lambda_t}{\lambda_f} \right) \left( \frac{N_s}{{}^{238}N} \right) + 1 \right] \quad (8)$$

En principio, para calcular una edad por huella de fisión se determina el número de huellas de fisión espontáneas  $N_s$  y el número de átomos de  ${}^{238}U$ , por unidad de volumen, en la muestra. Para determinar la cantidad de  ${}^{238}N$ , se usa un procedimiento basado en estimar huellas de fisión, irradiando la muestra en un reactor nuclear. La fisión se inducirá en el átomo de  ${}^{235}U$  ya que su sección transversal es mayor que la del  ${}^{238}U$  (Wagner, 1972).

$$Ni = {}^{235}N\sigma\theta \quad (9)$$

Esta ecuación representa así el número huellas inducidas  $Ni$  lo cual gráficamente puede ser observado en la siguiente figura:



**Figura 4:** Proporción de átomos  ${}^{238}U$ ,  ${}^{235}U$  en una muestra y su relación con fluencia de neutrones  $\phi$ .

Donde:

$\sigma$  = Se refiere a la sección transversal de  $^{235}\text{U}$

$\phi$  = La afluencia

$^{235}\text{N}$  = Numero átomos  $^{235}\text{U}$

Salvo algunas situaciones raras la abundancia relativa de los isótopos de uranio, son prácticamente iguales en la naturaleza y la relación  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  se asume constante, es decir:

$$I = \frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}}$$

Así la ecuación (9) quedaría como:

$$N_i = ^{238}\text{NI}\sigma\theta \quad (10)$$

Combinando la ecuación (9) y (10) finalmente, tenemos:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[ \left( \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \right) \left( \frac{N_s}{N_i} \right) I\sigma\theta + 1 \right] \quad (11)$$

La ecuación antes señalada, es la fundamental para calcular las edades por el método de huella de fisión o ecuación de Fleischer, Price y Wagner (1972).

Sin embargo, en la práctica es necesario contar las huellas espontáneas  $N_s$  y las huellas inducidas  $N_i$ , por lo que se transforma la muestra en una sección fina, siguiendo el procedimiento que se explicará en el tercer capítulo. Por lo tanto, es necesario utilizar la relación teórica existente entre las densidades superficiales de las huellas y las densidades volumétricas, como siguen (Wagner):

Las densidades de las huellas están expresadas, por:

$$\rho_s = g_s N_s R_s \eta_s f(t)_s q_s \quad (12 \text{ a})$$

$$\rho_i = g_i N_i R_i \eta_i f(t)_i q_i \quad (12 \text{ b})$$

Estas ecuaciones representan respectivamente:

$g_{s,i}$  = El factor de geometría

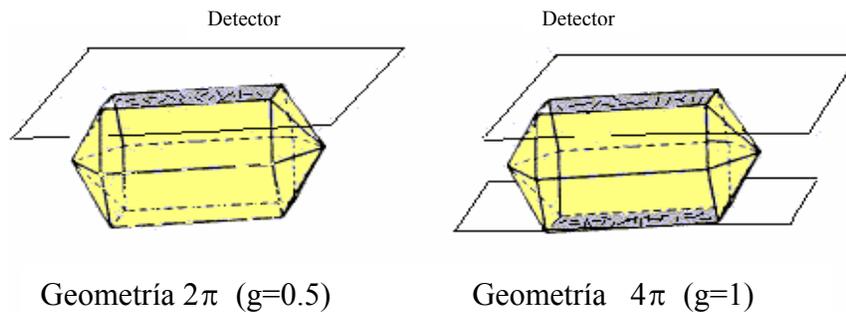
$R_{s,i}$  = La longitud de la huella

$\eta_{s,i}$  = El factor de grabado

$f(t)_{s,i}$  = El factor de tiempo de grabado

$q_{s,i}$  = El factor de observación

El factor de geometría  $G$ , se refiere a la forma como se coloca un detector, el cual tiene por definición dos valores dependiendo de la posición del detector, es decir, un valor de  $2\pi$  y  $4\pi$  (ver figura 5). Luego se envía al reactor para poder contar las huellas inducidas ( $N_i$ ). Este procedimiento se encuentra dentro de la técnica del detector externo (TDE) el cual será explicado en las siguientes secciones.



**Figura 5:** Posición del detector según la geometría

La constante  $g$  tiene un valor igual a 1 cuando la muestra queda entre dos detectores (superficie interna) llamada geometría  $4\pi$  y para la superficie externa tiene un valor

de  $g$  igual a 0.5, cuando la mica es colocada sobre la superficie externa, como se muestra en la figura 5 de la derecha. En el mismo material, si el grabado de las huellas espontáneas e inducidas es prácticamente igual, el valor del factor de observación  $q$  vale uno (01). (Wagner, 1972)

El rango  $R_{s,i}$  es el tamaño o la longitud de la huella  $n_s = n_i$ .

El factor de grabado  $\eta_{s,i}$  consiste en sumergir la sección fina en ácidos (como el  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{FCO}_3$ ,  $\text{HCL}$ ) durante cierto tiempo el cual es llamado *factor de tiempo de grabado*  $f(t)_{s,i}$ .

El factor de tiempo de grabado  $f(t)_{s,i}$  depende de eficiencia como es revelada la huella, si este tiempo es muy grande se borra la huella y si es muy corto no se revelará completamente, como se puede apreciar en la siguiente figura:



**Figura 6:** Revelado de una huella

El valor del factor observación  $q_{s,i}$  dependerá de la persona que cuente las huellas y la distancia intraocular de la misma, ya que esta constante es propia de cada individuo.

Los valores de  $\eta$ ,  $f(t)$  y  $g$ , dependen de las técnicas que se usen para el revelado y la observación de las huellas espontáneas e inducidas, las cuales se estudiarán más adelante.

Así, despejando  $N_s$  y  $N_i$ , respectivamente de **(12 a)** y **(12 b)**, y sustituyéndola luego en la ecuación **(11)**, Tenemos:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[ \left( \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \right) \left( \frac{\frac{\rho_s}{g_s R_s \eta_s f(t)_s q_s}}{\frac{\rho_i}{g_i R_i \eta_i f(t)_i q_i}} \right) I \sigma \theta + 1 \right]$$

de donde:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[ \left( \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \right) \left( \frac{g_i R_i \eta_i f(t)_i q_i \rho_s}{g_s R_s \eta_s f(t)_s q_s \rho_s} \right) \right]$$

ahora, llamando:

$$G = \frac{g_i}{g_s}$$

$$y \quad Q = \frac{\eta_i f(t)_i q_i}{\eta_s f(t)_s q_s}$$

obtenemos:

$$t = \frac{1}{\lambda_f} \ln \left[ \left( \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \right) \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right) G Q I \sigma \theta + 1 \right] \quad \text{(13) } \text{Ecuación práctica MHF}$$

Donde  $Q$  es el factor de procedimiento, en esta investigación se consideran las mismas condiciones de preparación idénticas tanto para las huellas espontaneas como para las inducidas  $Q = 1$  y  $G = 0.5$ , lo cual indica que se usa la Técnica del Detector Externo. Finalmente, obtenemos la ecuación práctica para determinar edades, para el método de huellas de fisión. En la práctica la afluencia varía con la muestra, por tal razón, la ecuación (13) es una expresión con dos incógnitas  $t$  y  $\theta$ , por lo que es necesario, usar un método que de una aproximación para determinar la afluencia, esto se conoce como factor  $Z$ .

### 1.3.- Aproximación de la edad estándar o método de calibración $Z$ :

Hurford en 1983, estableció el método de aproximación a la edad estándar, el cual consiste en dos pasos:

- 1) Irradiar muestra de edades conocidas por otros métodos de datación como por ejemplo Potasio-Argón, Rubidio-Estroncio, Torio 230, U/Pb, llamadas también muestras estándar por Wagner (1982) repetidamente y analizadas junto con un monitor o detector de bajo contenido de uranio, con la finalidad de determinar la afluencia  $\phi$ .
- 2) Luego, este valor se emplea para calcular la edad de la muestra a datar.

Matemáticamente considerando el factor  $Z$  como:

$$Z = \frac{QIB\sigma}{\lambda f}$$

Se tiene una ecuación para la muestra de edad conocida.

$$t_c = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[ \lambda_\alpha \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_c GZ + 1 \right] \quad (14)$$

Como la mica utilizada es de bajo contenido de uranio, la afluencia es proporcional a la densidad del monitor  $\rho_m$  (Wagner, 1982).

$$\phi = B\rho_m$$

Donde:

$\rho_m$  = Densidad del monitor

$B$  = Constante de proporcionalidad

$\phi$  = Afluencia

Despejando de la ecuación (14) de edad para muestra estándar conocida el valor de  $Z$ , se obtiene:

$$Z = \frac{e^{\lambda_\alpha t_c} - 1}{\lambda_\alpha \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_c G\rho_m} = QI \frac{\theta B}{\lambda_f} \quad (15)$$

En la práctica el valor de  $Z$ , es personal ya que depende de muchas constantes.

Retomando la ecuación (15) y sustituyendo este valor de en la ecuación de la muestra desconocida, se obtiene la siguiente expresión:

$$t_d = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[ \lambda_\alpha \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_d \rho_m GZ + 1 \right] \quad (16) \quad \left. \begin{array}{l} \text{Ecuación práctica para determinar edades} \\ \text{por el MHF.} \end{array} \right\}$$

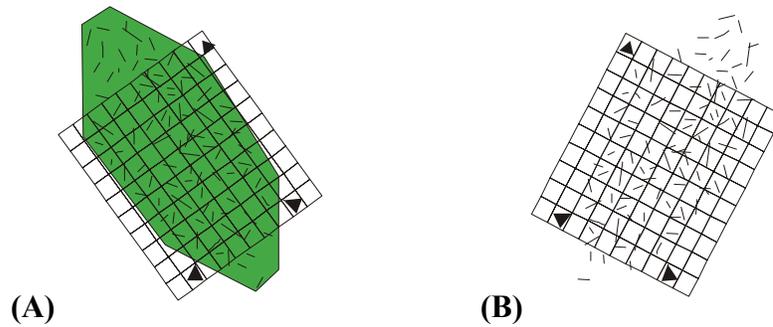
Donde  $\rho_m$  es la densidad del monitor o detector,  $\rho_s$  y  $\rho_i$  se calculan de la siguiente manera:

Densidades de huellas espontáneas e inducidas en el j-eximo grado.

$$\rho_s = \frac{\sum_{j=1}^n N_{sj}}{A_j} \quad (17 \text{ a})$$

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^n N_{ij}}{A_j} \quad (17 \text{ b})$$

donde  $A_j$  es el área para el j-esimo grano



**Figura 7:** Cuadrícula para contar el área total.  
Tomado de: John Garver (2001)

En ambos casos el área total  $A_j$  se toma de la cuadrícula que mide 10x10, la cual es usada como referencia en la práctica.

Para determinar las densidades de las huellas espontáneas  $\rho_s$  y las huellas inducidas  $\rho_i$  se utilizan dos métodos diferentes, los cuales serán explicados próximamente:

#### **1.4.- Método de Poblaciones:**

*Fundamentos:*

En el método de las poblaciones, se supone que la muestra tiene una distribución uniforme del uranio y una misma concentración, por lo cual se toma la muestra y se dividen en dos grupos o porciones uno que será irradiado para determinar las huellas inducidas y el segundo grupo no se irradiará y sus huellas espontáneas, serán contadas sobre su superficie. La densidad del grupo irradiado es sustraída de aquel grupo no irradiado para así determinar la densidad de las huellas inducidas, este método introduce errores a la hora de contar las huellas, además este método no sirve para los apatitos detríticos, que derivan de varias rocas con distintas concentraciones del uranio. (Khan y Ahmad, 1975).

Debido a que la cantidad de uranio varía en las dos porciones de forma muy grande, ya que no hay homogeneidad en la concentración del mismo, la estimación de la edad no es confiable, por lo cual esta técnica no será utilizada en este trabajo.

#### **1.5.- Método Grano a Grano:**

*Fundamentos:*

Este método consiste en que las huellas espontáneas e inducidas son analizadas en el mismo grano. La relación  $\rho_s / \rho_i$  para calcular la edad de la huella de fisión, puede así ser determinada para todos los granos. El método grano a grano, es el único que puede ser aplicado cuando las muestras presentan heterogeneidad de uranio entre los granos o cuando está compuestas de granos de edades diferentes (Wagner, 1982).

El método grano a grano se divide en tres grandes técnicas las cuales se explican a continuación:

### **1.5.1.- Técnica del Regrado:**

Consiste en revelar los granos para determinar  $\rho_s$  luego la muestra es irradiada en el reactor, se revela y se cuentan el total de huellas. Para calcular  $\rho_i$  se sustrae las densidades totales de las densidades de las huellas espontáneas como sigue:

$$\rho_i = \rho_T - \rho_s \quad (18)$$

Esta metodología es conocida como el método de sustracción (Wagner, 1992).

El problema de usar esta técnica es que las condiciones de revelado no son idénticas es decir,  $Q \neq 1$  lo que contradice la hipótesis del trabajo.

### **1.5.2.- Técnica de Repulido:**

Se determina  $\rho_s$  inicialmente, luego se pule la muestra, se irradia y se obtiene  $\rho_i$ , puede ser que  $\rho_s$  en el proceso no sean eliminadas totalmente con la pulitura, por lo que la irradiación no da exactamente  $\rho_i$  sino  $\rho_T$  o en su defecto  $\rho_i$  más algunas  $\rho_s$ , como es muy difícil de revisar los valores de  $\rho_s$  no usaremos esta técnica, en este trabajo.

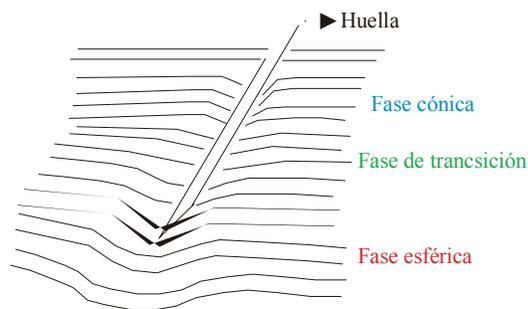
### **1.5.3.- Técnica del Detector Externo:**

Esta técnica consiste en usar un detector externo (generalmente una mica, como la moscovita), también llamado monitor que puede ser un plástico o una lámina delgada de un mineral con muy bajo contenido de uranio, las micas son usadas porque tienen la característica de registrar las huellas de los minerales a ser datados. Las huellas espontáneas e inducidas son reveladas y observadas en diferentes materiales, a través

de una selección cuidadosa de las caras de cristal y aplicando un tiempo de grabación óptimo.

Durante la irradiación este monitor es colocado contra la superficie pulida de los minerales, en los cuales las huellas espontáneas fueron contadas antes de irradiar la muestra. Las huellas de fisión son contadas exactamente en las mismas áreas del mineral y del monitor (replica o detector) que permanecieron en contacto durante la irradiación. (Fleisher *et al*; 1964); (Bigazzi, 1967); (Welin *et al*; 1972); (Gleadow, 1978 y 1981); (Naeser *et al*; 1980), (Watanabe y Suzuk, 1969).

Como se puede observar en la siguiente figura 8, se tienen tres fases de grabados, una primera llamada fase cónica, donde la huella comienza a penetrar por efecto del ácido, la próxima fase es de transición en la cual la huella se encuentra entre ambas fases y se introduce completamente, por ultimo en la fase esférica, la huella toma esa forma y es donde finalmente se origina, por eso su nombre, tan característico.



**Figura 8:** Tiempo de fases de grabados

Mediante esta técnica las inhomogeneidades en la concentración de uranio, las cuales son usuales en los minerales como el apatito y el circón, no presentan ningún inconveniente. En el caso de muestras de rocas sedimentarias, esta técnica permite analizar granos individuales y determinar diferentes fuentes de sedimentos.

Usualmente se cuentan de 20 a 50 o más, si las muestras han sido afectadas por un evento térmico reciente. (Green, 1985).

Las huellas espontáneas, se revelan en el mismo material, para las condiciones antes explicadas, en la figura 8.

La técnica del detector externo combina todas las ventajas de los métodos grano a grano, por el hecho de que las huellas inducidas y las huellas espontáneas son reveladas en monturas separadas y por consiguiente la imagen de los granos en la mica pueden registrar perfectamente las huellas inducidas  $N_i$ , que corresponden a las huellas espontáneas  $N_s$  dado, es decir el par  $(N_s; N_i)$  para así obtener la edad de un grano en particular, obviando así las inhomogeneidades del uranio, por lo cual es el mejor método para datar, hasta la fecha y será utilizado en este trabajo. (Gleadow, 1981).

En esta técnica el cociente  $\frac{\rho_s}{\rho_i}$  de la ecuación de edad **(16)** se calculan sobre la misma área, por lo que de las ecuaciones **(17 a)** y **(17 b)** se deduce así:

$$\frac{\rho_s}{\rho_i} = \frac{\sum_{j=1}^n N_s}{\sum_{j=1}^n N_i}$$

Mas adelante en el capítulo 4, se hará énfasis en la forma de conteo de las huellas.

### **1.6.- Ventajas del método de huellas de fisión:**

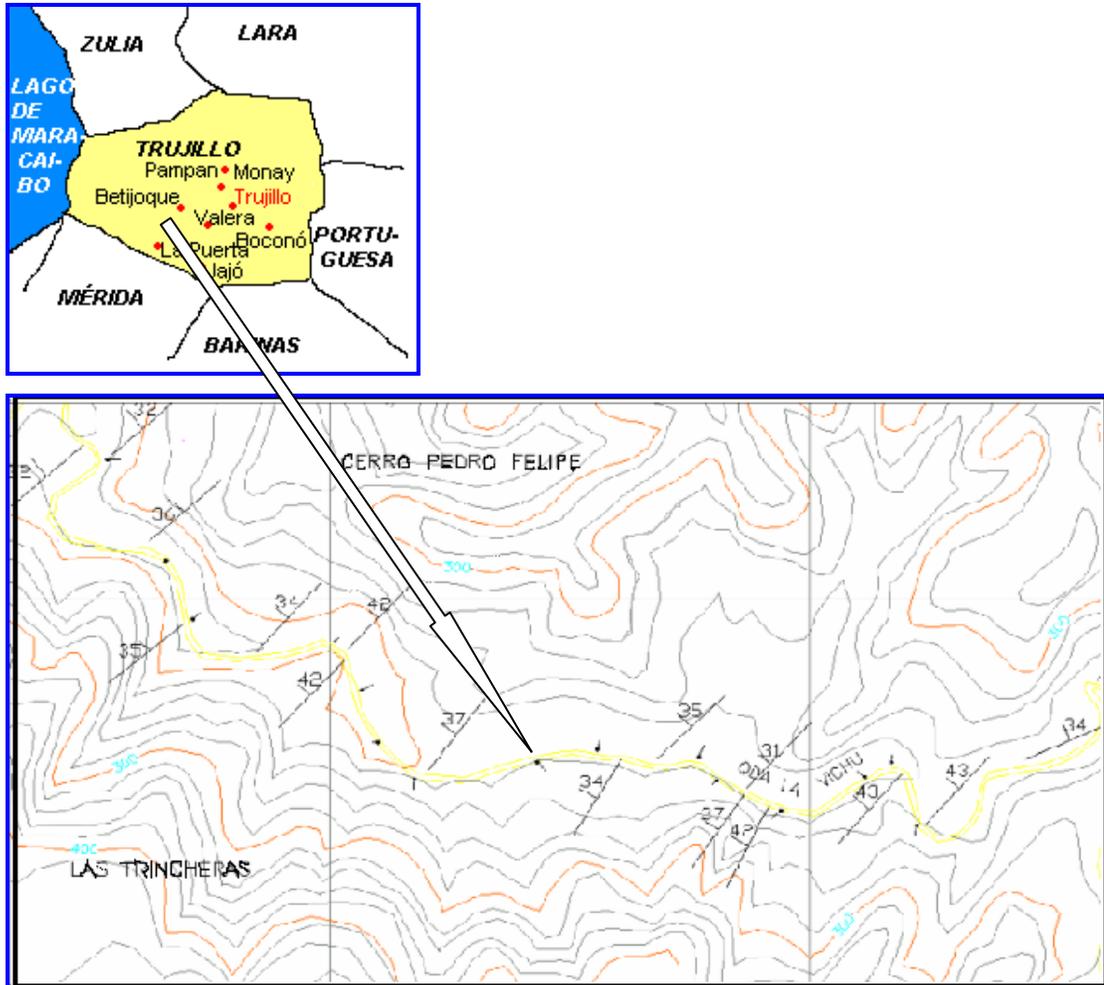
El método tiene diversas aplicaciones desde el cálculo de la edad de un sólo evento, así como el de varios eventos, exhumación de montañas, levantamientos tectónicos, denudación de los continentes y correlación estratigráfica. (Naeser, 1984), así como la historia de enfriamiento de las rocas (Wagner, 1992). Debido a que el apatito tiene una *temperatura de cierre*, cercana a la ventana de petróleo, tiene grandes aplicaciones en la industria petrolera.

Es relativamente económico comparado con los otros métodos isotópicos, por otra parte, no se necesita que el separado de los cristales sea de alta pureza, como es el caso de los otros métodos isotópicos.

## CAPITULON II Geología regional y local

### Introducción

En este capítulo se estudiará la geología regional y la geología local del área de estudio ubicada en la quebrada Vichú, específicamente entre el cerro identificado como Pedro Felipe y la población Las Trincheras, en el estado Trujillo de los Andes Venezolanos como se puede observar en la siguiente Figura 9.



**Figura 9:** Ubicación geográfica de la zona de estudio

Tomado de: <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/trujillo.html>(2002)

## **2.- Geología Regional:**

Este tema tratará, la geología de los Andes de Venezuela, en especial enfocado al estado Trujillo, no se han realizado estudios profundos, de los pocos artículos publicados, la mayoría versan sobre la geología regional del occidente de Venezuela.

### **2.1- Geología Histórica Regional**

El basamento constituido por rocas ígneas y sedimentarias, se presenta muy deformado como consecuencia de una serie de eventos orogénicos: orogénesis Caledoniana y orogénesis Herciniana o Permotriásica. Esta última se caracteriza por ser un evento tecto-termal que origina el metamorfismo, plegamiento andino y el levantamiento del Arco de Mérida, todo esto acompañado por intrusión de cuerpos graníticos y generación de grabens. GARCIA (1980)

La zona positiva representada por el Arco de Mérida estuvo sometida a intensa erosión durante el Triásico y a partir del Jurásico comenzó la depositación de sedimentos *molásicos* de la Formación La Quinta en los flancos de dicho arco, depositados en un ambiente continental. GARCIA (1980)

A mediados y finales del Jurásico una reactivación tectónica dió origen a un nuevo fallamiento y redepositación de las *molásas*. La fuente principal de aporte de material clástico fueron rocas Precámbricas y Paleozoicas localizadas en zonas positivas próximas a los grabens.

A comienzos del Cretácico se produce una transgresión marina de alcances mundiales. Dado que la superficie ocupada por la transgresión debió presentar un relieve irregular, dentro de la masa de agua se deben haber definido zonas de distintas circulación, diferentes aportes y poco intercambio con las aguas adyacentes. La causa de este aislamiento parcial de dos o más cuerpos de agua debió ser,

fundamentalmente, la presencia de altos topográficos que actuaron tanto como elementos positivos, como subpositivos. El aislamiento parcial de estas áreas de sedimentación por dorsales o la presencia de zonas de mayor profundidad (surcos) permiten reconocer tres subcuencas o surcos GARCIA (1980):

- 1) Subcuenca de Lara-Trujillo (Surco de Barquisimeto)
- 2) Subcuenca de Uribante (Surco de Uribante)
- 3) Subcuenca de Machiques (Surco de Machiques)

Estos surcos reciben grandes volúmenes de sedimentos fluviales que constituyen la Formación Río Negro durante el Barremiense, sobre esta sedimentación continental se depositaron los sedimentos marinos representados por las calizas conchíferas del Grupo Cogollo, durante el Aptiense-Albiense al avanzar la transgresión Cretácica.

En el Albiense Medio se depositan areniscas glauconíticas, areniscas laminares, intercalaciones de calizas glauconíticas, arenosas y coquinoideas de la Formación Lisure al sur de Los Andes. Lisure grada lateralmente a la Formación Aguardiente, de la cual es equivalente parcial. En el Albiense Tardío las condiciones de sedimentación se igualaron de manera notable, depositándose la Formación Maraca sobre la plataforma de Maracaibo y Los Andes.

Durante el Cenomaniense, Turoniense y Santoniense, se profundizan los mares Cretácico, depositándose la Formación La Luna en un ambiente anóxico. A partir del Campaniense-Mastrichtiense se estabiliza la cuenca, comenzando la regresión de los mares y depositándose grandes espesores de lutitas marinas, correspondiente a la Formación Colón.

Todo el tectonismo existente hasta principios del Cretácico fue de naturaleza vertical. El tectonismo durante el Cretácico Tardío se manifiesta en el modelaje de las cuencas Terciarias que marcan la regresión marina.

La sedimentación del ciclo Terciario Temprano, comienza a partir de una línea de costa en ambiente de poca profundidad, pudiéndose diferenciar tres provincias sedimentarias durante el Paleoceno: provincia deltáica, provincia de plataforma y provincia de surco turbidítico, clasificados por GONZALEZ DE JUANA (1980).

Durante todo el ciclo Terciario Temprano, el Paleoceno presenta dos ambientes diferentes transicionales entre sí: Uno deltáico-playero, caracterizado por las Formaciones Catatumbo y Barco del Grupo Orocué y otro de plataforma nerítica, representado por la Formación Guasare.

La provincia de plataforma bordea las tierras levantadas del flanco nor-andino al este del Macizo de Avispa. En el borde sur-occidental de Los Andes de Trujillo se encuentran sedimentos de agua someras en los bordes de la plataforma de Barbacoas. Estos depósitos han sido descritos con el nombre de Formación Valle Hondo y Formación Ranchería en la parte occidental de la plataforma de Barbacoas y con el de Formación Humocaró en el borde oriental de la misma. La provincia de surco turbidíticos ha sido también denominada Provincia Geosinclinal. Al analizar la zona transicional o de bisagra entre esta provincia y la anterior se observa que hay una profundización de los ambientes marinos, que ocasionan la desaparición de la Formación Guasare y la depositación de turbiditas de la Formación Trujillo.

Durante el Eoceno Temprano continúa la regresión y la progradación deltáica avanza en forma tal que sobrepasa la primitiva zona de bisagra y desaparece la sedimentación de calizas de plataforma. Las provincias que se pueden definir en el Eoceno Temprano son: provincia de surco, provincia fluvial, provincia deltáica baja y plataforma de Barbacoas.

La provincia deltáica baja ocupa la mayor parte del lago de Maracaibo hasta llegar a la zona de bisagra, al este de la cual pasa transicionalmente a la Formación Trujillo.

La Formación Misoa constituirá una parte de un enorme complejo fluvio-deltáico, con una fuente de sedimentos al sur o al suroeste. La sedimentación de la Formación Valle Hondo continuó durante el Eoceno Temprano, en los contrafuertes Andinos entre Chejendé y casa de Zinc, estado Trujillo, en la Plataforma de Barbacoas.

Las primeras manifestaciones tectónicas Terciarias ocurren a fines del Paleoceno y durante el Eoceno Temprano. Las mismas tienen características compresivas a lo largo de las fosas estructurales Jurásicas.

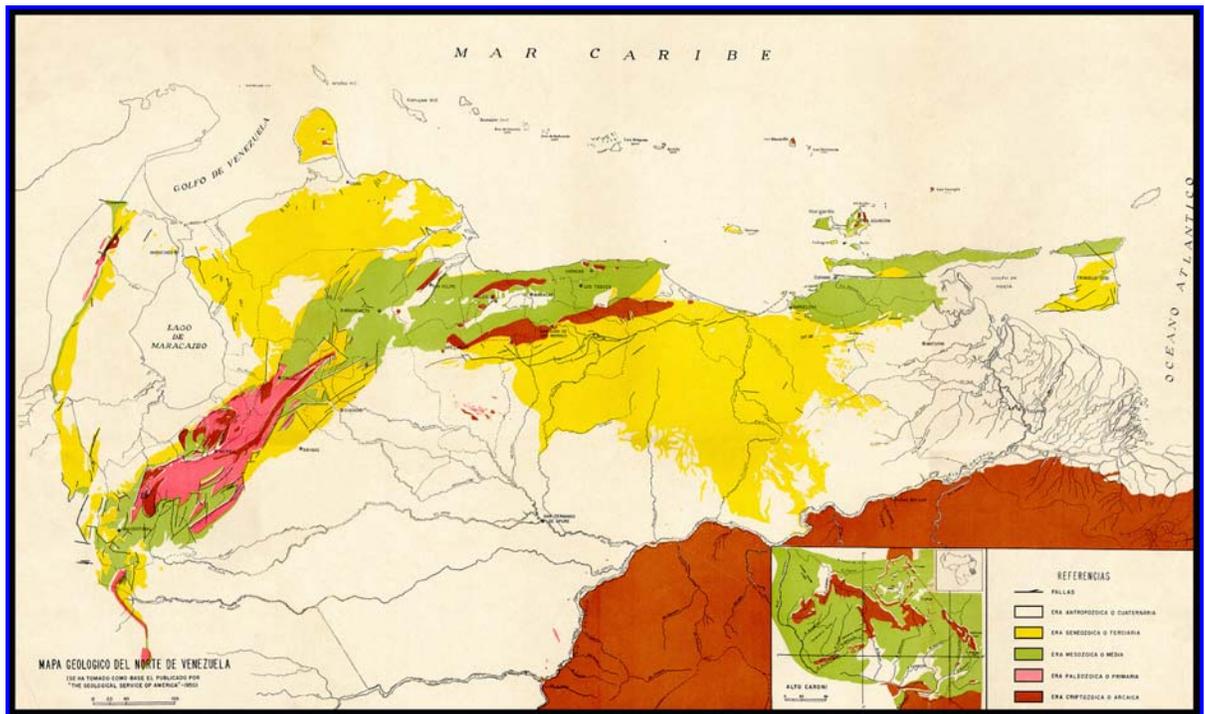
En el Eoceno Medio inicial existe una notable subsidencia, de ambientes que anteriormente correspondían al nivel del mar o las zonas positivas; mientras que, en los surcos pudo haber continuado la sedimentación "flysh", en las cuencas no disturbadas por diastrofismo y/o cierre progresivo. Esta transgresión sobre la provincia deltáica en la región estudiada, se evidencia por la sedimentación de un intervalo predominantemente lutítico, con abundante microfauna indicativa de ambientes de mayor profundidad y francamente marinos de la Formación Paují.

En la plataforma de Barbacoas durante el Eoceno Medio inicial continúa la sedimentación de la Formación Valle Hondo. Durante el Eoceno Medio Mioceno ocurre una orogenia regional la cual está representada por la no depositación del Oligoceno.

El mayor proceso en el levantamiento de los Andes, se hizo sentir en el Mioceno-Plioceno (depositación de *secuencias molásicas*.) y reciente, evidenciado por la formación de sucesivas terrazas aluvionales.

## 2.2.- Marco Estructural de Venezuela Occidental

Los Andes Venezolanos, comienzan al suroeste de la depresión de Táchira y termina al noroeste en la depresión de Barquisimeto. BUCHER (1952), establece que los Andes Venezolanos son producto de un levantamiento distorsionado, resultado de una deformación de dirección N-S del núcleo Paleozoico por orogénesis posteriores, particularmente por las fallas de Boconó, Valera, y sus sistemas de fallas complementarias. El marco estructural de Venezuela occidental, se puede observa en la siguiente Figura 9:



**Figura 10:** Mapa geológico estructural de Venezuela occidental  
Tomado de : <http://www.pdvsa.com/lexico/mapas/mapa-7.gif> (2002)

## **Generalidades**

En la región aflora rocas cuyas edades se extienden desde el Pre-Cámbrico Superior al Cuaternario, que afloran en zonas distintas y separadas, y en ellas se distinguen dos estilos tectónicos muy diferentes. GARCIA Y CAMPOS (1972)

El primer estilo tectónico actuó hasta el Permo-Triásico con dos períodos principales de deformación (Pre-Cámbrico Superior y Permo-Triásico) y posiblemente otro más restringido durante el Silúrico Superior-Devónico. La deformación de fines del Pre-Cámbrico, se caracterizó por la influencia de movimientos de compresión y por el metamorfismo regional al grado de la facies anfibolita-almandina en las rocas del Grupo Iglesias. Durante el Paleozoico Medio (Devónico), hubo emplazamiento de granitos (evento tecto-termal correspondiente a la Orogénesis Caledoniana), representado por el hiatus Devónico-Carbonífero Inferior. En el Permo-Triásico ocurre la orogénesis Herciniana con esfuerzos de tipo compresional. En cuanto a la actividad ígnea y metamorfismo regional de las rocas Paleozoicas y Pre-Cámbricas al grado de los esquistos verdes.

El segundo estilo tectónico ocurre después de la orogénesis del Permo-Triásico y hasta nuestros días, prevaleciendo movimientos esencialmente verticales sin evidencias de metamorfismo ni de actividad ígnea, con los siguientes eventos: a fines del Cretáceo Superior se inicia el levantamiento de parte de la región Andina; durante la Orogénesis Andina (finales del Eoceno) se intensifican estos movimientos hasta culminar en el Plioceno. La orogénesis del Mio-Plioceno tiene notable expresión en ambos flancos de la cadena Andina, por el relleno de ambas antefosas y los grandes intervalos de conglomerados gruesos de ambiente continental que aparecen en las Formaciones Betijoque y Río Yuca al noreste y sureste de la culminación Andina.

### 2.3.- Estratigrafía Regional de Venezuela Occidental

La historia estratigráfica de la Formación estudiada, se resumen en la siguiente figura 11, la cual describe las unidades litoestratigráficas de la región de los Andes, donde posteriormente, solo se hará énfasis en la Formación Betijoque.

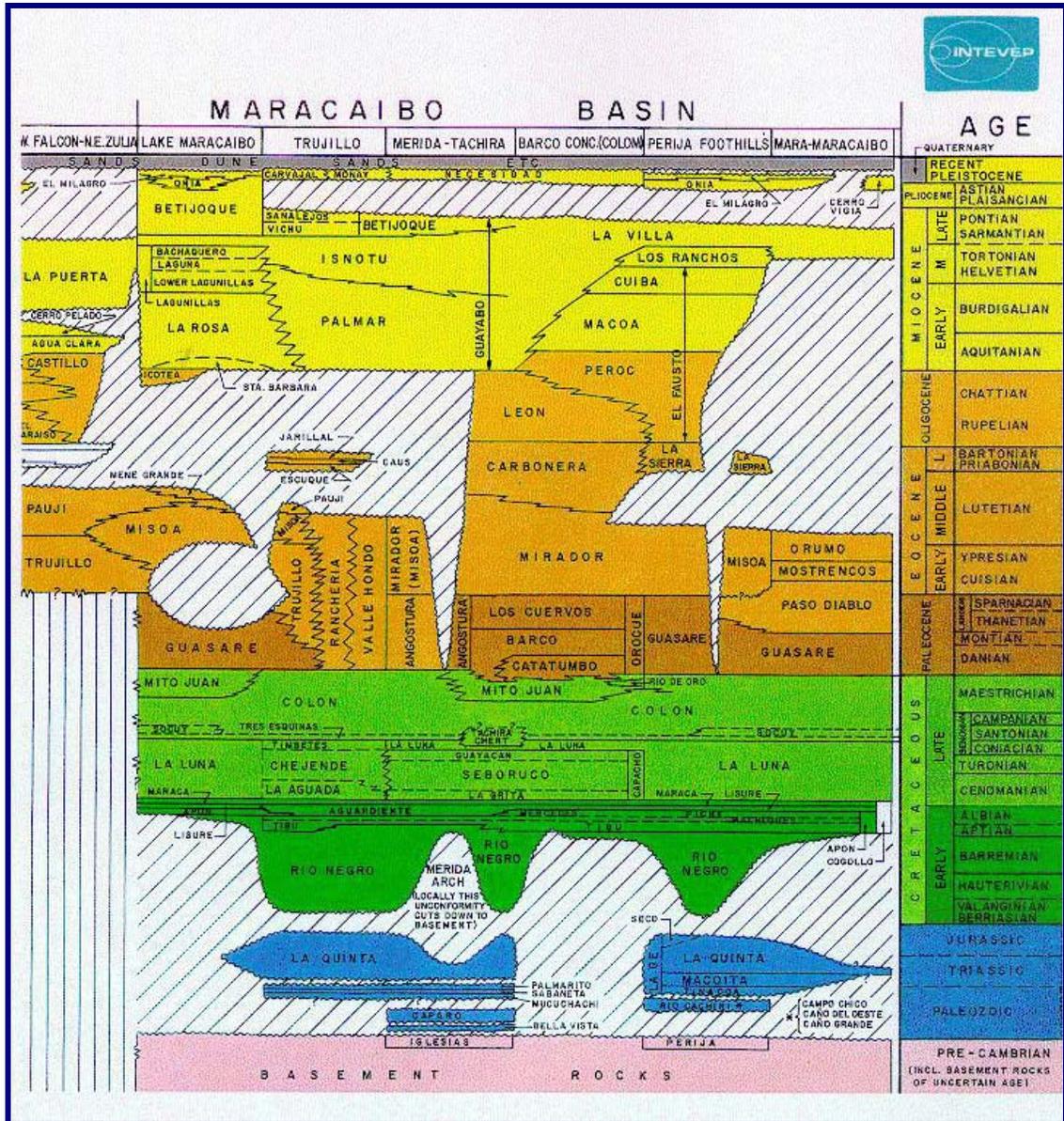


Figura 11: Columna Estratigráfica Generalizada de la Región  
Tomado de: [www.pdvs.com/lexico](http://www.pdvs.com/lexico) (2002)

### **2.3.1.- Formación Betijoque (Mioceno-Plioceno) Estado Trujillo**

Esta Formación se ubica cerca del pueblo de Betijoque en el Estado Trujillo. GARNER (1926), definió esta Formación y especificó "las colinas bajas al oeste del pueblo". LIDDLE (1946), mencionó capas que forman "badlands" al sur del pueblo antes mencionado. La unidad aflora a lo largo del flanco occidental del los Andes, desde Trujillo hasta Táchira.

El sentido de la unidad al de "Grupo Betijoque", se debe a LIDDLE (1946), MENCHER *et al.* (1951, 1953) y YOUNG *et al.* (1954) estableció que abarcaba esencialmente todas las unidades Mio-Pliocenas no marinas, depositadas a lo largo del flanco occidental de Los Andes en proceso de levantamiento. Este término ha sido reemplazado hoy por el de Grupo Guayabo. Sinónimos en desuso de la Formación Betijoque son la Formación Boscán de GARNER (1926), y parte del Grupo Maracaibo de TASH (1937).

La Formación Betijoque es dividida en dos miembros Vichú inferior y San Alejo Superior por FEO CODECIDO (1946).

Según SUTTON (1946), quien describe la litología de la unidad esta constituida por capas macizas de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillas. Los elementos más destacados son capas de conglomerados macizos, de hasta 12 metros de espesor, que forman 25% de la unidad; en la mitad superior los conglomerados son mal escogidos, mal cementados y más gruesos. La mayor parte de la unidad consiste de arcillas macizas de color gris verdoso oscuro que gradan localmente a pardo y negro, generalmente arenosas, y localmente carbonáceas y fosilíferas (restos de plantas). También se presentan areniscas mal cementadas y mal escogidas, y limolitas en estratos delgados a macizas, con mucha intergradación lateral entre los cuatro tipos rocosos.

FEO CODECIDO (1956), describió las Formaciones Vichú y San Alejos como equivalentes de las partes inferior y superior, respectivamente, de la Formación Betijoque de SUTTON (1946). Estos nombres sólo habían aparecido previamente en el cuadro de correlación de MENCHER *et al.* (1951, 1953). La unidad superior se caracteriza por capas muy macizas de conglomerado grueso, prácticamente ausentes en la inferior. El rango Formacional actual de Betijoque que convierte estas dos subdivisiones en Miembros.

En cuanto al ambiente, la Formación Betijoque según GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980); ZAMORA *et al.* (1985); TAHER *et al.*; (1991), se asocia al ambiente de sedimentación de abanicos aluviales y está relacionado con el levantamiento de la cadena andina VARGAS, M (1992).

La Formación Betijoque se caracteriza por presentar secuencias cíclicas de planicies de inundación y canales VARGAS (1992), se considera que el ambiente de sedimentación es un sistema fluvial del tipo de carga mixta de material transportado, propuesto por GALLOWAY & HODBAY (1983).

El espesor de la Formación según SUTTON, tiene un espesor máximo de 4.365 metros para la unidad en la localidad tipo, que corresponde estrechamente a los espesores sumados de los Miembros Vichú y San Alejos, de 2.135 y 2.385 metros, respectivamente. SALVADOR (1961), menciona unos 2.000 metros en el valle de Monay. RAMÍREZ Y CAMPOS (1972, p 522), Señalan un espesor de 650 metros en el estado Táchira. ZAMBRANO *et al.* (1972), sugiere que los 5.000 metros que rellenan la antifosa de los Andes corresponden en gran parte a la Formación Betijoque.

En cuanto al contacto de la Formación Betijoque hacia la base es concordante y transicional por encima de la Formación Isnotú, SUTTON (1946), cuya litología

dominante es de arcillas abigarradas y areniscas blancas. El tope está extensamente truncado, e infrayace con discordancia angular a las gravas de la Formación Carvajal.

En cuanto a los únicos fósiles mencionados son las plantas enumeradas por BERRY (1921) en la localidad tipo: *Blechnum betijoquensis*, *Ficus betijoquensis* y *Entrada boweni* y restos de madera fósil.

La edad de la Formación se basa en correlación regional, apoyada por la determinación de la pequeña flora citada arriba, se considera la edad de la Formación Betijoque como Mioceno Superior a Plioceno.

KUYL *et al.* (1955) aplicaron palinología para correlacionar la parte inferior de la Formación Betijoque con la Formación La Rosa, considerada por ellos como Oligoceno Superior; sin embargo, estos consideraron la unidad como grupo pero en realidad se refieren a la Formación El Palmar.

La correlación de la unidad constituye la parte superior del espeso talud aluvial que flaquea el levantamiento andino, y por lo tanto corresponde estrechamente con la parte superior de la Formación Parángula y la Formación Río Yuca de la cuenca de Barinas, y con la parte superior de la Formación La Villa de la región de Perijá.

Posiblemente la Formación Onia sea equivalente lateral de la parte superior de Betijoque, pero su posición estratigráfica regional no ha sido esclarecida.

### 2.3.1.1.- Miembro Vichú (Mioceno) Estado Trujillo

Según FEO-CODECIDO en el Léxico Estratigráfico de Venezuela (1956), se describe el Miembro como rango Formacional, como subdivisión del Grupo Betijoque. La nueva categoría Formacional de éste convirtió a la Formación Vichú en Miembro, Soc. Venez. Ing. Petró; (1963). El Miembro consiste de unos 2.135 metros de areniscas, arcilitas y ocasionales conglomerados.

La litología del Miembro consiste típicamente en limolitas gris verdosa, frecuentemente intercalada con areniscas pardas de grano fino a grueso (como puede ser observado en la figura 12); hacia el tope del Miembro aparecen conglomerados delgados; toda la secuencia contiene frecuentes perdigones de cuarzo y ocasionalmente restos de madera. Con un espesor medido por Salvador de 2.135 metros en la quebrada Vichú. En cuanto al contacto el Miembro Vichú es concordante y transicional tanto con el Miembro San Alejos suprayacente como con la Formación Isnotú infrayacente. En este Miembro no se encontraron fósiles, por correlación regional se atribuye al Miembro Superior.



*Figura 12: Miembro Vichú, intercalaciones de areniscas y limonitas*

El ambiente de la unidad se depositó bajo condiciones similares a la Formación Isnotú, pero sin los fenómenos de oxidación de esta última; hacia la parte superior se produjeron levantamientos leves que precedieron la etapa de levantamientos pronunciados ocurridos en tiempos del Miembro San Alejos.

### **2.3.1.2.- Miembro San Alejos (Mioceno) Estado Trujillo**

El Miembro se caracteriza por ser fundamentalmente de capas muy macizas de conglomerado grueso, de hasta 12 m de espesor; como puede ser observado en la figura 13, prácticamente ausentes en la subdivisión inferior, además hay intercalaciones de arenisca y limolitas. En cuanto al contacto es concordante y transicional sobre el Miembro Vichú y de discordancia angular por debajo de la Formación Carvajal. No se encontraron fósiles, pero por correlación regional se atribuye al Mioceno Superior-Plioceno.



**Figura 13:** *Miembro San Alejo, intercalaciones de conglomerados con areniscas*

KISER (1989a), siguiendo comentarios de VON DER OSTEN (1951), quien fue el primero en discriminar, basándose en correlaciones de electrofacies, a una parte de "Parángula basal" como un ciclo sedimentario distinto y equivalente a la Formación Carbonera (y Miembro Arauca de la Formación Guafita). El mismo autor (1989-b) trazó el desarrollo de la Formación a lo largo de las cuencas Barinas y Llanos (Apure), notando su equivalencia con el Miembro Guardulio (Formación Guafita) y la "Formación Palmar" (parte basal del Grupo Guayabo).

### **3.- Geología Local:**

El tema a continuación describe el estudio de campo realizado, en los afloramientos a lo largo de la quebrada Vichú, específicamente cerca de la zona conocida como Las Trincheras, Betijoque, Estado Trujillo. El área esta limitada al Norte por el cerro Pedro Felipe, al Sur por las localidades las Trincheras y Betijoque. Tiene una extensión de 6 *km* aproximadamente en forma lineal. (Ver mapa anexo).

#### **3.1.- Marco Geológico:**

Como se puede apreciar en el corte topográfico (anexo), tenemos una unidad que describe un gran homoclinal, cuyas capas tienen una orientación preferencial de N45E aproximadamente y un buzamiento de 37N, lo cual indica el estilo tectónico predominante. En cuanto a las fallas, no se encontraron evidencias locales ya que se trabajo en afloramientos dentro de la quebrada.

#### **3.2.- Estratigrafía Local:**

La unidad describe un Miembro de la Formación Betijoque identificado como Vichú, la cual describen una secuencia sedimentaria de depósitos no marinos, de unos 959

metros de espesor verdadero, estériles en cuanto a fósiles, donde solo se encontró restos de madera y lignito, como puede ser observado en la columna litoestratigráfica anexa, y cuya descripción se resume a continuación:

### **3.2.1.- Miembro Vichú:**

Este Miembro consiste de unos 959.26 metros de espesor verdadero, es decir se basa en un 55% de areniscas, 30% limolitas, un 10% de lutitas, y finalmente un 5% de conglomerado encontrados en pequeños lentes esporádicos. En la siguiente figura 14 se puede apreciar una panorámica de la quebrada Vichú, donde es notorio las capas de color gris verdoso, perteneciente a las limonitas y las capas de color pardo a las areniscas.

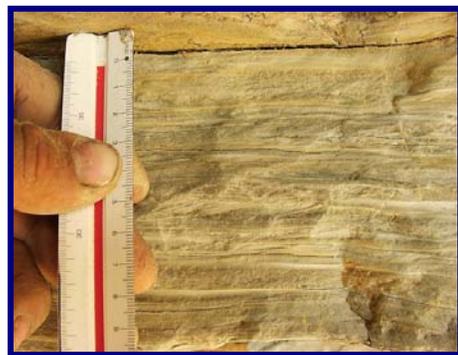


*Figura 14: Miembro Vichú, vista de la quebrada*

Las areniscas en su mayoría presentaba un color meteorizado gris claro a pardas, unas cuantas hacia el medio de la sección eran de color verdes, en cuanto al color fresco variaban de gris oscuro a pardas, los mayores espesores se encontraba hacia el tope unos 20 mts. aproximadamente, luego desaparecieron progresivamente hacia la base. En cuanto al tamaño de grano de las arenisca variaban de medio a grueso hacia el tope y de fino a medio hacia la base de la secuencia; con respecto a las estructuras sedimentarias, las más comunes eran la laminación paralela, como se puede observar en la figura 15, las huellas de carga hacia la base de las arenisca eran comunes y esporádicamente observe laminación fláser, aunque era notorio una gran estratificación fláser en una de las capas de las areniscas, que se situaban al tope del Miembro. La mineralogía que distinguí, con mayor facilidad, estaba constituida por abundante perdigones de cuarzo y micas como las biotitas y las moscovitas, las cuales se acentuaban mucho más, hacia la base de la secuencia. Algunas areniscas presentaban pequeños lentes de conglomerados, como se observa en la figura 16, cuyos clástos variaban de 2 cm los máximo, 0.5 cm el promedio y 0,3 los mínimo. Las areniscas se encontraba en su mayoría intercaladas con limolitas, como se pueden apreciar nuevamente en la Figura 14, estas capas describían una forma tabular a manera general. Hay que destacar que solo se encontró restos de troncos, entre las capas de las areniscas.



**Figura 15:** *Laminación Paralela*



**Figura 16:** *Arenisca con lentes de conglomerados*

Las limolitas presentaba un color meteorizado gris verdoso a manera general, aunque era notorio la presencia de motéaciones de oxido en algunas capas de limolitas, su color fresco variaba de gris oscuro a pardo, se encontraban intercaladas con lutitas, y areniscas, donde hay que destacar que los espesores de las limolitas eran mayores hacia el tope, en comparación con los encontrados hacia la base. En cuanto a las estructuras sedimentarias predominantes, se observo laminación paralela y huellas de cargas tanto en el tope como en la base de las capas; de los fósiles solo se encontraron ocasionalmente restos de lignito. En la siguiente figura 17, se muestra una intercalación de limolitas con arenisca de color pardo y las más oscura son las limonitas que se presentan menos resistentes a la erosión.



*Figura 17: Intercalaciones de Areniscas con limolitas*

Las lutitas poseen un color meteorizado que solo variaba de gris verdoso a pardo claro y un color fresco gris a manera general, los espesores de las lutitas son mayores hacia la base de la secuencia, y donde hay destacar que hacia el tope se encontraban solo en pequeños lentes encontrados en las capas de las areniscas, las estructuras sedimentarias predominante eran las huellas de carga como se observa en la figura 18 la imbricación, producto quizás del flujo de corriente, también era notorio la gran cantidad lignito en su superficie, como se aprecia en la figura 19.



*Figura 18: Huellas de cargas en lutitas*



*Figura 19: Lignito en las lutitas*

### **3.3.- Criterio de utilizado para la selección de muestras, para el método de huellas de fisión son las siguientes:**

- (1) Verificar que no existiese ninguna evidencia de incendios recientes en el área de estudio.
- (2) Se debe tener un espaciamiento entre muestra y muestra de unos 120 m. de espesor verdadero.
- (3) El tamaño de grano del sedimento debe ser arena de grano medio, entre  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{1}{4}$  mm Friedman and Sander (1979).
- (4) A una profundidad de 1 m aproximadamente.
- (5) Muestras lo más frescas posible, sin evidencias de meteorización.
- (6) Preferiblemente se debe tener contacto cercano al nivel del agua.
- (7) Se debe recolectar entre 35 a 45 kilogramos de sedimento.

Las muestras fueron tomadas, al pie de la quebrada Vichú, un total de 32 muestras, de 40 kilogramos, desde la hacienda La Yaguara, ubicada entre E 306.000 a N 1.040.00, hasta la muestra identificada con el N° 101, ubicada entre E 312.900 a N 1.039.500, como puede ser observado en el mapa anexo.

Para este trabajo solo analicé siete (07) muestras, las cuales fueron identificadas como: VI-033, VI-037, VI-090, VI-091, VI-095, VI-097 y VI-101 respectivamente, más (02) dos muestras guías identificadas como B01 ubicada al tope de la secuencia y la muestra B02, ubicada hacia la base; este conjunto de muestras se ubican en el mapa anexo entre las coordenadas E 309.400 a E 311.300N y N 1.041.900 a N 140.500.

Los análisis realizados en el campo se resumen y explican con detalle, en el apéndices 1.

## **CAPITULO III Procesamiento de las Muestras**

### **Introducción**

En este capítulo se describe la metodología en el laboratorio y algunos de los principios de los equipos utilizados, así como también el funcionamiento y los diferentes procedimientos que se deben seguir para la separación del mineral apatito en muestras de sedimentos.

### **4.1.- Fase I: Secado, Tamizado y Separación Gravimétrica**

#### Equipos y materiales

- Bandeja de secado con bombillos de 150 vatios de 110/220 v 60 Hz.
- Tamizadora
- Tamices de mallas N° 200 (sedimentos tamaños de grano menores a 0.074 mm) y malla N° 60 (sedimentos tamaños de grano mayores a 0.25 mm y menores a 0.074 mm) con hélices de metal.
- Base para cambiar las mallas marca Vorti-Siv, modelo H-59915-80.
- Tolva o alimentadora volumétrica, con bandeja de acero inoxidable y depósito de alimentación de 0.3 m<sup>3</sup> de capacidad, modelos RS-TO-3/4, marca Carpio y F-TOC Y CFMC-TOC, marca Syntron.
- Trituradora de rodillo, marca Denver McCool, motor 5 HP.
- Mesa de sacudidas (Wilfley), modelo 561.
- Bata larga o braga de trabajo.
- Mascarilla anti-polvo.
- Usar guantes de goma cuando sea necesario.

- ➔ Se requiere materiales de oficina y de limpieza.
- ➔ Es de gran ayuda, para la limpieza de los equipos, contar abundante agua y aire a presión.

#### **4.1.1.- Mesa de Secado:**

##### Descripción del equipo

Este equipo esta constituido por una base metálica con un armazón de aluminio, con doce (12) bombillos de 150 vatios cada uno, colocados en grupos de seis (6), hacia cada lado y separado a una distancia de medio metro aproximadamente de la base metálica, como se aprecia en la figura 20.



*Figura 20: Mesa de Secado*

##### Instrucciones

Esta mesa garantiza un secado total de las muestra, sin alterar la temperatura del mineral. Consiste en suministrar calor a toda la muestra, la cual se esparce homogéneamente, en capas delgadas sobre la superficie de la mesa, se deja reposar y luego se mueve varias veces, se repite este procedimiento hasta que la muestra este completamente seca y no forme grumos.

#### **4.1.2.- Tolva o alimentadora:**

##### Descripción del equipo

Este equipo está constituido por un contenedor en forma de embudo, donde se coloca la muestra, una rampa por donde baja el sedimento, y un cajetín ubicado en la parte posterior donde se encuentran los controladores para la alimentación (feeder) y para la vibración (vibrator), estos pueden varían entre 0 a 100 vibraciones/seg para ambos controladores; la cantidad de salida del sedimento entre el embudo y la rampa es controlado a través de un tornillo alargado, ubicado en la parte posterior, justo debajo del cajetín. La tolva es mostrada en la figura 21.



*Figura 21: Tolva*

### Instrucciones

La utilidad principal de la tolva es suministrar la cantidad óptima del material de una forma controlada y a conveniencia del usuario. Este equipo se usa tanto para la tamizadora, como para la mesa de sacudidas Wilfley. Es necesario tomar en cuenta el tamaño de grano del sedimento, en nuestro caso, puede variar de arenisca de grano fino a grueso (ver tabla 3.0) ya que podrían pasarse gravas y obstaculizar el paso del sedimento, por lo que se recomienda triturar o deslemar la muestra antes de colocarla en la tolva.

### **4.1.3.-Tamizadora**

#### Descripción del equipo

En este equipo se fija el tamiz, el cual es mostrado en la figura 23, sobre la parte superior, el cual puede variar el número de la malla a utilizar según sea el requerimiento del trabajo. La tamizadora puede trabajar al seco o con agua, consta de una salida para los sedimentos de menor tamaño que la malla utilizada, más otra salida adicional que viene incorporada a la base de este, posee cuatro ganchos de metal con sus respectivas palancas para fijar la base de este con la tamizadora, es importante señalar, que cuando estas palancas se calientan quiere decir que no está lo suficientemente ajustadas. Hacia la parte media de la tamizadora se encuentra el enchufe de encendido, como se aprecia en la figura.22



*Figura 22: Tamizadora*

### Instrucciones

La tamizadora, esta diseñada para separar cualquier cantidad de material, de acuerdo a su tamaño de grano, ejerciendo movimientos continuos a gran velocidad que sacuden el sedimento dejándolo pasar libremente a través de las mallas o en su

defecto reteniéndolo, sobre su superficie, este procedimiento garantiza una separación de la muestra en varios tamaños y donde pueden variar de fino, medio y grueso tal como se muestra en la tabla 3.0.

**Tabla 3.0:** Separación del tamaño de grano, según el tipo de tamiz a utilizar  
 Tabla Adaptada de Twenhofel & Tyler (1941)

Wentworth-Udden	Krumbein	Tipo de Tamiz		Mm	µm
		Serie U.S	Tyler		
Tipo de sedimento	Phi	Nº Malla	Nº Malla		
Guijarros	-2	5	5	3,96	3960
	-1,75	6	6	3,33	3330
Gránulo	-1,5	7	7	2,79	2790
	-1,25	8	8	2,36	2360
	-1	10	9	1,98	1980
	-0,75	12	10	1,65	1650
Arena muy Gruesa	-0,5	14	12	1,4	1400
	-0,25	16	14	1,17	1170
	0	18	16	0,991	991
Arena Gruesa	0,25	20	20	0,833	833
	0,5	25	24	0,701	701
	0,75	30	28	0,598	598
	1	35	32	0,495	495
Arena Mediana	1,25	40	35	0,417	417
	1,5	45	42	0,351	351
	1,75	50	48	0,295	295
	2	60	60	0,246	246
Arena Fina	2,25	70	65	0,208	208
	2,5	80	80	0,175	175
	2,75	100	100	0,147	147
	3	120	115	0,124	124
Arena muy Fina	3,25	140	150	0,104	104
	3,5	170	170	0,088	88
	3,75	200	200	0,074	74
	4	230	250	0,062	62

Para la separación del mineral apatito utilizaremos los tamices Nº 60 (0.25 mm) y Nº 200 (0.074 mm), (ver figura 23 ) los cuales se colocan sobre la superficie de la tamizadora, los sedimentos mayores a los 0.25 mm, se pasaran por la trituradora de disco previamente, para rebajar el tamaño de grano y seguidamente poder pasarlos por el tamiz Nº 60, los sedimentos menores a 0.25 mm se pasaran nuevamente, por la tamizadora utilizando esta vez el tamiz Nº 200; el sedimento comprendido entre

0.074 y 0.25 mm., es decir, entre los tamices malla mayores a 200 y menores a 60, se tomarán para procesar las muestras ya que en este rango se tiene la mayor probabilidad de encontrar el apatito detrítico (Garver, 2000), con respecto a los sedimentos menores a los 0.074 mm se desecharán por ser estos de grano muy fino.



*Figura 23: Tamiz*

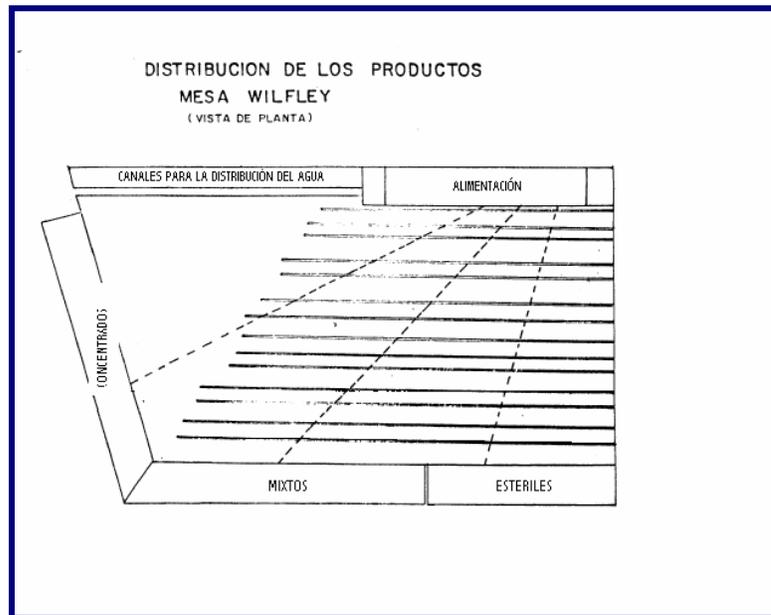
#### **4.1.4.- Mesa de Sacudidas Wilfley**

##### Descripción del equipo

La mesa de sacudida es un aparato de marcha continua. Consiste en un tablero rectangular o romboidal inclinado transversalmente, está constituido por una rampa con una serie de listones o resaltos de plástico paralelos entre sí a la dirección de las

sacudidas, que dejan entre cada dos consecutivos un canal, o cajetín, cuya altura va disminuyendo desde el extremo por donde se acciona el aparato hacia el opuesto, en un solo plano a lo largo del borde superior del tablero existe un distribuidor de agua, con dos salidas: la de la izquierda para el canal de distribución de agua a través de los listones, y la de la derecha para la disolución de los sedimentos (agua de lavado) que provienen de la tolva, como puede ser observado más adelante en la figura 27, Esto garantiza un reparto de los sedimentos con el agua; la intensidad de la corriente transversal del agua debe estar previamente calibrada, aunque la calibración depende del tipo de tamaño de grano de la muestra.

Los sedimentos se recogen en canales paralelos a los bordes de la mesa distribuidos en siete salidas: los tres primeros a la izquierda son los concentrados, los dos del medio los mixtos y en los dos de la derecha, se recogen los estériles, como se puede observar en la siguiente figura 24:



**Figura 24:** Distribución de los Productos en la mesa de sacudida de Wilfley

Hacia la derecha de la mesa encontramos, el motor que controla la longitud de sacudida la cual es medida en revoluciones por minutos (r.p.m) y puede variar para

arenisca de grano medio a grueso, de 3,25 a 4,00 r.p.m controlada por una regleta anexa a la base del motor. La amplitud de sacudida, se mide en milímetros (mm), la cual es controlada por un torniquete giratorio que puede variar entre 6, 8 a 10 mm, hay que destacar que estos parámetros son los requeridos para el tipo de sedimento con que se trabaja en esta Tesis Especial de Grado, la mesa puede ser apreciada en la siguiente figura 25.



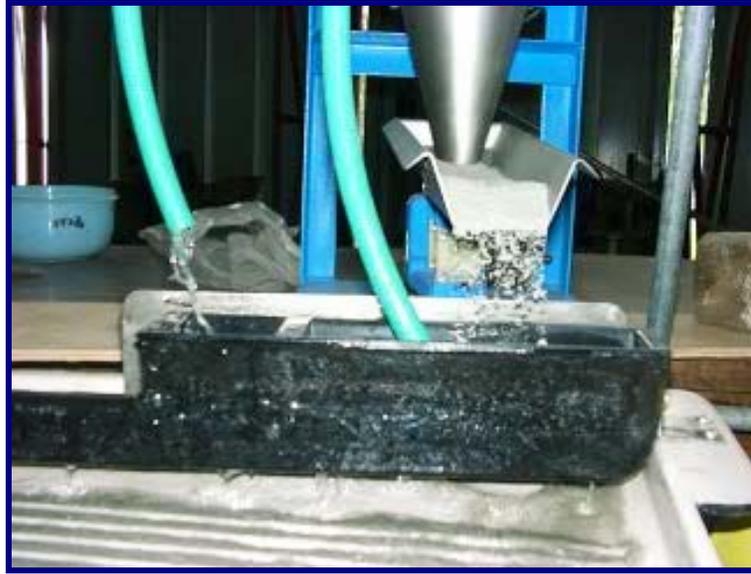
*Figura 25: Mesa de Sacudidas*

### Instrucciones

Este aparato separa eficazmente minerales densos, finos de ligeros a gruesos. El tablero se mueve en dirección longitudinal, alternativamente, en un sentido y en el opuesto gracias a un mecanismo de accionamiento que invierte el movimiento con mayor rapidez al final del avance que del retroceso, como se puede observar en la siguiente figura 26; donde se aprecia claramente tres colores diferentes como consecuencia de la separación por densidad, uno en color negro hacia la parte superior que corresponde a los pesados, luego una franja de color marrón donde se encontraran los mixtos y por último los livianos de color gris.

La inclinación del tablero puede variar, desde 0° (horizontal), hasta 20° y con ello modificar las condiciones en que se efectúa la separación. La alimentación entra en el aparato por la esquina superior derecha, en forma de pulpa, que en volumen tiene aproximadamente un 90% de agua, luego pasa sobre los listones con máxima velocidad y espesor mínimo y deposita en los canales la arena que transporta, debido al cambio de sección y a la velocidad, como pudo ser observado en la figura 26.

Al quedar las partículas del género retenidas en los canales o cajetines se inicia su estratificación, por densidad de tamaño, estratificación que se perfecciona mientras avanzan longitudinalmente. Bajo la acción de las sacudidas las partículas más pequeñas del mineral más denso van descendiendo entre las demás, hasta llegar al tablero, mientras que las partículas más grandes, del mineral menos denso, no pueden penetrar al lecho mineral y quedan encima de este y debido a su situación, en la parte superior, están expuestas a ser arrastradas por el agua de lavado, cuya fuerza se puede controlar variando la pendiente y el gasto. Los mixtos, por su densidad, se reúnen en la parte media del lecho mineral.



*Figura 27: Distribución del Agua*

La estratificación facilita la separación, mientras avanza el sedimento por los canales. Las partículas densas que han llegado al tablero están oprimidas contra él peso de las situadas encima, es decir, con la fuerza superior al propio peso, (ver figura 26). Debido a ello son las que más avanzan en la dirección de las sacudidas y acompañan al movimiento del tablero, quedando por encima el sedimento fino el cual se desplaza longitudinalmente por el mecanismo, resbalando y cayendo libres al retroceder; estas partículas situadas sobre el sedimento denso serán más sueltas y se moverán también por efecto del agua de lavado (ver figura 27) pero las más pesadas avanzarán más despacio porque se desplazan menos. Como los listones decrecen en altura, longitudinalmente, llega un momento en que las partículas que forman la capa superior se encuentran en su avance con que no están protegidas por el listón inferior del canal donde se desplazan, y son barridas por el agua de lavado, pasando al canal o cajetín inmediato inferior. Esto se repite, de un cajetín a otro, hasta que las partículas densas abandonan el tablero por el borde inferior.

La distancia longitudinal, desde el lado de la alimentación, hace que una partícula determinada abandone el tablero varía con el tiempo que tarde en descender, es decir, en recorrer transversalmente la mesa, y por ello se produce en estos aparatos una

distribución del género en abanico, según las densidades, pues las partículas más ligeras llegarán antes al borde inferior. Las bandas que se forman de concentrados, mixtos y estériles serán tanto más anchas cuanto menos inclinado esté el tablero, menor sea la cantidad de agua de lavado y más larga la carrera.

Por lo antes expuesto, conviene que el espesor de pulpa en los cajetines sea pequeño, a fin de que los mixtos y estériles se muevan sin dificultad y pueden ascender a los estratos superiores y que el recorrido del género sea suficientemente largo, para obtener una buena estratificación antes de que actúe el agua de lavado.

El movimiento alternativo del tablero no es uniforme y la longitud y energía de su recorrido se puede variar entre amplios límites. Hacia delante la aceleración debe ser suave, para que no se pierda la adherencia de la partícula, y el tablero le comunique la energía necesaria. En cambio, el retroceso debe ser brusco, retirando el tablero hacia atrás con rapidez, para que las partículas continúen hacia adelante por inercia, resbalando, hasta consumir su energía cinética. Cuanto más finas las partículas en las alimentación, más corto debe ser el recorrido del tablero y mayor el número de sacudidas por minutos. Cuanto más lentamente descienda la partícula sobre el tablero, en el sentido de su pendiente, mayor será en la descarga lo que se ha desplazado longitudinalmente, como consecuencia de las sacudidas.

#### **4.2.- Fase 2: Separación por densidades y separación magnética (Laboratorio de Termocronología)**

##### Equipos y materiales

- Campana para extracción de gases.
- Separador magnético Frantz Lb 1
- Ultra sónico, modelo 57 X, 43-47 KHz
- Horno Fisher Isotemp, modelo 725F y 725G (pequeño)

- Balanza
- Imán de mano
- Balón
- Mascarilla para gases doble filtros
- Bata manga larga
- Papel de filtro N° 8 y N° 10
- Vasos precipitados de 60 ml y 40 ml
- Embudos (preferiblemente, sin la parte posterior)
- Servilletas de papel adsorbentes
- Guantes
- Removedores de vidrio
- Espátulas de metal
- Oxalato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ )
- Alcohol ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ )
- Acetona ( $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ )
- Agua destilada ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- Bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ )
- Diodo metano ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ )
- Benzil benzoato ( $\text{C}_{14}\text{H}_{12}\text{O}_2$ )
- Cápsulas de vidrios de 3.23, 3.22, 3.10 y 3.09 de densidad

#### **4.2.1.-Separación por medio denso (Bromoformo)**

##### Descripción del equipo

El equipo para la separación de los minerales pesados consta de varios elementos, constituido básicamente por dos campanas para la extracción de los gases, diversos materiales y productos químicos, estos van a depender del método utilizado para la separación de los minerales pesados, los cuales serán descritos posteriormente.

Según Feo-Codecido (1960), a los Minerales Pesados “Se le aplica este término a los minerales accesorios de las rocas, de abundancia, generalmente menor al 1% que tienen ordinariamente un peso específico mayor que  $2,98 \text{ gr/cm}^3$  que coincide con el peso específico del Bromoformo (líquido pesado más utilizado en la separación gravimétrica de los minerales pesados)”.

Estos son conocidos como:

Halogénicos: Representan las acumulaciones de minerales que derivadas de rocas madres y han sobrevivido a la destrucción por meteorización, abrasión y descomposición o por soluciones entre los estratos.

Autigénicos: Minerales secundarios, que se han formado donde se les encuentra.

#### Utilidad de los Minerales Pesados

- Determinación de la proveniencia, la naturaleza y carácter del área fuente.
- Transporte, es esencialmente útil para el análisis de paleo corrientes.
- Mapeo del patrón de dispersión de sedimentos.
- Delineación de Provincias petrológicas-sedimentarias.
- Adecuada delineación y correlación de las distintas unidades estratigráficas.

La determinación de una asociación distintiva de minerales pesados a través de una unidad estratigráfica es un criterio útil que puede identificar la unidad en cualquier lugar donde esta se encuentre.

- Indicación de la acción del régimen hidráulico y los procesos de depositación.

- Localización de depósitos potencialmente económicos.
- Discriminación de procesos diagenéticos.

Los minerales pesados permiten la identificación y correlación de formaciones y ciclos sedimentarios, origen o fuente de sedimentos, condiciones existentes antes, durante y después de los ciclos sedimentarios.

La presencia de minerales pesados altamente inestables, en depósitos sedimentarios permiten inferir la cercanía de la fuente.

La complejidad de las asociaciones de minerales pesados se incrementa con el decrecimiento de la edad del depósito. Las diferencias en las asociaciones puede ser debida a la naturaleza litológica de la roca origen, o al grado de estabilidad de los minerales que forman la roca.

### Instrucciones

- Se debe colocar las mascarillas anti gases de doble filtro, guantes de gomas y la bata de laboratorio.
- Se encienden las dos campanas y se verifica su buen funcionamiento, antes de comenzar a trabajar.
- En la campana de la derecha, se montara el equipo necesario, para separar los minerales pesados y en la de la izquierda para recuperar el bromoformo.

### Campana de la derecha (Separación de los Minerales Pesados)

- En uno o varios, vaso precipitado de 600 ml, se coloca el bromoformo puro un poco mas de la mitad.

- Luego, se coloca una pequeña cantidad del material en este vaso y se remueve el sedimento hasta que se incorpore totalmente con el bromoformo.
- Se deja reposar hasta que este totalmente separado el sedimento y el bromoformo, luego se recoge la nata (sedimentos colocados en la parte superior) con una espátula de metal, hay que destacar que se siente un poco dura en la superficie. Esta nata, se colocara en un embudo de vidrio, el cual tiene un papel de filtro N° 8, previamente puesto en forma de cono, el cual es colocado en un vaso precipitado; nuevamente se remueve el sedimento y se repite el procedimiento hasta que no se pueda sustraer más nata. Este procedimiento permite separar los minerales de acuerdo a su densidad, donde los mas pesados se irán al fondo y los más livianos quedaran sobre la superficie.
- La nata que se encuentra en el papel de filtro, es limpiada con acetona o alcohol etílico, moviéndolo en forma circular, en este vaso caerá entonces una mezcla de bromoformo con acetona o alcohol, la cual se pasa posteriormente a la recuperación de ácido.
- Una vez que no se observe más nata, se vierte el bromoformo en otro vaso precipitado con un embudo y el papel de filtro N° 8 y se coloca en su frasco original, el sedimento restante, que queda en el fondo del vaso, es el sedimento de nuestro interés, pues allí se encontraran los minerales pesados.
- Luego el sedimento de interés es colocado en un embudo con papel de filtro N° 8 y limpiado con acetona o alcohol etílico, la mezcla de bromoformo y acetona o alcohol se recuperara posteriormente.
- Es importante destacar, que se debe mantener siempre las puertas de la campana cerrada, cuando se este trabajando con el ácido.

- Se limpia todo el equipo con alcohol, abundante agua y jabón neutro.
- Lave todos los papeles de filtros con alcohol y déjelos secando, por un día, para nuevamente poder utilizarlos.

#### Campana de la izquierda (Recuperación del Bromoformo)

- Se colocan varios balones medianos, en su respectiva base y se vierte agua destilada llenándolos hasta su máxima curvatura, luego se mezclará allí una pequeña cantidad del bromoformo con alcohol y luego se tapa, en cada salida se debe poner un vaso presipitado .
- Espere hasta que se aclare el agua, aproximadamente un día, después se abre con mucho cuidado la llave, (a la que previamente se le debe colocar grafito, para maximizar el rocé en la superficie), caerá así el bromoformo, en el vaso de precipitado, tenga cuidado de no dejar pasar agua al abrir la llave del embudo de separación y deje aproximadamente menos de un milímetro de bromoformo en el balón, luego eche el ácido en su frasco original.
- Estos balones, se pueden nuevamente utilizar, hasta que sea necesario.
- Limpie todo los equipos.
- Al terminar antes de quitarse los guantes, límpieselos con alcohol y lave con jabón neutro.
- Apague las campanas y límpielas por dentro.

#### **4.2.2.- Separación Magnética**

Los minerales se pueden separar en base a su orden de susceptibilidad magnética, tomando en cuenta el orden de fuerza magnética, de ello puedo mencionar en forma decreciente los ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos. Los minerales **ferromagnéticos** son aquellos que presentan en su composición química, hierro, níquel cobalto y algunas aleaciones, entre ellos podemos mencionar la ilmenita, magnetita, pirrotita, magnetita, estos minerales son separados fácilmente, con un imán de mano, ya que presentan una magnetización completa y permanente. En los minerales **paramagnéticos** la susceptibilidad magnética es muy pequeña, están compuestas entre otros por silicatos ferromagnesianos como el granate, piroxenos, anfíboles, así como los fosfatos y algunos minerales accesorios, se verán atraídos bajo la influencia de un campo magnético más intenso. La configuración puede ser observada en la figura 29; Por último, los **diamagnéticos** de los cuales todos los minerales poseen este tipo de susceptibilidad, con la salvedad de que en algunos minerales poseen la susceptibilidad paramagnética mayor que en otros, es por esta razón que en algunos minerales los hace alejarse levemente de un campo magnético. Por lo tanto para su separación dependerá de la configuración que se realice en el separador magnético isodinámico Frantz, el cual va a depender de la composición mineralógica de la muestra. Para separar magnéticamente los minerales se siguen dos procesos:

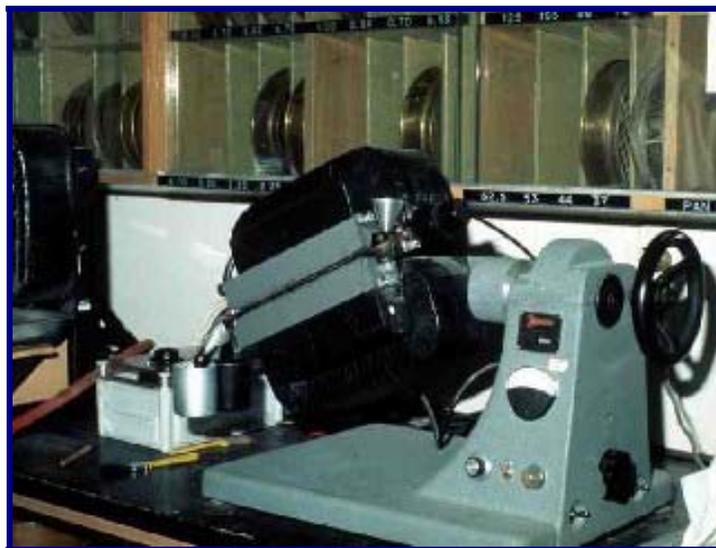
*a) Separación magnética a mano:*

La muestra una vez lavada, seca y libre de material fino es esparcida sobre una superficie de papel lisa y limpia, a esta se le pasara un imán grande, al cual previamente se le coloca una bolsa plástica, que cubra completamente su superficie, este procedimiento se repite varias veces, luego en otra hoja, se quita la bolsa plástica al imán y los minerales magnéticos ferromagnéticos caerán con facilidad, separándolo así del resto del sedimento.

*b) Separación magnética usando el separador Frantz:*

Descripción del equipo

El separador magnético isodinámico Frantz, es un aparato que consta de un riel de aluminio (chute) con dos canales, el primero hacia el usuario para los sedimentos magnéticos y el segundo, el más interno para los no magnéticos, los cuales terminan en dos recolectores de aluminio para cada salida, esta salida está protegida por un protector transparente de plástico; también consta de dos electroimanes y un alimentador (feeder) en forma de embudo. Hacia la base del separador magnético, se encuentra los controladores para la vibración del riel, la vibración de la alimentación y el controlador de la intensidad del campo magnético, así como el amperaje y voltaje. La pendiente frontal es controlada por una manilla ubicada en la derecha y la pendiente lateral por una manilla ubicada en la parte posterior (cuando se coloque una pendiente negativa es hacia el usuario), esto puede ser observado en la siguiente figura 28:

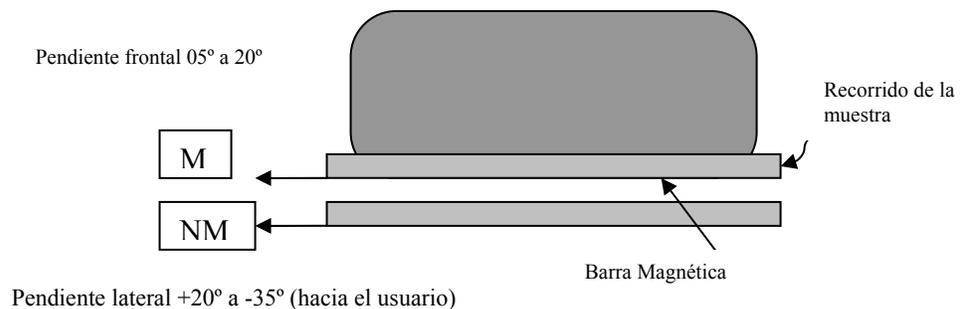


*Figura 28: Separador Magnético Frantz*

Instrucciones

Este equipo está diseñado para obtener de forma isodinámica la separación de minerales magnéticos de los no magnéticos se debe ajustar primero de manera sistemática: se verifica que la muestra este totalmente seca y libre de minerales ferromagnesianos, se coloca una pequeña porción de la muestra en la alimentadora, la cual será abierta poco a poco para que pase el sedimento muy lentamente y baje por la superficie de riel, por efecto de la gravedad y la vibración, las partículas que tienen susceptibilidad paramagnética a un determinado amperaje, mayor que la fuerza de gravedad, serán repulsadas por la barrera magnética, dividiendo el sedimento en dos partes los magnéticos y los no magnéticos, estos caen en los envases de aluminio que posteriormente son recogidos.

La posición del riel depende del tipo de separación que se está persiguiendo. Existe, con el Frantz en funcionamiento una barra magnética invisible vertical, entre los polos del imán, a lo largo de su borde extremo, en la siguiente figura, se muestra la configuración utilizada en este trabajo.



**Figura 29:** Configuración paramagnética

Dependiendo de los ángulos de inclinación y el amperaje puede separarse diversos minerales, tal como se muestra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** *Minerales pesados colocados en grupos de acuerdo a su índice de susceptibilidad magnética*

Tomado de: Hess (1959)

Angulo de Inclinación 20 °				Angulo de Inclinación 5°	
IMAN DE MANO	MAGNETICOS A 0.4 AMP	MAGNETICOS A 0.8 AMP	MAGNETICOS A 1.2 AMP	MAGNETICOS A 1.2 AMP	MAGNETICOS A 1.2 AMP
Magnetita	Ilmenita	Horblenda	Diopsido	Leucoxeno	Circón
Pirotita	Granate	Hipersteno	Tremolita	Apatito	Rutilo
	Olivino	Augita	Estantita	Andalucita	Pirita
	Cromita	Actinolita	Espinela	Monacita	Corindón
	Cloritoides	Estauroлита	Estauroлита		Topacio
		Epidoto	Moscovita		Fluorita
		Biotita	Zoisita		Silimanita
		Clorita	Clinozoisita		Anhidrita
		Turmalina	Turmalina		

#### 4.2.3.- Separador Ultrasónico

Descripción del equipo

Es un aparato en forma de caja, que trabaja con agua en su interior, cuyas longitudes van a depender del modelo y los requerimientos necesarios a trabajar, en nuestro caso utilizamos, el modelo 57X, cuya longitud total mide 385 mm. posee una altura de 230 mm. y un ancho de 279 mm, tiene una abertura central con una longitud de 241 mm. un ancho de 152 mm y una altura de 152 mm. trabaja a una temperatura entre los 5° C a 40° C con una humedad relativa de 80% máximo, en la siguiente figura 30, se muestra el equipo.



*Figura 30: Separador ultrasónico*

### Instrucciones

La principal utilidad de este equipo es el de limpiar y quitar de los minerales parte de las impurezas que se adhieren a ellos, para tal fin se le imparte movimientos vibratorios continuos, lo cual realiza el efecto de limpiar, luego de esta operación que puede ser repetida hasta que aclara el agua dentro del recipiente, se le aplica una pequeña cantidad de oxalato de sodio ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) grado enzima, que terminará de limpiar la muestra.

### **4.2.4.- Secado por el Horno Isotérmico**

### Descripción del equipo

El horno, Fisher Isotemp es un aparato especialmente diseñado para el fácil manejo del usuario, en su interior encontramos dos parrilleras de metal, separadas 20 cm aproximadamente una de la otra, donde son colocadas las muestras, posee una puerta totalmente hermética, la cual no permite el paso del calor. En su exterior tenemos los controladores para la temperatura y el tiempo necesario, para el trabajo realizado, los valores van a depender del tipo de muestra utilizada. Este horno mantiene la misma temperatura a cualquier intervalo de tiempo con un error de 2°C, puede ser observado el la figura 31.



*Figura 31: Horno Isotérmico*

### Instrucciones

El horno esta diseñado para el secado total de las muestras, sin alterar la temperatura de cierre del mineral apatito, se coloca la muestra en un recipiente de cartón o vidrio, se regula la temperatura y se deja hasta que sea necesario.

#### **4.2.5.- Separación con líquidos pesados Benzyl Benzoato y Diodo metano**

### Descripción del equipo

Este procedimiento consiste en separar los minerales pesados usando para tal fin cápsulas de diferentes densidades las cuales son conocidas, entre los siguientes valores: 3.25, 3.22, 3.10 y 3.09 gr/cm<sup>3</sup>

### Instrucciones

El procedimiento consiste en aplicar unas 28 gotas aproximadas de Diodo metano (líquido más denso: 3.32 gr/cm<sup>3</sup>) en un vaso precipitado de 100 ml. el cual contiene cierta cantidad inicial de Benzil Benzoato (densidad: 1.120 gr/cm<sup>3</sup>), las cantidades iniciales dependen del volumen a preparar y para esto se utilizan las tablas de mezcla de densidades existentes en el Laboratorio de Termocronología. Posteriormente se introducen las dos cápsulas de 3.22 y 3.25 gr/cm<sup>3</sup> hasta alcanzar los 60 ml, cuando las cápsulas estén lo más verticales posibles, lo cual indica que se ha alcanzado un grado intermedio de densidades, finalmente las cápsulas son retiradas con mucho cuidado, este líquido es colocado en los embudos.

Es importante destacar que, para cada muestra se debe utilizar diferentes removedores

### **4.3.- Fase 3: Selección de Apatitos, Montaje y Pulido**

#### Materiales y Equipos

- Lupa de 8X, 10X, 30X yz 50X con luz reflejada
- Pincel de un pelo
- Horno
- 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
- Cocina “Hotplate”
- Termómetro digital
- Pulidora Buehler de frecuencia constante
- 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

#### **4.3.1.- Selección de Apatitos en las muestras de sedimentos**

##### Descripción del equipo

La lupa se coloca en el objetivo de 10 X a la cual se le acerca una lámpara con luz reflejada para poder visualizar al mineral, que se pondrá luego sobre una superficie preferiblemente de vidrio.

##### Instrucciones:

Se monta sobre la platina de la lupa, un recipiente de vidrio, en ella se colocan unos poco miligramos del sedimento, el cual es esparcido sobre la superficie de este, y con la ayuda del pincel se recolectan o pescan los apatitos, los cuales son colocados en cilindro de vidrio (previamente rotulado) teniendo mucho cuidado de que no se caiga el mineral, para tal fin se debe tomar como referencia las propiedades ópticas del mineral, las cuales se resumen en las siguientes tablas:

**Tabla 3.2:** Escala ópticas del Apatito

<b>Color</b>	Normalmente incoloro, a veces coloreado.
<b>Pleocroismo</b>	Normalmente nulo, presente en variedades coloreadas
<b>Relieve</b>	Positivo moderado
<b>Habito</b>	Prismático, Hexagonal
<b>Exfoliación</b>	Basal imperfecta.
<b>Birrefringencia</b>	Baja
<b>Angulo de extinción</b>	0°
<b>Elongación</b>	Negativa
<b>Maclas</b>	No
<b>Grupo óptico</b>	Uniaxico negativo
<b>Inclusiones</b>	Paralelas al eje mayor del prisma

**Tabla 3.3:** Escala de Refringencia ópticas para minerales pesados  
Tomada de <http://edafologia.ugr.es/arefin/escalas.htm>

<b>Escala de Refringencia</b>	
Negativo moderado	< 1,45
Negativo bajo	1,45 - 1,54
Neutro	1,54
Positivo bajo	1,54 - 1,60
Positivo moderado	1,60 - 1,70
Positivo alto	1,70 - 1,80
Positivo muy alto	1,80 - 2,00
Positivo extremo	> 2,00

**Tabla 3.4:** Escala de Birrefringencia ópticas para minerales pesados  
Tomada de <http://edafologia.ugr.es/arefin/escalas.htm>

<b>Escala de Birrefringencia</b>	
Baja	0,000 - 0,009
Moderada	0,009 - 0,019
Fuerte	0,019 - 0,036
Muy fuerte	0,036 - 0,055
Extrema	> 0,055

#### **4.3.2.- Preparación de la sección fina (pastilla)**

##### Descripción

Esta etapa tiene como finalidad preparar la sección fina de los apatitos que posteriormente será pulida, y preparada según la técnica del detector externo.

##### Instrucciones

Para montar los apatitos en una sección fina con base epoxy, se realiza los siguientes pasos:

- Precaliente la cocina “hotplate” a una temperatura constante de 40°C utilizando el controlador de temperaturas.
- Mezcle previamente una pequeña cantidad de resina Epoxicure (EPOXIDE), con el endurecedor Epoxide en una proporción 5:1, sobre un recipiente de aluminio. Esta resina tiene la propiedad de no oscurecerse y no reaccionar en el momento de la irradiación el reactor.
- Utilice las micropipetas plásticas desechables para mezclar las resinas.
- Aplique una pequeña capa de vaselina o aceite natural en el lado interno de la arandela

- Coloque un portaobjeto de acetato sobre la cocina “hotplate”, esparza una pequeña cantidad de resina preparada de forma homogénea sobre el portaobjeto y coloque la arandela de PVC al final.
- Aplique silicona en el borde de la arandela, específicamente en el contacto entre la lámina de acetato y la arandela.
- Esparza los granos de apatito uniformemente de manera que no queden montados, esto se hace sobre la lupa a 4X.
- Deje secar al menos durante 10 minutos, de manera que los apatitos se fijen al portaobjeto.
- Prepare otra cantidad de resina y agréguelo a la arandela usando las micropipetas plásticas desechables hasta que este completamente llena.
- Coloque en el horno isotérmico a una temperatura de 35 °C por una semana aproximadamente.
- A la semana siguiente saque del horno y retire la lámina de acetato, ya esta listo para pulir.

En la figura 32 (A) se ilustran los materiales necesarios para el montaje de los apatitos, y en la figura 32 (B) se aprecia la pastilla o sección fina ya culminada.



(A)



(B)

**Figura 32:** Montaje de los apatitos. (A) Materiales a usar para la preparación de las secciones finas. (B) Secciones finas terminadas.

### 4.3.3.- Pulido

#### Descripción

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.

#### Instrucciones

Una vez que los apatitos han sido montados en la pastilla están listos para ser pulidos. Para esto se siguen los siguientes pasos:

- Con una lija de grano 1200 se retira el excedente de resina sobre la arandela, así como esta última.
- Con mucho cuidado y revisando constantemente en la lupa comience a lijar, con la lija grano 1200, cuando este cerca de los granos, deténgase.
- Tome un paño Texmet limpio rocíelo con agua destilada, colóquelo sobre la pulidora y aplique una pequeña cantidad de pasta de diamante de 9 micras, si está muy dura esta pasta es necesario rociarla con el lubricante especialmente diseñado para esta pasta.
- No pase mucho tiempo sobre la pulidora, en intervalos de treinta segundos (30) aproximadamente, revise usando un microscopio con luz reflejada a 30X y 50X el proceso de pulido de la muestra.
- Al llegar a los granos con mucho cuidado siga puliendo hasta que logre la mayor cantidad de superficie de estos.

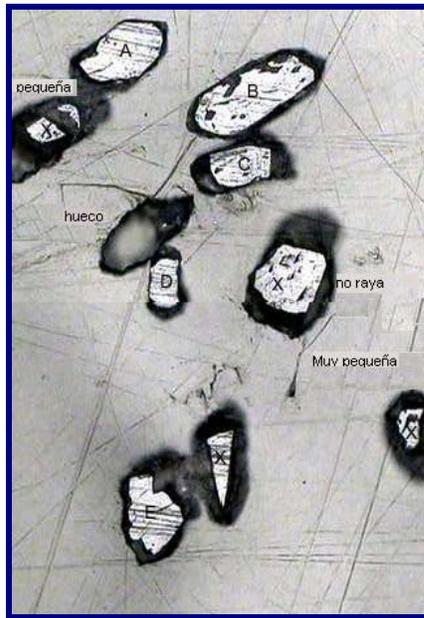
- Inmediatamente retire la muestra de la pulidora, cambie el paño, y aplique la pasta de 1 micra, con la finalidad de eliminar los surcos dejados por los pasos anteriores.
- Luego retire el paño colocado en el paso anterior y cámbielo por otro paño nuevo, aplique la alúmina micropolish de 0.3 micras y pula la sección hasta que los granos se vean como un espejo.
- Limpie la muestra con agua destilada, limpie los paños y pretéjalo del polvo ya que este podría rayar las muestras en el próximo pulido
- Fije las pastillas a unos vidrios portaobjetos, utilizando la resina epoxicare y coloque el número de las muestras con una cuchilla de diamantes en la parte superior derecha del portaobjeto.

En la siguiente figura 33, se aprecia el equipo utilizado para pulir las pastillas, así como la suspensión de diamante.



*Figura 33: Equipo Buehler utilizado para pulir las muestras*

En la figura 34 se aprecia la disposición de los granos pulidos, nótese que hay granos marcados con X donde el pulido es malo, mientras que los granos marcados con A,B, C, D y E muestran la mayor superficie pulida.



*Figura 34: Apariencia de los granos pulidos usando luz reflejada a 125X  
(Tomada de Garver, 2002)*

#### **4.4.- Fase 4: Revelado, montaje del detector externo (mica)**

##### Materiales y Equipos

- Ácido Nítrico ( $\text{HNO}_3$ )
- Beakers o vasos de precipitado de 50 y 400 ml.
- Termómetros
- Agua destilada
- Cronómetro
- Horno
- Pinzas
- Microscopio de luz transmitida de 30 y 50X.

#### **4.4.1.- Revelado**

##### Descripción

Esta etapa tiene como finalidad mostrar las huellas de fisión espontáneas presentes en los granos de apatito.

##### Instrucciones

- Prepare una solución de  $\text{HNO}_3$  a una molaridad de 5, antes de comenzar el grabado o revelado.
- Tome la temperatura ambiental inicial.
- Llene a  $\frac{3}{4}$  un beaker o vaso de precipitado de 50 ml, coloque este vaso sobre otro vaso de precipitado que contenga agua, esto con la finalidad de regular la temperatura del ácido. Mantenga una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  agregando agua fría al vaso de precipitado de mayor tamaño.
- Coloque otro vaso de precipitado de 400 ml lleno con agua, a fin de lavar la muestra.
- Use un cronómetro y sumerja el preparado o la pastilla de apatitos en el ácido por 20 segundos.
- Remueva la pastilla con una pinza e inmediatamente sumérgalo en el vaso de precipitado con agua.
- Tenga cuidado de no tocar la superficie de los apatitos después de que haya culminado el revelado.
- Inspeccione bajo el microscopio de luz transmitida si las huellas son visibles o no.
- Deje secar la muestra bajo la campana
- Lave la muestra con jabón neutro de laboratorio

#### **4.4.2.- Montaje del detector externo (mica)**

## Descripción

Una vez que los preparatos de apatito ya han sido revelados suficientemente, puede contar las huellas espontáneas en este momento, si no se debe montar la mica o detector de bajo contenido de uranio. La mica a utilizar es una mica de moscovita del Brasil o puede ser obtenida en la empresa B&M Mica Co. Inc, USA.

## Instrucciones

- No toque la superficie limpia, pulida y revelada de los apatitos
- En una mesa limpia arregle las secciones finas y las micas precortadas.
- Utilizando una cinta plástica Scotch<sup>®</sup> de doble engomado fíjela a la mesa, conjuntamente tome las micas con una pinza y presiónelo sobre la cinta plástica, de manera que quede completamente adherida a la cinta, con un lápiz páselo por detrás de la cinta con la finalidad de desfoliar la mica, es decir, obtener un solo folio de mica.
- Continué este proceso hasta que el folio tenga aproximadamente un espesor uniforme de 0.18 mm utilizando un vernier micrométrico.
- Cuidadosamente lleve la mica adherida a la cinta, colóquela sobre el portaobjeto que contiene los apatitos, y envuelvalo con cinta plástica mediante una sola pasada, corte la cinta utilizando un exacto.
- Con un punzón fino de 1micra ( $\mu$ ) 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.

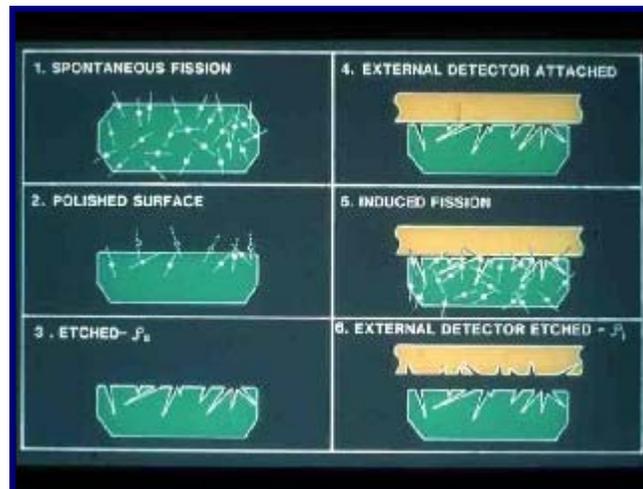
- Todas las muestras ya están listas para ser irradiadas, ahora es necesario empaquetarlas según las diversas especificaciones de los centros de irradiación.

El montaje de la mica puede ser apreciado en la figura 36 donde se muestra la forma como se desfolia la mica por medio de la cinta plástica Scotch®.



**Figura 35:** Separación de la mica necesaria para el montaje según la técnica del detector externo  
(Tomada con permiso de Garver, 2002)

Toda la fase 4 están resumidas en la figura 37, en el punto 1 se tienen las huellas de fisión espontáneas, luego se pulen en paso 2, posteriormente se revelan en el paso 3, se coloca el detector externo en el paso 4, se irradian en el paso 5 y por último se revela la mica cuyos etapas serán explicada en la siguiente sección.



*Figura 36: Resumen de la fase 4, pulido, revelado y montaje del detector externo*

#### **4.5.- Fase 5: Preparación de la sección fina para el conteo de las huellas**

##### Materiales y equipos

- Esmalte de uñas transparentes (brillo)
- Exacto
- Agua desionizada
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Ácido Fluorhídrico (HF)
- Resina epoxicure

##### **4.5.1.- Revelado de la mica después de la irradiación**

## Descripción

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

## Instrucciones

- Después de la irradiación remueva la mica del montaje, como se usó una cinta plástica para fijar la mica esta debe removerse con un exacto.
- Por medio de una manguera tygon se hacen incisiones donde se insertarán los bordes de la mica, de manera que estas se mantengan juntos para el revelado.
- 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.
- 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. Chequee esta agua constantemente con 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
- Limpie cada mica con alcohol (metanol) y seque verticalmente sobre la cocina “hotplate” a una temperatura controlada de 30°C.
- Chequee la calidad de la huella, sea muy cuidadoso con la calidad del grabado ya que el ácido fluorhídrico tiende a perder sus propiedades a medida que se efectúa el revelado.
- Limpie todas las micas y la zona de trabajo.

### **4.5.2.- Arreglo del montaje para el conteo**

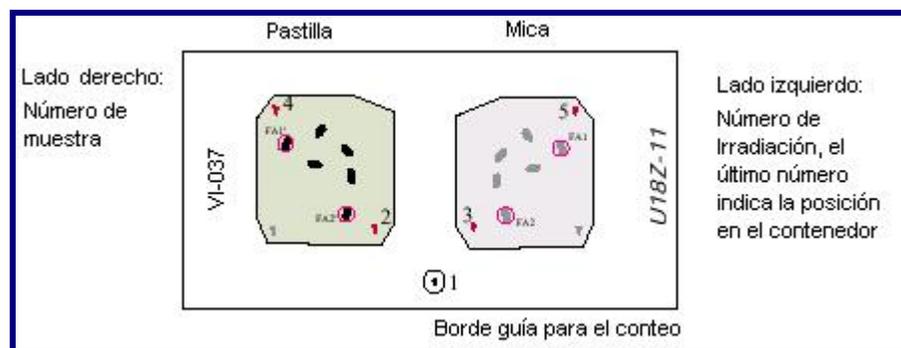
## Descripción

En esta etapa se obtiene la sección fina definitiva para el conteo de las huellas espontáneas ( $N_s$ ) e inducidas ( $N_i$ ) bajo el microscopio.

## Instrucciones

- Regrese las micas al montaje original de acuerdo al número de muestra.
- Sobre un portaobjeto utilizando un marcador con punta de diamante (bisturí) coloque la siguiente información: sobre el borde derecho el número de irradiación y la posición en el contenedor, y en el borde izquierdo el número de la muestra.
- Ponga la pastilla y la mica sobre el borde de un portaobjeto nuevo y acomódelos como si lo fuera a colocar sobre el portaobjetos marcado según el paso anterior.
- Usando el brillo de uñas pegue tanto la pastilla como la mica, recuerde que los agujeros que les hizo a estos les permitirá alinear la mica y colocar la mica como imagen especular de la pastilla.
- Alinee cuidadosamente la mica y la pastilla recuerde que de esto depende la precisión del microscopio y subsecuentemente de la edad obtenida.

En la figura 38, se muestra la disposición de la pastilla y de la mica en el portaobjeto final a utilizar para el conteo después de realizar los pasos anteriormente, note que los puntos marcados en rojo y denotados por los números 2, 4 en la pastilla y 3, 5 en la mica corresponden a los agujeros realizados en la fase anterior para ubicar los granos, el número 1 se hace sobre la sección fina con el mismo punzón con la finalidad de que el microscopio determine el diámetro del agujero para la precisión.



**Figura 37:** Arreglo del montaje de la pastilla y de la mica para el conteo

El contaje de las huellas y la determinación de la edad serán estudiados en el capítulo IV con mayor detalle.

Todos los pasos realizados para la separar el mineral apatito en muestras de sedimentos, se describen en el siguiente diagrama de flujo, identificado con la figura 39, el cual detalla todas las fases explicadas anteriormente, nótese que se inicia con la recolección de las muestras en campo, luego se pregunta si las muestras están mojadas, en ese caso se pasa a la mesa de secado, luego se continua en el paso N° 2, que corresponde al tamizado de las muestras, en esta etapa se deben utilizar dos tamices diferentes uno de malla N°60 y el otro de malla N° 200, luego se toma solo la fracción que esta entre los dos tamices y se pasa al N° 3, en el que se utiliza la mesa de sacudidas de Wilfley, donde se recogen únicamente los sedimentos concentrados, luego de realizar por lo menos tres pases diferentes (como se escribe en este trabajo), en el paso N° 4 es secada nuevamente la muestra y luego esta es trasladada al laboratorio de Termocronología, en donde se continúan los próximos pasos; los concentrado se separan por densidad en el paso N° 5, primero como se observa en el diagrama utilizando bromoformo, del cual se extrae la fracción de minerales pesados, posteriormente se pasa al N° 6, donde se realiza la separación por orden de susceptibilidad magnética, primero utilizando un imán de mano, luego con el separador magnético Frantz, esta fracción se nuevamente separada por densidad en el paso N° 7, utilizando esta vez cápsulas con densidades conocidas y líquidos pesados como Benzyl Benzoato y Dido metano, posteriormente en el paso N° 8 a esta

fracción de la muestra se le agrega oxalato de sodio y se coloca en el ultrasónico, para luego ir paso N° 9 aquí la muestra es colocada en el horno isotérmico, de allí al paso N° 10 donde se escogen los apatitos utilizando para tal fin una lupa; este mineral se monta en una sección fina en el paso N° 11, se coloca nuevamente en el horno y se pulen las pastilla en el paso N° 12, en el próximo paso N° 13 se revelan las huellas espontáneas (Ns) y se monta el detector externo, en nuestro caso moscovita, en el siguiente paso N° 14 la muestra es irradiada y posteriormente, en el paso N° 15 se revelan las huellas inducidas, para finalmente contarlas en el microscopio en el paso N° 16 y poder dar como resultado la datación absoluta de la muestra por el método de huellas de fisión.



**Figura 38:** Diagrama de flujo utilizado para el procesamiento de muestras bajo la técnica del detector externo con la finalidad de datar según el Método de Huellas de Fisión.

## CAPITULO IV Datación de muestras y Resultados

### Introducción

En este capítulo se explicará la manera cómo se determinan cada uno de los parámetros necesarios en la ecuación de edad del método de huellas de fisión, se calcularán las edades individuales de las muestras recolectadas en campo. Seguidamente se realizará una discriminación entre datos de diferentes edades geológicas, y finalmente se hará una interpretación geológica de los resultados obtenidos.

### 5.1.- Descripción de los parámetros necesarios para la ecuación de edad práctica del MHF:

Recordando que la ecuación utilizada en la práctica para calcular las edades individuales de los granos está dada por la expresión (16):

$$t = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln \left( \lambda_{\alpha} \frac{\rho_s}{\rho_i} G Z \rho_m + 1 \right)$$

donde

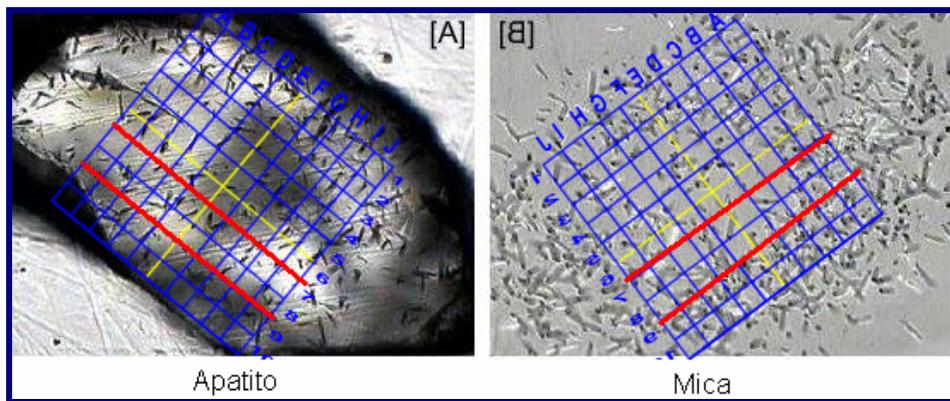
$$\lambda_{\alpha} = 1,155125 \times 10^{-10} \text{ años}^{-1}$$
$$G = 0.5$$

La densidad de huellas espontáneas e inducidas  $\rho_s$  y  $\rho_i$  es calculada mediante las siguientes expresiones

$$\rho_s = \frac{\sum_{j=1}^n N_{sj}}{A}$$
$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^n N_{ij}}{A}$$

donde A es el área del j-ésimo grano, como en la técnica del detector externo se cuentan las huellas sobre la misma área, se tiene que el cociente  $\frac{\rho_s}{\rho_i} = \frac{N_s}{N_i}$ .

Estas huellas espontáneas e inducidas ( $N_s$ ,  $N_i$ ) son contadas en una malla 10x10 colocada sobre el grano de apatito a estudiar para el caso de las  $N_s$  y sobre la mica o detector externo para el caso de las  $N_i$ . Estas mallas pueden ser apreciadas en la siguiente figura 39:



**Figura 39:** Mallas 10×10 de conteo usadas para estimar  $\rho_s$  y  $\rho_i$  según la TDE: (A) en un grano de apatito, (B) en la mica colocada en contacto cerrado sobre el mismo grano.

Para contar las huellas espontáneas e inducidas se siguen las siguientes reglas:

- No se consideran las huellas en los bordes de la cuadrícula.
- Las áreas de las huellas espontáneas e inducidas son iguales.
- La malla debe estar alineada en el centro del grano o debe asegurarse que la malla registre una huella distintiva.
- Contar áreas simples
- Obviar cualquier área con inclusiones u otras obstrucciones ópticas
- Obviar áreas con una alta distribución de de huellas heterogéneas
- Obviar cristales fuertemente deteriorados

La hoja para el registro de huellas en las mallas, así como el cálculo de las densidades y número de huellas por granos se encuentra en los anexos.

En el reactor se irradian muestras de edades conocidas denominadas estándar junto con vidrios o monitores de densidades conocidas, intercalados con las muestras de edades desconocidas (Wagner, 1992). Existen diversos vidrios detectores en particular, se utilizó un vidrio dosímetro estándar denominado CN1 cuya densidad es de  $3,970 \times 10^6 \pm 0,838 \times 10^5$  huellas/cm<sup>2</sup>. Este detector es importante ya que permite calcular la cantidad de afluencia  $\phi$  de neutrones necesaria para irradiar las muestras en el reactor nuclear, después de obtener el valor de  $\phi$ , y conocer las posiciones de las muestras en el reactor se introducen estos datos en un programa elaborado por Mark Brandon de La Universidad de Yale en Basic llamado FLUENCE, el cual proporciona finalmente mediante interpolación la densidad del monitor  $\rho_m$  a usar en la expresión **(16)**.

Finalmente el último parámetro que falta por describir es el Factor  $Z$ , y para conocer el valor de este se utilizan dos métodos:

**Primer Método:** Con la densidad del monitor  $\rho_m$ , el tiempo de la muestra de edad conocida (estándar)  $t_c$ , en el caso del apatito de Durango  $t_c = 31,4 \pm 0,5$  M.a; el número de huellas espontáneas  $N_s$ , el número de huellas inducidas  $N_i$ , y el número de cuadrículas contadas  $A$ , se introducen todos estos parámetros en el programa ZAGE en BASIC de Mark Brandon, como un archivo de texto con la terminación \*.std que significa estándar, de la siguiente forma:

>>> **FORMATO PARA UN ARCHIVO DE DATOS: ".STD"** <<<

===== Programa para calcular el factor Z v. 1.2 (Brandon3/18/95) =====

Calcula el factor Z para datos de huellas de fisión de una muestra de edad conocida.

La estructura del archivo de entrada para la lectura de los datos debe ser como sigue:

*Línea 1:* Título para el conjunto de datos (Método descrito, edad estándar, y vidrio estándar)."

*Línea 2:* Edad (Ma) y error (Ma) de la muestra estándar; en valores separados con comas"

*Línea 3:* Todos los valores separados con comas."

METODO ZETA: Densidad de huella (huella/cm<sup>2</sup>) y error (%) relativo estándar para la afluencia de monitor"

METODO Z: Introduzca lo siguiente en esta línea: 1, 0."

*Línea 4:* Área de 1 cuadrícula contada (cm<sup>2</sup>)."

*Línea 5:* Huellas espontáneas (N<sub>s</sub>), huellas inducidas (N<sub>i</sub>), número de cuadrículas para cada grano los datos pueden ser separados por comas o por espacios en blanco

Un ejemplo del formato de entrada lo representan los siguientes datos:

**Tabla 4.0:** Datos de entrada pertenecientes al apatito de durango (D1) para el cálculo del Factor Z

Edad muestra conocida: Durango age standard D1 U9A-3 31.4, 0.5* Densidad del monitor: 2.434x10 <sup>6</sup> , 1.69* Tamaño de la cuadrícula en cm <sup>2</sup> 6.54x10 <sup>-7</sup>		
Ns	Ni	Área cuadrícula
14	67	100
12	51	100
6	51	100
10	45	100
13	57	100
9	45	100
9	43	100
16	44	100
11	38	100
9	49	100

\* Error

Estos datos generan la siguiente tabla de salida:

**Tabla 4.1:** Datos de salida del programa en Basic ZAGE (Brandon, 1995)

DATE/TIME: 03-17-2003/18:46:00 FILENAME: C:\DATOS\D1.FTA							
Durango age standard D1 U9A-3							
AGE (MA) AND STANDARD ERROR (MY) OF AGE STANDARD:		31.40		0.50			
TRACK DENSITY FOR GLASS STANDARD (TRACKS/CM^2):		2.434E+06					
RELATIVE STANDARD ERROR FOR GLASS DENSITY (%):		1.69					
SIZE OF COUNTING SQUARE (CM^2):		6.540E-07					
----- ZETA FOR GRAINS OF AGE STANDARD -----							
Grain	RhoS	(Ns)	RhoI	(Ni)	Squares	Zeta	Grain-only
Total							
No.	(cm^-2)		(cm^-2)			(yr cm^2)	-SE +SE
1	2.141E+05 ( 14)		1.024E+06 ( 67)		100	123.78	36.4 36.5
2	1.835E+05 ( 12)		7.798E+05 ( 51)		100	109.92	35.3 35.4
3	9.174E+04 ( 6)		7.798E+05 ( 51)		100	219.84	95.0 95.0
4	1.529E+05 ( 10)		6.881E+05 ( 45)		100	116.39	40.7 40.8
5	1.988E+05 ( 13)		8.716E+05 ( 57)		100	113.40	34.9 35.0
6	1.376E+05 ( 9)		6.881E+05 ( 45)		100	129.32	47.3 47.3
7	1.376E+05 ( 9)		6.575E+05 ( 43)		100	123.57	45.3 45.4
8	2.446E+05 ( 16)		6.728E+05 ( 44)		100	71.13	20.8 20.8
9	1.682E+05 ( 11)		5.810E+05 ( 38)		100	89.35	30.6 30.7
10	1.376E+05 ( 9)		7.492E+05 ( 49)		100	140.82	51.1 51.2
POOLED	1.667E+05 ( 109)		7.492E+05 ( 490)		1000	116.27	12.5 12.6
MEAN ZETA (using grain ratios)						114.53	10.6 10.7
CHI-SQUARED PROBABILITY (%):				71.8			
MEAN (RhoS/RhoI) +/- 1 SE:				0.226 +/- 0.0205			

Los valores en rojos representan el Factor Z promedio o Z mean y el valor en azul es el Z pooled, el cual es calculado por la estimación de tipo pooled que consiste en sumar todas las  $N_s$  y todas las  $N_i$ , hacer el cociente de estas sumas e introducirlo en

la fórmula del Factor Z (15), en lugar de  $\frac{N_s}{N_i}$

**El Segundo método:** consiste en crear una base de datos en Excel, introduciendo los datos de la forma  $N_s$ ,  $N_i$ ,  $A$ ,  $\rho_m$  y  $t_c$ . De esta manera el valor del Factor Z para cada grano es calculado según la fórmula (15), los resultados para los datos de la tabla 4.0 se muestran en el siguiente cuadro:

**Tabla 4.2:** Base de datos en Excel, para el calculo del factor Z, según los métodos pooled y mean

Ns	Ni	CUADRICULA	Densidad monitor	TC	Factor Z
14	67	100	2434000	31,4	123,48
12	51	100	2434000	31,4	109,65
6	51	100	2434000	31,4	219,31
10	45	100	2434000	31,4	116,11
13	57	100	2434000	31,4	113,13
9	45	100	2434000	31,4	129,01
9	43	100	2434000	31,4	123,27
16	44	100	2434000	31,4	70,95
11	38	100	2434000	31,4	89,13
9	49	100	2434000	31,4	140,47
		<b>Promedio</b>		<b>123,45</b>	
$\sum N_s$	$\sum N_i$	<b>Pooled</b>		<b>115,99</b>	
109	490				

Los valores en rojo y en azul para este cuadro equivalen a los mismos valores señalados para la tabla 4.1. La fórmula de la estimación del Z pooled (Green, 1986) viene dada por:

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

La estimación del Factor Z por promedios viene dada por:

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

El más utilizado mundialmente es el método *Z Pooled* debido a que en este las variaciones por los errores y por precisión numérica son mínimas, cómo puede observarse comparando las tablas 4.1 y 4.2 los valores dados por el Z promedio no coinciden, es decir, 114.53 versus 123.45 motivado a que este estimador se ve altamente influenciado por los errores sobre las observaciones mientras que el pooled

es menos influenciado por estos errores 116.27 dado por el programa de Brandon versus 115.99 de la hoja de cálculos elaborada en Microsoft Excel.

Una vez que se tiene este el Factor Z, ya se puede utilizar la expresión (17) para calcular las edades de las muestras de edad desconocida tomadas en campo.

## 5.2.- Cálculo de edades para las muestras de apatito recolectadas en campo

Los datos de huellas espontáneas e inducidas para las muestras de este trabajo son las siguientes: VI-033, VI-037, VI-090, VI-091, VI-095, VI-097, VI-101 no se obtuvieron debido a que para la fecha aun no se han irradiado en el reactor, sin embargo, utilizamos datos de cuarenta y cinco (45) granos de apatitos separados e irradiados pertenecientes a la misma zona de estudio proporcionados por el Prof. Jorge Mora del Laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela. Estos datos están conformados por dos matrices de datos ( $N_s$ ,  $N_i$ ,  $A$ ), una de 22 granos llamada B01 y otra de 20 granos llamadas B02.

Utilizando las constantes conocidas y los parámetros estimados en la sección anterior, los cuales son resumidos en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Parámetros utilizados para el cálculo de las edades individuales

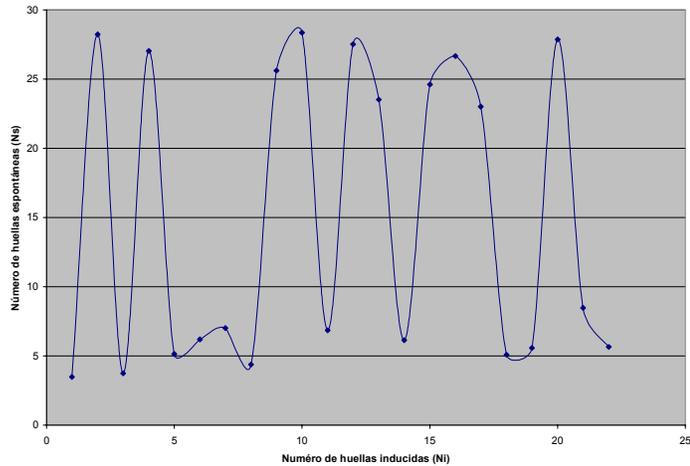
Factor Z (Z pooled)	116.27
$\lambda_\alpha$ (Constante de decaimiento)	$1,155125 \times 10^{-10} \text{ años}^{-1}$
G (Factor de geometría)	0.5
$\rho_m$ (densidad del monitor)	2434000

Junto con los valores de  $N_s$ ,  $N_i$  y  $A$  para el primer conjunto de datos B01, se calcula el tiempo individual desconocido utilizando Microsoft excel, el cual es denotado de color azul en la tabla 4.4.

*Tabla 4.4: Conjunto de datos y tiempos individuales para cada grano de la muestra B01*

Grano	NS	NI	Cuadrícula	Densidad monitor	Factor Z	Tiempo individual
1	10	405	100	2434000	116,23	3,491693946
2	23	115	100	2434000	116,23	28,22848621
3	6	227	100	2434000	116,23	3,737733196
4	45	235	100	2434000	116,23	27,02978877
5	30	823	100	2434000	116,23	5,154144698
6	35	797	100	2434000	116,23	6,208824414
7	7	141	100	2434000	116,23	7,01861306
8	8	258	90	2434000	116,23	4,384614271
9	47	259	100	2434000	116,23	25,61790942
10	43	214	100	2434000	116,23	28,36010529
11	17	351	80	2434000	116,23	6,847309352
12	39	200	100	2434000	116,23	27,52427847
13	50	300	100	2434000	116,23	23,53231425
14	5	115	90	2434000	116,23	6,147151221
15	45	258	100	2434000	116,23	24,6247526
16	41	217	100	2434000	116,23	26,67068855
17	37	227	100	2434000	116,23	23,0149055
18	4	111	100	2434000	116,23	5,09535187
19	9	228	100	2434000	116,23	5,581211263
20	31	157	80	2434000	116,23	27,86966385
21	46	768	80	2434000	116,23	8,466817368
22	8	200	100	2434000	116,23	5,655594779

Posteriormente, haciendo un gráfico de dispersión de los pares ( $N_i$ ,  $N_s$ ) y uniendo estos puntos con líneas suavizadas se observan dos tendencias, una máxima y una mínima, la cual puede ser observada en la figura 40.



**Figura 40:** *Dispersión de los pares  $(N_i, N_s)$  con líneas suavizadas para los datos B01*

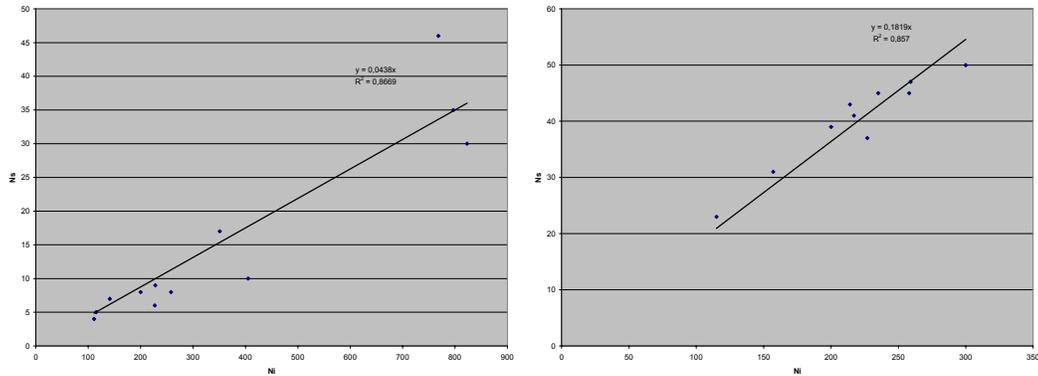
Para ver esta tendencia se ordenaron en forma ascendente todos los valores de este conjunto de datos de acuerdo a la columna de tiempo individual y se realizó un gráfico de dispersión para los valores mínimos y máximos, trabajados en forma separadas para cada caso. Se hizo una regresión lineal con intercepto igual a cero el cual es conocido como Ajuste de Isócronas (Faure, 1982). El valor de las pendientes representa un estimado global de los cocientes  $N_s/N_i$ , el cual es introducido en la ecuación (16) para tener un estimado de cada tendencia (máxima y mínima).

Estos valores pueden ser apreciados en la tabla 4.5, los tiempos individuales para los granos pertenecientes a la tendencia mínima y máxima se representan en esta tabla por los colores rojo y azul respectivamente. También se muestran en esta tabla el valor de la pendiente dada por el ajuste de isócronas de 0.0438 para la tendencia mínima y de 0.1819 para la tendencia máxima, al sustituir estos valores como estimador global del cociente  $N_s/N_i$  en la ecuación de edad, se obtienen 6,19 y de 25.67 M.a para estas dos tendencias.

**Tabla 4.5:** Datos ordenados por tiempo y estimaciones de las edades máximas y mínimas para B01

Tiempo individual	Isócrona mínima	Tiempo individual	Isócrona máxima
3,49169395	0,0438	23,0149055	0,1819
3,7377332	Tiempo para los mínimos	23,5323142	Tiempo para los máximos
4,38461427	6,192618298	24,6247526	25,67888932
5,09535187		25,6179094	
5,1541447		26,6706886	
5,58121126		27,0297888	
5,65559478		27,5242785	
6,14715122		27,8696639	
6,20882441		28,2284862	
6,84730935		28,3601053	
7,01861306			
8,46681737			

Los gráficos del ajuste de isócronas para los valores mínimos y máximos son mostrados en las figuras 41 (A) y (B) respectivamente.



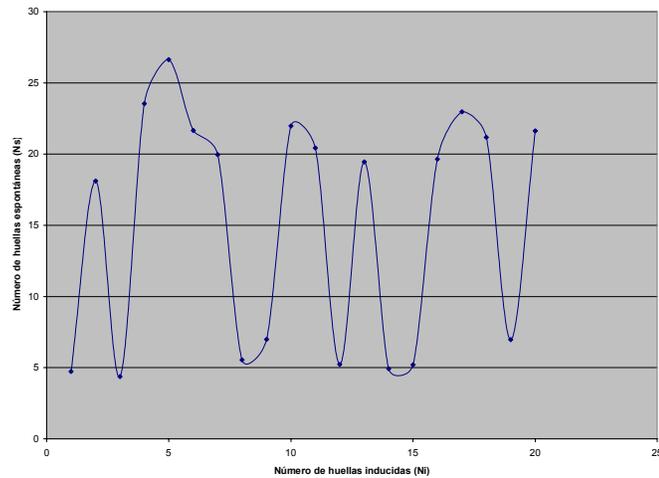
**Figura 41:** Ajuste de Isócronas de los datos B01: (A) para la tendencia mínima, (B) para la tendencia máxima

Para el conjunto de datos B02 utilizando la misma metodología que en el caso anterior, se obtuvieron los siguientes tiempos individuales denotados de color azul en la tabla 4.5.

**Tabla 4.6:** Conjunto de datos y tiempos individuales para cada grano de la muestra B02

Grano	NS	NI	Cuadrícula	Densidad monitor	Factor Z	Tiempo individual
1	9	269	80	2434000	116,23	4,730855434
2	25	195	100	2434000	116,23	18,10939977
3	13	421	98	2434000	116,23	4,366394611
4	19	114	100	2434000	116,23	23,53231425
5	20	106	80	2434000	116,23	26,63394350
6	23	150	70	2434000	116,23	21,65288713
7	40	283	90	2434000	116,23	19,96226287
8	4	102	100	2434000	116,23	5,544748442
9	13	263	100	2434000	116,23	6,988130452
10	40	257	100	2434000	116,23	21,97835245
11	48	332	100	2434000	116,23	20,41850738
12	4	108	80	2434000	116,23	5,236831948
13	27	196	60	2434000	116,23	19,45633154
14	7	201	100	2434000	116,23	4,924304646
15	23	625	100	2434000	116,23	5,203329746
16	16	115	90	2434000	116,23	19,65028579
17	27	166	100	2434000	116,23	22,96627941
18	27	180	70	2434000	116,23	21,18294472
19	30	608	100	2434000	116,23	6,975759385
20	34	222	100	2434000	116,23	21,62748571

Para identificar nuevamente las tendencias y calcular la edad global, se realizó un diagrama de dispersión de los pares ( $N_i$ ,  $N_s$ ) con líneas suavizadas, el cual es mostrado en la figura 42. Nótese nuevamente en esta figura que hay dos tendencias bien marcadas una mínima y otra máxima.



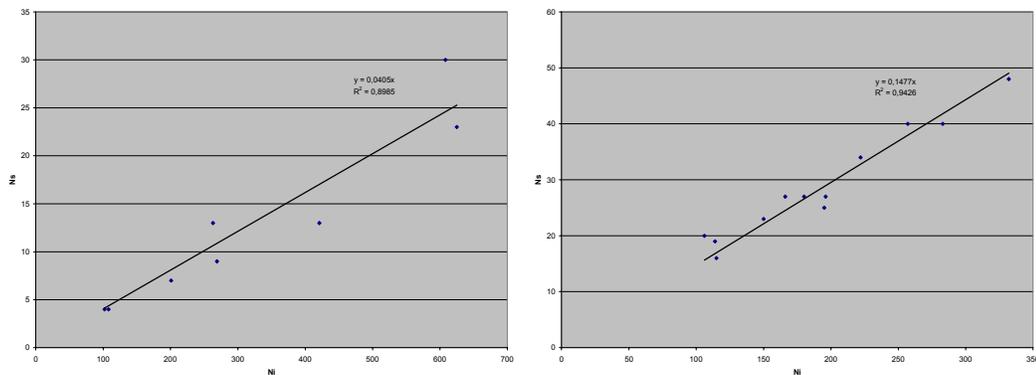
**Figura 42:** *Dispersión de los pares  $(N_i, N_s)$  con líneas suavizadas para los datos B02*

Ordenando estos datos nuevamente por la columna de tiempos individuales, y denotando de color rojo la tendencia mínima y de color azul la máxima, se realiza nuevamente el ajuste de isócronas para cada una de estas tendencias. Los valores de este ajuste pueden ser apreciados en la tabla 4.6. Nótese que en este caso la pendiente de los ajustes de las isócronas son de 0.0405 y de 0.1477 para cada tendencia, dando unos tiempos de 5.72 y 20.85 M.a para la mínima y máxima respectivamente.

**Tabla 4.7:** Datos ordenados por tiempo y estimaciones de las edades máximas y mínimas para B02

Tiempo individual	Isócrona mínima	Tiempo individual	Isócrona Máxima
4,366394611	0,0405	18,10939977	0,1477
4,730855434	Tiempo para los mínimos	19,45633154	Tiempo para los máximos
4,924304646	5,726258325	19,65028579	20,85866449
5,203329746		19,96226287	
5,236831948		20,41850738	
5,544748442		21,18294472	
6,975759385		21,62748571	
6,988130452		21,65288713	
		21,97835245	
		22,96627941	
		23,53231425	
		26,63394350	

Los gráficos de dispersión de los pares ( $N_i$ ,  $N_s$ ) así como los ajustes de isócronas para las tendencias máximas y mínimas del conjunto de datos B02 pueden ser apreciados en la figuras 43 (A) y (B) respectivamente.

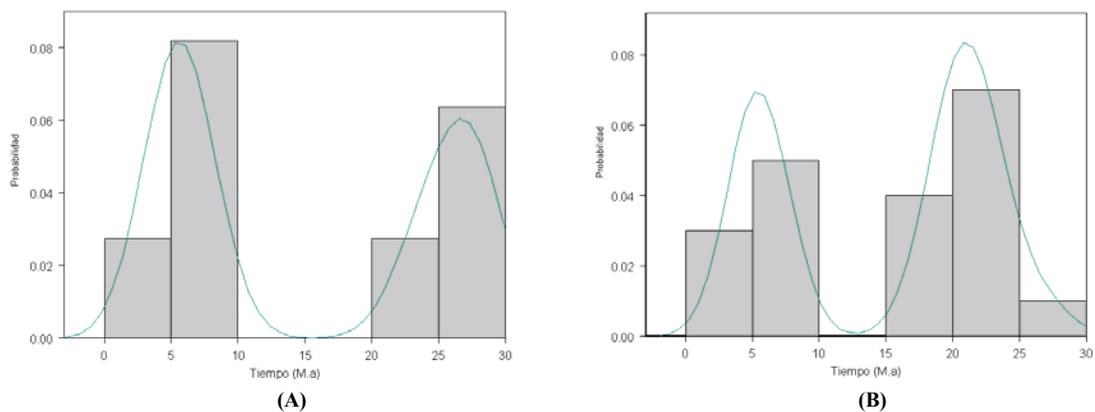


**Figura 43:** Ajuste de Isócronas de los datos B02: (A) para la tendencia mínima,, (B) para la tendencia máxima

Los análisis realizados para las muestras B01 y B02 hasta ahora indican que hay dos poblaciones de granos de diferentes edades: Una población mínima que oscila de 5 a 6 M.a y otra población máxima entre 20 y 26 M.a. Con la finalidad de asegurar la existencia de estas tendencias a continuación se hace un análisis más detallado.

### 5.3.- Validación de las poblaciones

Para validar el número de poblaciones determinadas en el estudio anterior se procedió a realizar un histograma en conjunto con la línea de densidad de probabilidades utilizando el paquete estadístico S<sup>+</sup> existente en el laboratorio. El área bajo la curva es igual a uno, así se obtuvieron los siguientes gráficos para el conjunto de datos tope B01 y datos de base B02, mostrados en la siguiente figura 44:



**Figura 44:** Histogramas con líneas de densidades de probabilidades para las muestras B01 y B02

Observando estos histogramas claramente se aprecia dos poblaciones, una situada aproximadamente en 5 M.a y otra en 25 M.a., estas poblaciones representan la mayor densidad de probabilidad.

Con la finalidad de discriminar efectivamente tales poblaciones se utilizó método de ajuste de picos binomial (Peak-fitting method) de Galbraith y Green, el cual según la experiencia de los investigadores del área que han estudiado el método, aseguran que es el más efectivo, (Brandon 2002). Este fue aplicado utilizando el programa BINOMFIT versión 1.051 en visual Basic, elaborado por Mark Brandon y existente en el Laboratorio de Termocronología. Los fundamentos de este método de discriminación pueden ser estudiados en Galbraith et. al (1990). Una de las grandes ventajas de este método es que proporciona una solución uní componente que es equivalente a la edad del evento. En términos informales se tiene una distribución mixta la cual es considerada como una mezcla de un conjunto finito de distribuciones las cuales pueden ser separadas.

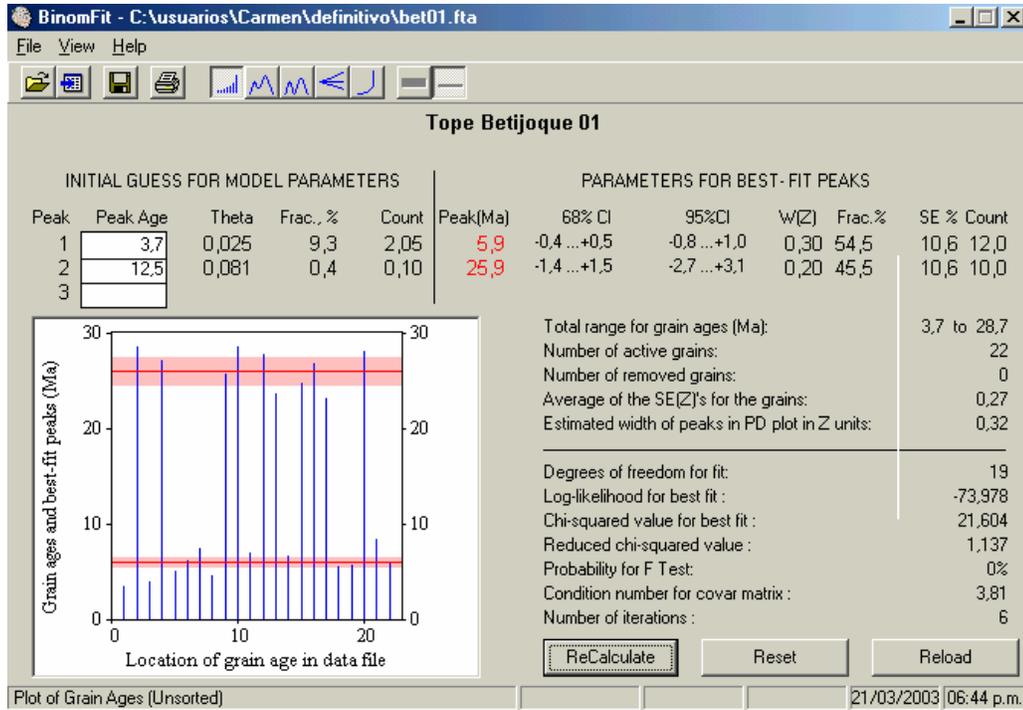
Los datos obtenidos en este trabajo, introducidos en la hoja de Microsoft excel ( $N_s$ ,  $N_i$ , Cuadrícula  $\rho_m$ , Factor  $Z$ , son guardados en un archivo de texto con la terminación .fta que significada fission tracks apatite para especificar que son datos provenientes de la fisión de átomos de uranio en apatitos. La forma de guardar estos en el archivo de texto es idéntica a la forma cómo se introducen los datos para el calcular el Factor  $Z$  según el programa ZAGE de Brandon, la cual ya fué explicada anteriormente.

A continuación se muestra el archivo de entrada para los datos de la muestra B01:

**Tabla 4.8:** Entrada de los datos B01 en el programa BINOMFIT.

Base Betijoque 01		
-2.434E6, 1.69, 0		
116.23, 0, 6.540E-07		
10	405	100
23	115	100
6	227	100
45	235	100
6	227	100
45	235	100
30	823	100
35	797	100
7	141	100
8	258	90
47	259	100
43	214	100
17	351	80
39	200	100
50	300	100
5	115	90
45	258	100
41	217	100
37	227	100
4	111	100
9	228	100
31	157	80
46	768	80
8	200	100

Este programa arrojó los siguientes resultados, los cuales se muestran según la ventana de salida:



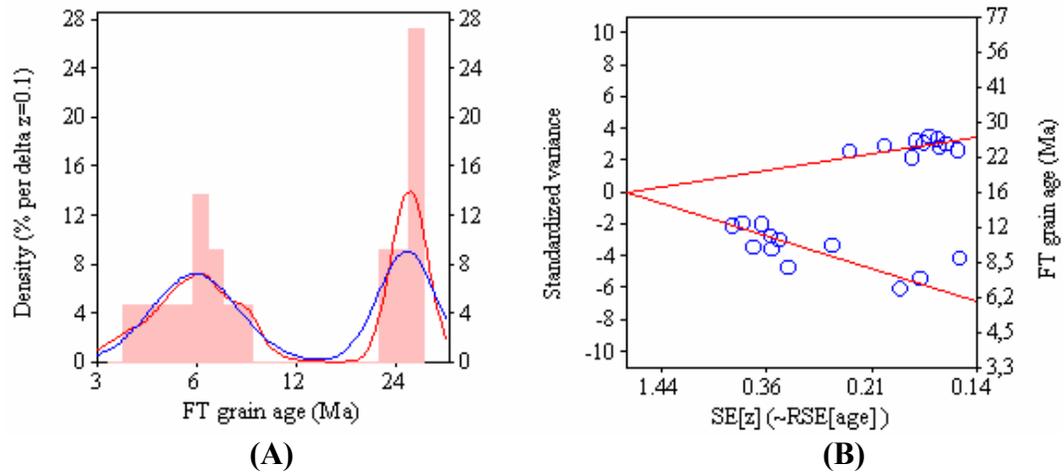
**Figura 45:** Resultados arrojados por el programa BINOMFIT para la muestra B01

En esta figura 45, se aprecia una de las salidas del programa para el conjunto de datos B01. En la parte izquierda de la figura se representan los parámetros iniciales para hacer la discriminación como lo son: número de picos, edad de los picos, theta, fracción en porcentaje (%) y número de conteos, en la parte izquierda se encuentra un gráfico en el que se muestran un histograma de edades con los mejores ajustes encontrados por el programa, las franjas de color rosado indican dos tendencias o dos zonas de edades diferentes.

En la parte superior derecha se tienen los parámetros definitivos para los mejores ajustes. Los ajustes más representativos son denotados en color rojo en este caso, uno de 5.9 Ma y otro de 25.9 Ma, además de esto se encuentran los intervalos de confianza de las edades de 68% y 95% (C.I) respectivamente. El valor de la probabilidad según la distribución de tipo Weibull ( $W(Z)$ ), seguido de la fracción de granos estudiados en porcentaje (Frac. %), la desviación estándar en porcentaje (SE %) y el número de granos contados pertenecientes al ajuste (Count.).

En la parte inferior derecha se obtienen otros valores estadísticos como rango total de granos en millones de años (M.a), Número de granos activos considerados para el estudio, Promedio de la desviación estándar para los granos. Ancho estimado de los picos en los gráficos de densidad de probabilidades.

Separado del sector anteriormente descrito se encuentran los grados de libertad para el ajuste, los mejores ajustes según el Principio de Máxima Verosimilitud (P.M.V) valores chiquadrados para el mejor ajuste, valores chiquadrados reducidos, Probabilidades según el test estadístico F, número de condiciones para la matriz de covarianza y número de iteraciones. Más detalles acerca del uso del programa están dados en Brandon, (2002).Este programa también arrojó los siguientes gráficos para este conjunto de datos:



**Figura 46:** Discriminación de edades para el conjunto de datos B01. (A) Gráfico de densidades de probabilidades con los mejores ajustes, (B) Gráficos de dispersión radial “Radial Plot”.

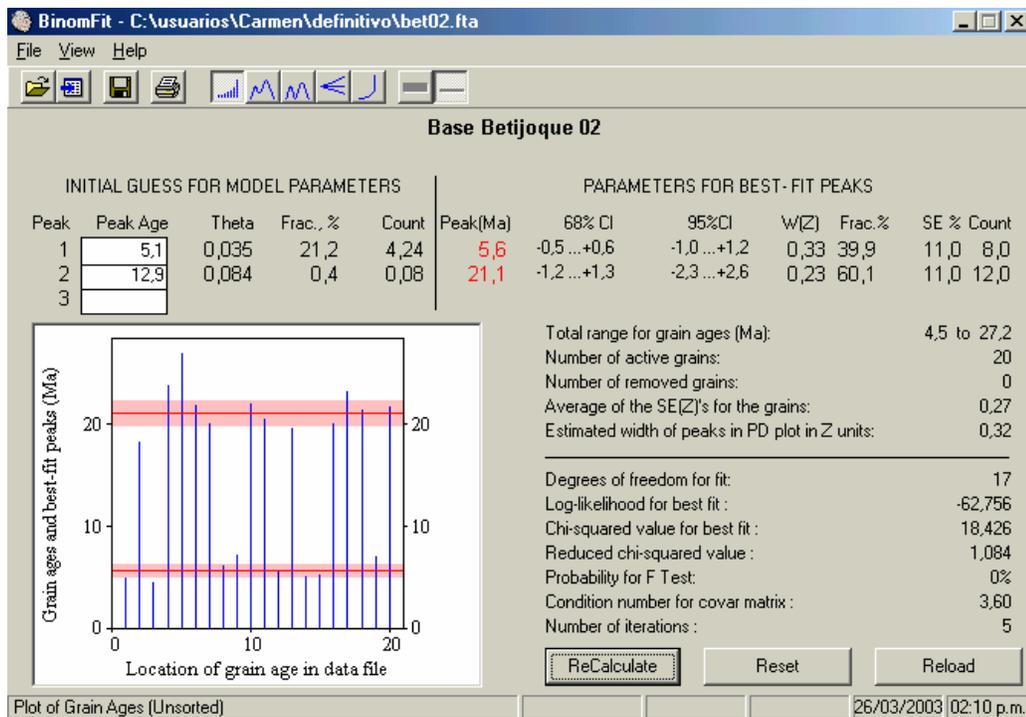
La Figura 46 (A) representa el gráfico de densidades de probabilidades en este hay dos curvas una de color azul y una de color rojo que representan los ajustes realizados por el programa, de estas curvas se toma el pico que tenga mayor área, así como el que presente menos inflexiones y que esté completamente contenido en las barras verticales como el representativo de la población. Hay dos máximos que se alcanzan uno aproximadamente en 6 M.a y otra en 25 M.a, los cuales coinciden con los valores en rojo de la figura (A). En la figura (B) de la derecha representa los gráficos radiales de Galbraith, otra gráfica de discriminación para determinar las tendencias de la muestra estudiada, esta figura tiene tres escalas, en el eje x se aprecian las desviaciones estándar sobre la edad, en eje y izquierdo la varianza estandarizada y en el eje y derecho la edad de los granos por el método de huellas de fisión, nótese en este gráfico que hay dos tendencias.

Para analizar la muestra B02 es necesario introducir los datos análogamente que para el caso anterior.

Para la base, de la Formación Betijoque, se realizan los mismos procedimientos antes descritos para el cálculo de las edades desconocidas, lo que se resume en los cuadros siguientes, datos de entrada:

**Tabla 4.9:** Entrada de los datos B02 en el programa BINOMFIT

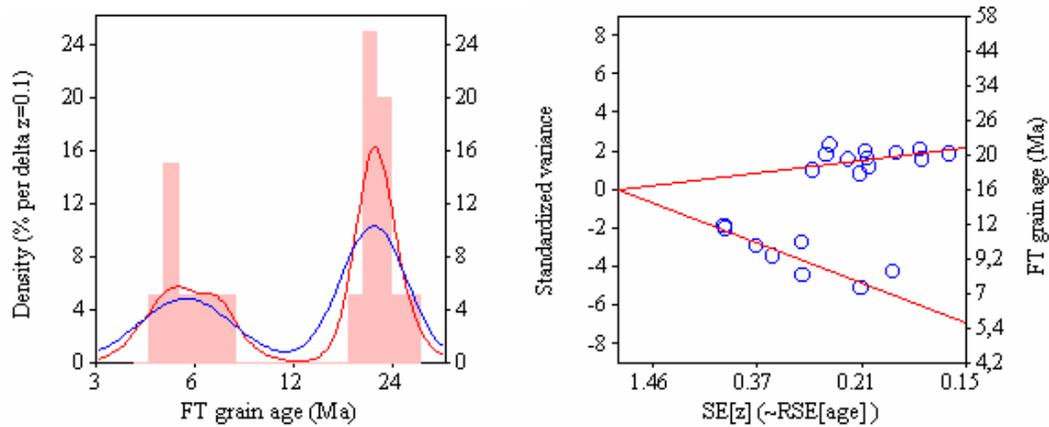
Tope Betijoque 02		
-2.434E6, 1.69, 0		
116.23, 0, 6.540E-07		
9	269	80
25	195	100
13	421	98
19	114	100
20	106	80
23	150	70
40	283	90
4	102	100
13	263	100
40	257	100
48	332	100
4	108	80
27	196	60
7	201	100
23	625	100
16	115	90
27	166	100
27	180	70
30	608	100
34	222	100



**Figura 47:** Resultados arrojados por el programa BINOMFIT para la muestra B02

En esta figura 47, se aprecia nuevamente dos tendencias una en  $5.6 \pm 1.2$  M.a y otra en  $21.1 \pm 2.6$  M.a con una confiabilidad del 95% para este conjunto de datos, nuevamente se aprecian los parámetros antes explicados para este conjunto de datos.

También se obtuvieron los siguientes gráficos, como se muestran en la figura 48:



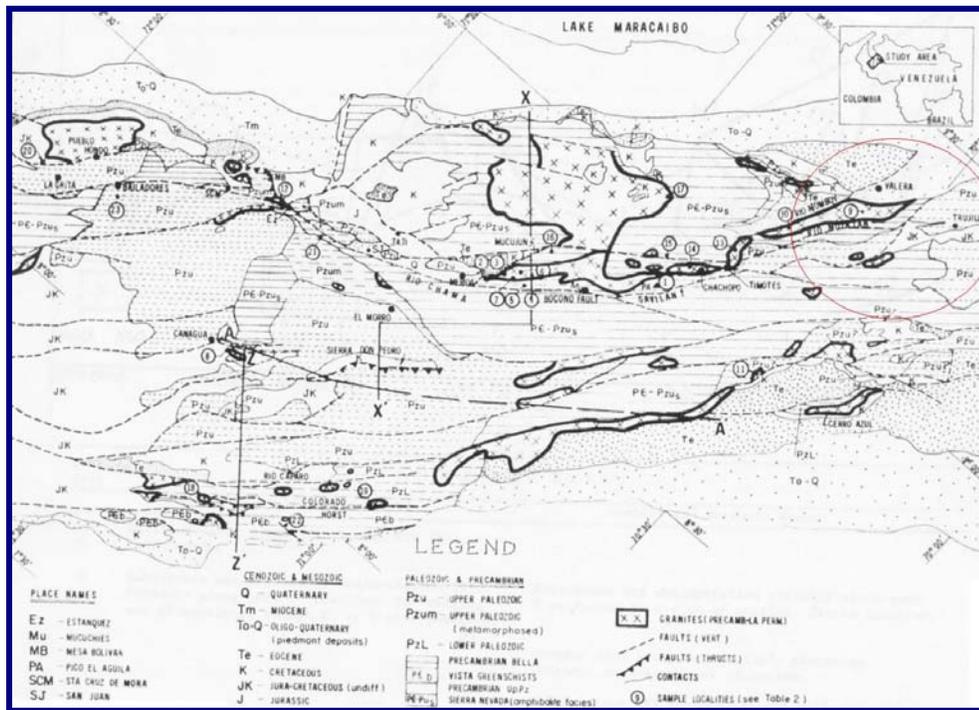
**Figura 48:** Discriminación de edades para el conjunto de datos B02. **(A)** Gráfico de densidades de probabilidades con los mejores ajustes, **(B)** Gráficos de dispersión radial “Radial Plot”.

En la Figura 48 **(A)** se muestra los ajustes binomiales para el conjunto de datos B02, nótese que hay dos curvas una de color azul que tiene dos máximos cuyo mejor ajuste se da en la parte izquierda, nótese que la curva roja sobre la azul tiene pequeñas inflexiones producto de la dispersión numérica y mal ajuste a la población del lado izquierdo cuyo máximo es alcanzado en 5.6 M.a. Para la población situada a la derecha el mejor ajuste lo da la curva roja que tiene un mayor ajuste dentro del histograma mientras que la azul está completamente afuera de las barras verticales, el máximo para este ajuste se encuentra en 21.1 M.a. Los gráficos radiales para este conjunto de datos se aprecian en la Figura 48 **(B)**, nuevamente se observan dos tendencias lo cual valida las observaciones realizadas en la gráfica de densidad de poblaciones Figura 48 **(A)** y en el histograma de frecuencias Figura 48 **(B)**.

#### **5.4.- Análisis de los resultados**

El levantamiento de los Andes Venezolanos ha sido ampliamente estudiado por Shagam et. al (1984) y por Kohn et.al (1984), en la figura 49, se muestra la zona donde estos autores recolectaron las muestras, y encerrada en la elipse de color rojo se muestra la zona más cercana del trabajo de estos autores con respecto a la zona seleccionada en este Trabajo Especial de Grado.

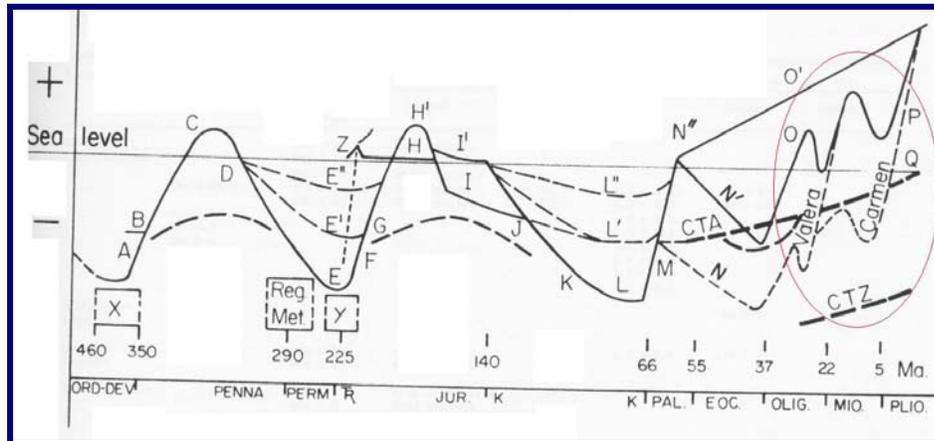
En las muestras estudiadas, básicamente se puede decir que hay dos poblaciones bien definidas una de aproximadamente entre 4.5 y 6 M.a y otra que está en un rango comprendido entre 21 y 27 M.a. La población más joven geológicamente se encuentra en el Plioceno- Mioceno, y la población más antigua se encuentra entre el Mioceno-Oligoceno. Estas poblaciones aparentemente coinciden con el trabajo de Shagam et al. (1984), quienes no tomaron la misma zona de estudio de este trabajo pero una cercana a ellas, estas zonas están próximas a los granitos de Valera y del Carmen con edades de los últimos eventos geológicos fechados por el Método de Huellas de Fisión en apatito de 25 M.a y 5 M.a respectivamente.



**Figura 49:** Mapa geológico de los Andes Venezolanos donde se especifica la toma de muestras realizada por Kohn *et. al* (1984) y Shagam *et. al* (1984).

(Tomado de Shagam *et. al*, 1984)

Los granitos estudiados por Shagam *et. al* (1984) y su contexto geológico pueden ser apreciados en la figura 50, marcado en una elipse de color rojo se resalta la cercanía de los terrenos fuentes a la zona de estudio. En el trabajo de Shagam *et. al* (1984) los terrenos fuentes son los Granitos del Carmen y Valera. Sin embargo cercano a la zona de estudio se encuentra el Granito de Monte Carmelo el cual no fue fechado por Shagam *et al*; posiblemente la edad del último evento geológico de este granito concuerde mejor con una de las poblaciones discriminadas en este trabajo.



**Figura 50:** Diagrama de representación de la historia de levantamiento y subsidencia de los Andes Venezolanos fechada por el Método de Huellas de Fisión.  
(Tomada de Shagam et. al, 1984)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología implementada en el programa Microsoft Excel para determinar poblaciones es un aporte de este trabajo, ya que los resultados obtenidos, coinciden con la validación realizada por el programa BINOMFIT, que contemplan dos poblaciones bien definidas; aunque no se realizó medidas de longitud de las huellas para el conjunto de granos estudiados, las edades corresponden a los últimos eventos geotérmicos, los cuales permitieron el paso de los granos de apatitos, por la isoterma de 110 °C. Estas edades abarcan un rango mínimo entre 5 y 6 M.a y otro máximo comprendido entre 21 y 26 M.a.

También es importante destacar que estas edades coinciden con las proporcionadas en las investigaciones sobre los últimos eventos geológicos, realizados sobre unos granitos pertenecientes a una zona muy cercana al área de estudio de este trabajo, realizadas por Shagam (1995). Específicamente se puede decir que, uno de los terrenos fuentes corresponde al granito de Valera, cuya edad del último evento geotérmico según Shagam es de 25 M.a y del granito del Carmen de 4 M.a.

El método de huellas de fisión en apatitos detríticos representa una herramienta muy útil en la datación de las molasas de los Andes Venezolanos, así como la importancia de los apatitos como único cronotermómetro.

Para discriminar mejor los terrenos fuentes y encontrar otros dentro de esta zona, se recomienda estudiar más granos en esta área, ya que no se llegó al contacto entre los Miembros San Alejo e Isnotú de la Formación Betijoque. También es importante continuar estudiando, las muestras aportados en este Trabajo Especial de Grado, identificadas como: VI-033, VI-037, VI-090, VI-091, VI-095, VI-097, y VI-101.

Igualmente para investigaciones futuras, se recomienda hacer análisis geoquímicos, difracción de rayos X entre otros para comprobar la procedencia de la mineralogía.

Además sería interesante datar el granito de Monte Carmelo, muy cercano a la zona de estudio, puesto que éste posiblemente será un terreno fuente.

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 disminuiría notablemente, el tiempo de procesamiento y el costo de los líquidos pesados.

Por último podemos decir, que este trabajo especial de grado permitió colocar en funcionamiento los siguientes equipos: pertenecientes al Laboratorio de Termocronología de la UCV: tamizadora, mesa de sacudidas Wilfley, mesas de secado, horno isotemp, campanas de extracción, ultrasónico.

## BIBLIOGRAFIA

Anguita (1988) *Origen e Historia de la Tierra*, ed. Rueda, 679 p.

Akasofu, Syun-Ichi (1989). La aurora dinámica, investigación y ciencia. (154), Julio, 42-50 p.

Banks P.B., Burkley L.A., Kohn B.P., y Shagam (1984). Mesozoic Pleistocene fission track ages an rocks of the Venezuelan Andes y their tectonic implications geological society of America, Memoria, (162), 365-384 p.

Bisquert J., Manzanares J., Mafé (1992). Determinación experimental del momento dipolar magnético, un modelo estático y dos dinámicos. Revista Española de Física, V-6, (02), 43-47 p.

Bloxham J. y Gubbins (1997) *La evolución del campo magnético terrestre*, 679 pp.

Brandon, Mark (2002). Decomposition of mixed grain age distribution using binomfit, on Track, (24), 13-18 p.

Comisión Venezolana de Estratigrafía y Terminología (C.V.E.T II) (1970) *Léxico Estratigráfico de Venezuela*, segunda Edición, Bol. Geol.Public. Esp. 4, 756p.

Don, E. (1973) *Tiempo Geológico*. Ediciones Omega, S.A. 150-162 p.

Edward T., Frederick L. (1999) *Ciencias de la Tierra*, Pentice Hall, Madrid, 174-194 p.

Enciclopedia Microsoft, (2001) Encarta 2001, 342p.

Gleadow, A. J. y Lovering, J. F. (1974). *The effect of weathering on fission track dating*, Earth Planet Sci. Letters, (22), 163-168 p.

González de Juana (1980) *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*. Caracas, Foninves, tomo I y II, 1031 p.

Green, P.F. (1981). *A new look at statistics in fission track dating* Nucl. Tracks, Vol.5, (12), Great Britain 77-86 p.

Gunther, W. (1977), *Principles of Isotope Geology*, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 95 págs.

Gunther, W. y Van Don Haute, P. (1992) *FissionTrack Dating*, Solid Earth Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 158 p.

Gunther, W. (1992). *Fisión Track Dating*. Solid Eath Sciences, Volumen 6, Dordrecht, 275 p.

Hess (1959). Notes on Operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator Princeton University, 87p.

Kohn, B., O'Sullivan, P. y Shagam (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, (27), 229 p.

Khon, B. y Shagam (1984). Mesozoic Pleistoceno Fission Track ayer on rock of the Venezuela Andes and their Tectonic implications. *Geological Society of America* Memor 162.

Memoria cuarto IV Congreso Geológico Venezolano, tomo II 1972.

Memoria segundo II Congreso Latinoamericano de Geología, tomo III 1973.

Mora, J. (1995). *Método de Huellas de Fisión*, Universidad Central de Venezuela 71 p. Inédito.

Muller, Katuska (1991). *Estudio Geológico de Una Zona Ubicada Entre Las Poblaciones de Chejende y Cuicas Distrito Caracche Estado Trujillo*. Escuela de Geología Minas y Geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

Stokes, William L. (1969) *Historia de la Tierra*, ED. Continental, México, 557-562p.

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

Menéndez C. y Pérez J. (1992). *Modelo Estructural del Flanco Norandino entre las poblaciones La Fría-Bocono-Sabana Grande- El Cobre, Estado Trujillo*. Escuela de Geología Minas y Geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

Twenhofel y Tyler (1941). *Methods of Study of sediments*, 48p.

**Paginas Web consultadas:**

<http://www.pdvsa.com/lexico>,[Consultado 2002, noviembre 12]

<http://www.amsac.com.mx/mminer/enero/ene99a3.html>,[Consultado 2002, octubre 26]

<http://maloka.org/virtual/energia/nucl03.htm>,[Consultado 2002, noviembre 12]

<http://www.geocities.com/capeCanaveral/Lab/6093/MetodoRb-Sr.htm>,[Consultado 2003, enero 21]

[http://www.foronuclear.org/flash/fl\\_ant/135b.htm](http://www.foronuclear.org/flash/fl_ant/135b.htm) 135-B (Fuente: La Recherche, septiembre 1999) ,[Consultado 2002, octubre 26]

<http://club.telepolis.com/origenes/yacimientos/metodosdatacion.html#Huellas de Fisi3n>,[Consultado 2002, noviembre 12]

[http://apatite.union.edu/\(2000\)](http://apatite.union.edu/(2000)) ,[Consultado 2003, febrero 12]

<http://www.geocities.com/capeCanaveral/Lab/6093/MetodoRb-Sr.htm>(1990),[Consultado 2003, febrero 15]

[http://www.foronuclear.org/flash/fl\\_ant/135b.htm](http://www.foronuclear.org/flash/fl_ant/135b.htm) 135-B (Fuente: La Recherche, septiembre 1999) ,[Consultado 2002, octubre 01]

<http://club.telepolis.com/origenes/yacimientos/metodosdatacion.html#Huellas de Fisi3n>,[Consultado 2002, noviembre 12]

<http://geologia.igeolcu.unam.mx/academia/Posgrado/Alumnos/SolariL/Separador%20magn%E9tico%20Frantz%20LB1.pdf>,[Consultado 2002, mayo 19]

<http://cic.ugr.es/tims.htm>,[Consultado 2002, noviembre 12]

<http://www.cosapidata.com.pe/khrlos/enlaces.htm>,[Consultado 2002, mayo 19]

[http://web.ccr.jussieu.fr/radioactivite/espanol/que\\_es\\_la\\_radioactividad.htm](http://web.ccr.jussieu.fr/radioactivite/espanol/que_es_la_radioactividad.htm),[Consultado 2002, octubre 10]

<http://web.descubrimiento.htm>[descubrimiento.htm](http://web.descubrimiento.htm)[maccueil.htm](http://web.descubrimiento.htm),[Consultado 2002, noviembre 12]