

**ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM) DEL MIEMBRO  
SUPERIOR DE LA FORMACIÓN AMAGÁ, SECCIÓN QUEBRADA  
SABALETICAS, SUROCCIDENTE ANTIOQUEÑO**

**M. JACKELINE RAMÍREZ LONDOÑO**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
GEOLOGÍA  
MEDELLÍN  
2012**

**ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DEL MIEMBRO  
SUPERIOR DE LA FORMACIÓN AMAGÁ, SECCIÓN QUEBRADA  
SABALETICAS, SUROCCIDENTE ANTIOQUEÑO**

**M. JACKELINE RAMÍREZ LONDOÑO**

**Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al  
título de Geóloga**

**Directoras:**

**Inga. Geóloga – Msc. GLORIA MARÍA SIERRA LOPERA**

**Inga. Geóloga – PhD. MARÍA ISABEL MARÍN CERÓN**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
GEOLOGÍA  
MEDELLÍN**

**2012**

A Dios...

## **AGRADECIMIENTOS**

A Javi, por estar siempre conmigo.

A mis padres, mis hermanos y al Cielo, por ser tan especiales y apoyarme en todo momento.

A Gloria Sierra, un aprecio especial por sus enseñanzas, colaboración y por darme la oportunidad de aprender.

A María Isabel Marín, un aprecio especial por sus enseñanzas, colaboración y por la paciencia que me tuvo hasta el último nanosegundo.

A Diego Q., Pablo M., Jorge H., Diego S., los compañeros inigualables que hicieron de la universidad el mejor lugar para gozar y compartir.

A Andrea y Varnady que aunque ya no están, fueron mis compañeros de corazón, con los que inicié y por los que siempre he sentido el mayor de los afectos.

A la ingeniera Carola, por su increíble compañía.

A Martín Chadima, por su disposición, paciencia y por tener siempre tiempo para mis dudas.

A María, Wilton y demás personal del Departamento de Geología, que siempre estuvieron presentes.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	3
1. OBJETIVOS.....	4
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. JUSTIFICACIÓN.....	5
3. MARCO TEÓRICO .....	6
3.1 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (SM) .....	6
3.1.1 Fuente de hierro en rocas sedimentarias.....	8
3.2 ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM) .....	11
3.2.1 Clasificación de la fábrica magnética.....	13
3.2.2 Parámetros escalares ASM.....	14
3.2.2.1 Susceptibilidad magnética promedio (Km) .....	14
3.2.2.2 Grado de anisotropía corregida (P´).....	15
3.2.2.3 Parámetro de la forma (T) .....	15
3.2.2.4 Lineación magnética (L).....	15
3.2.2.5 Foliación magnética (F).....	15
4. METODOLOGÍA .....	17
5. ÁREA DE ESTUDIO .....	19
5.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL .....	21
5.1.1 Eventos tectónicos al NW de Suramérica.....	22
5.1.2 Geología Regional .....	24
5.1.2.1 Metasedimentitas de Sinifaná.....	24
5.1.2.2 Formación Quebradagrande.....	24

5.1.2.3 Miembro Inferior de la Formación Amagá .....	24
5.1.2.4 Formación Combia.....	25
5.1.3 Geología Estructural .....	25
5.2 GEOLOGÍA LOCAL .....	28
5.2.1 Formación Amagá.....	28
5.2.2 Columna estratigráfica de referencia .....	29
5.2.3 Petrografía .....	31
5.2.4 Minerales densos .....	32
5.2.5 Estudios de ASM en la zona .....	34
6. MUESTREO TÉCNICO.....	36
6.1 EQUIPO DE MUESTREO.....	36
6.2 MUESTREO.....	37
6.3 TRABAJO DE LABORATORIO.....	40
7. RESULTADOS.....	43
7.1 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.....	43
7.2 ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.....	48
7.2.1 Fábrica magnética.....	48
7.2.2 Parámetros escalares ASM.....	49
8. DISCUSIÓN .....	53
8.1 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.....	53
8.2 ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.....	56
9. CONCLUSIONES .....	61
10. RECOMENDACIÓN.....	63
REFERENCIAS .....	64
ANEXOS .....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contribución mineral a la susceptibilidad de una roca. ....	7
Figura 2. Elipsoide magnético con la posición de los ejes principales. ....	12
Figura 3. Secuencia de fábrica magnética. ....	14
Figura 4. Ejemplo de una fábrica primaria en una roca sedimentaria. ....	16
Figura 5. Diagrama metodológico. ....	18
Figura 6. Localización del área de estudio. ....	20
Figura 7. Marco geológico regional. ....	22
Figura 8. Mapa geológico local. ....	27
Figura 9. Columna estratigráfica base. ....	30
Figura 10. Diagrama composicional de la Petrofacie 1 del Miembro Superior de la Formación Amagá. ....	31
Figura 11. Diagrama composicional de la Petrofacie 2 del Miembro Superior de la Formación Amagá. ....	32
Figura 12. Distribución de los principales minerales densos. ....	33
Figura 13. Resultados de estudios de ASM realizados en la Formación Amagá. ....	35
Figura 14. Equipo para toma de muestras para ASM. ....	37
Figura 15. Protocolo para muestreo de ASM para muestras cilíndricas. ....	40
Figura 16. Kappabridge MFK1 – FB. ....	42
Figura 17. Gráfica de SM a lo largo de la columna estratigráfica. ....	46
Figura 18. Mapa de ubicación muestreo ASM. ....	50
Figura 19. Relación de valores de T y Pj. ....	52
Figura 20. Estereogramas generales para la Unidad 3 y 4. ....	57
Figura 21. Diagramas de relación entre Lineación magnética y Foliación magnética. ....	58
Figura 22. Esquema del modelo de procesos que incidieron en la deformación del Miembro Superior de la Formación Amagá. ....	59

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Susceptibilidades de algunos minerales paramagnéticos y diamagnéticos.....	9
Tabla 2. Distribución de minerales densos en la Quebrada Sabaleticas. ....	33
Tabla 3. Susceptibilidad magnética a lo largo de la quebrada Sabaleticas .....	44
Tabla 4. Valores de los parámetros de ASM.....	49

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Coordenadas de los sitios muestreados para ASM. ....	71
Anexo 2. Planilla para toma de datos en campo de muestras para análisis paleomagnéticos.....	72
Anexo 3. Posiciones de medida para ASM en muestras cilíndricas .....	73
Anexo 4. Plantilla para ingreso de datos al software para ASM.....	74
Anexo 5. Estereogramas con las orientaciones axiales de los elipsoides de ASM y diagramas de Pj vs.Km y T vs. Pj. ....	75
Anexo 6. Gráfica de relación Lineación magnética vs. Foliación magnética.....	81

## RESUMEN

La anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) es una herramienta útil para el análisis de la fábrica magnética de las rocas y de las deformaciones a que han sido sometidas. La fábrica magnética refleja la orientación preferente de la forma de los granos y/o la orientación de todos aquellos minerales que contribuyen a la susceptibilidad magnética. Esto responde al hecho de que la susceptibilidad magnética definida como la capacidad de un cuerpo de ser magnetizado, es una propiedad anisotrópica de los minerales. De tal forma, las variaciones en la orientación e intensidad de la fábrica quedan reflejadas como variaciones en la ASM. La determinación de la ASM es una técnica sencilla y rápida, donde las fábricas magnéticas anisotrópicas se expresan matemáticamente como un tensor de segundo orden y geoméricamente mediante un elipsoide, cuyos ejes  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  representan respectivamente el eje máximo, intermedio y mínimo, y las relaciones entre ellos determinan los parámetros anisotrópicos que establecen las características del elipsoide.

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos de ASM en la sección quebrada Sabaleticas en el SW antioqueño e indican la existencia de al menos dos eventos deformacionales en el Miembro Superior de la Formación Amagá. Estas deformaciones se pueden correlacionar con las descritas por otros autores en zonas a lo largo del sistema Cauca-Romeral. El análisis global de los resultados, se correlacionan con los eventos de depositación, enterramiento, y levantamiento de los sedimentos de la cuenca Amagá y la superposición de eventos compresionales asociados a la Orogenia Andina.

Adicionalmente, los resultados bajos de la susceptibilidad magnética pueden explicarse a partir de los componentes mineralógicos, netamente diamagnéticos predominantes en las areniscas analizadas y la presencia de cementante calcáreo.

Todo el trabajo concerniente a toma de muestras en campo, preparación y procesamiento de muestras para los análisis de laboratorio, se realizaron con las herramientas y equipos del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad EAFIT (Convenio ANH – Colciencias – Red Nacional de Laboratorios de Geociencias (RNLG) - EAFIT).

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en el Proyecto de Adecuación del Laboratorio de Paleomagnetismo que desarrolla la Universidad EAFIT con el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y la Red Nacional de Laboratorios de Geociencias (RNLG).

Este trabajo tiene como objetivo aplicar la técnica de ASM en el Miembro Superior de la Formación Amagá a través de la cual se analiza la fábrica magnética constituyente de la roca, su mineralogía magnética y la dirección preferente de sus granos, lo que permite conocer la existencia de los procesos bien sea depositacionales y/o tectónicos que la han afectado.

Para llevar a cabo el trabajo de anisotropía de susceptibilidad magnética, se realizó un muestreo técnico sobre 9 afloramientos a lo largo de la quebrada Sabaleticas, sobre estratos de areniscas. Para el muestreo se siguió el protocolo existente para la obtención de muestras para estudios paleomagnéticos. Para el análisis de susceptibilidad magnética se usaron 18 muestras de roca en sedimento, tomados en estratos tanto de areniscas como de limolitas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Aplicar la técnica de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en las rocas de la Formación Amagá (Miembro Superior), sección quebrada Sabaleticas, suroccidente antioqueño, para el análisis de la fábrica magnética.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Efectuar el muestreo técnico para análisis de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en la quebrada Sabaleticas.
- Realizar un análisis de susceptibilidad magnética (SM) en las rocas de la quebrada Sabaleticas.
- Realizar el análisis de fábrica magnética de las rocas a partir de la ASM.
- Discutir las relaciones entre los parámetros de la ASM que permitan determinar la existencia de procesos de depositación y/o deformación para el Miembro Superior de la Formación Amagá, sección quebrada Sabaleticas.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El entendimiento del marco geodinámico en el que se ha originado y evolucionado la cuenca Carbonífera Amaga, específicamente la Formación Amagá (Miembro Superior) permitirá avanzar en la comprensión de la geología regional del noroccidente colombiano. En este trabajo se aplica el método de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) como herramienta eficaz para el análisis de fábricas magnéticas que permiten comprender la evolución de los procesos deformacionales. Igualmente, el análisis de la susceptibilidad magnética de las rocas analizadas junto al estudio petrográfico y de minerales densos realizado por otros autores, permitirán un mayor entendimiento de los análisis de proveniencia en el sector.

Si bien este trabajo será un aporte al conocimiento de la geología de la Formación Amagá, servirá también para ampliar la base de datos paleomagnéticos de nuestra geología local, que ayude en un futuro en la construcción de un mapeo estructural de procesos deformacionales a partir de elementos alternativos, en aras de un mejor entendimiento de la evolución y desarrollo de la parte noroccidental de Colombia, zona de gran importancia al momento de emprender programas y estudios de exploración de recursos minerales.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (SM)

La susceptibilidad magnética (SM) es una propiedad física de los minerales que constituyen las rocas y representa la respuesta o capacidad de éstas a ser magnetizadas bajo un campo magnético externo determinado (Dinarès-Turell *et al*, 1991). Esta propiedad varía con la temperatura en la mayoría de los materiales, y depende de la concentración, forma, tamaño y tipo de grano que conforma la roca y de la magnitud del campo externo (Tarling and Hrouda, 1993).

La SM es adimensional y está definida por la expresión:

$$K = M / H$$

Donde:

M = Magnetización (A/m)

K = Susceptibilidad Magnética

H = Campo Magnético (A/m)

Las propiedades magnéticas de los sólidos son determinadas fundamentalmente por átomos individuales y por los electrones asociados a éstos. Dichos átomos puede tener un número considerable de electrones, cada uno con su espín asociado, un momento angular orbital determinado y un momento magnético asociado a cada uno de ellos. El momento magnético del átomo es la suma de todos los momentos magnéticos electrónicos (Tarling and Hrouda, 1993). Si los momentos magnéticos de todos los electrones están orientados de tal forma que se cancelan mutuamente, el átomo como un todo no tendrá momento magnético (diamagnetismo). Si los momentos magnéticos sólo se cancelan de forma parcial, el átomo conservará un momento magnético remanente que permitirá en la práctica poder clasificar los minerales en paramagnéticos y ferromagnéticos. Los minerales se clasifican, de acuerdo a su magnetización en:

- Diamagnéticos, presentan valores de susceptibilidad negativa ( $K < 0$ ) debido a que la magnetización en estos casos se da en sentido opuesto al campo magnético. Incluyen minerales como el cuarzo, feldespatos y calcita.
- Paramagnéticos, registran valores de susceptibilidad positivos pero bajos ( $K > 0$ ), ya que su magnetización es débil. Incluyen algunos minerales que contengan hierro y sal como biotita, olivino, sulfatos ferrosos.
- Ferromagnéticos, muestran valores de susceptibilidad altos y positivos ( $K \gg 0$ ). Incluyen minerales como magnetita, pirita.

Todos los granos minerales dentro de una roca contribuyen a su susceptibilidad total, pero su influencia individual depende de su susceptibilidad intrínseca, así como de su concentración (Tarling and Hrouda, 1993), Figura 1.

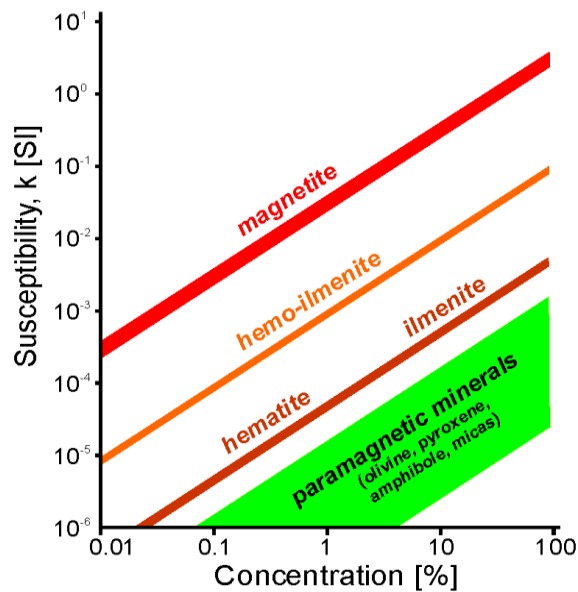


Figura 1. Contribución mineral a la susceptibilidad de una roca (Tomado de AGICO, 2011).

La Tabla 1 muestra los valores de susceptibilidad para algunos minerales (Tarling and Hrouda, 1993).

La medida de susceptibilidad magnética en rocas es una herramienta esencial para las investigaciones en ciencias de la Tierra y sus usos son numerosos. La susceptibilidad magnética es empleada para calcular la concentración de minerales magnéticos, con el propósito de ayudar a identificar rocas. Los registros de susceptibilidad son empleados para determinar sedimentos de aluvión en ambientes lacustres y marinos, y para precisar cambios estratigráficos en núcleos de sedimentos marinos profundos. Así mismo, las mediciones de susceptibilidad magnética son empleadas para relacionar el cambio climático, así como para entender las relaciones océano y clima (Berner, 1971).

De otro lado, la SM se aplica también al estudio de suelos y paleosuelos, dada su sensibilidad a los minerales de hierro, aún en concentraciones muy bajas. La variación de los parámetros magnéticos refleja cambios ambientales (Bartel *et al*, 2005).

### 3.1.1 Fuente de hierro en rocas sedimentarias

Los depósitos pueden formarse en ambientes continentales, transicionales o marinos marginales. El hierro es aportado a los ambientes sedimentarios por procesos de meteorización y por actividad volcánica, relacionada con volcanismo lávico, piroclástico y con emanaciones termales (Berner, 1971).

Tabla 1. Susceptibilidades de algunos minerales paramagnéticos y diamagnéticos.  
Tomado de Tarling and Hrouda, 1993

<b>Mineral</b>	<b>Susceptibilidad media (x 10<sup>-6</sup> SI)</b>
<b><i>Minerales Paramagnéticos</i></b>	
Anfíbol	750 - 1368
Hornblenda	746 - 1368
Actinolita	490
Olivino	124 - 4279
Piroxenos	121 - 3700
Granate	502- 6780
Glaucofana	787
Clorita	70 - 1550
Micas	36 - 3040
Biotita	998 - 1290
Flogopita	1178
Moscovita	122 - 165
Siderita	3980
<b><i>Minerales Diamagnéticos</i></b>	
Cuarzo	-13,4 a -15,4
Calcita	-13,8
Ópalo	-12,9
Ortoclasa	-13,7
Aragonito	-15,0
Halita	-10,3
Dolomita	-38,0

Los procesos de meteorización son de gran importancia como proveedores de hierro a los ambientes marinos. El hierro puede ser liberado de rocas máficas y de minerales ferromagnesianos bajo condiciones de clima húmedo y tropical, produciéndose así aguas cargadas en hierro. Los componentes ferruginosos pueden también ser transportados como componentes adsorbidos en materia orgánica. Una vez depositadas, tanto las arcillas como la materia orgánica pueden liberar el hierro bajo condiciones de Eh y pH adecuadas (Berner, 1971).

El hierro férrico es más estable en condiciones oxidantes y alcalinas, mientras que el ferroso lo es en condiciones reductoras y ácidas.

Los principales minerales de hierro en las rocas sedimentarias son:

- Óxidos: Magnetita, hematita, goethita, limonita.
- Carbonatos: Siderita, ankerita.
- Silicatos: Glauconita
- Sulfuros: Pirita, pirrotina.

En ambientes óxicos se favorece la formación de hematita, goethita, en ausencia de materia orgánica (Berner, 1971). En contraste, en ambientes anóxicos (comunes en diagénesis temprana), se favorece la formación de pirita, glauconita, siderita y la transformación de materia orgánica (Berner, 1971).

La hematita puede ser un mineral primario (precipitado a partir de óxidos férricos hidratados) y también lo hace como producto de reemplazo sinsedimentario (Berner, 1971). La siderita es común en ambientes lacustres transicionales, también puede ser un precipitado mesogenético (cemento) (Berner, 1971).

La pirita se forma a partir de un predecesor amorfo en sedimentos organógenos de ambientes deficientes en oxígeno. Precipita en los fondos marinos anóxicos, pero también se concentra en ambientes estuarinos y en planicies mareales.

La glauconita se forma en ambientes marinos de plataforma. La concentración de glauconita podría estar vinculada con muy bajo ritmo de acumulación sedimentaria y condiciones transgresivas (Páez *et al*, 2011).

### **3.2 ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM)**

La fábrica magnética refleja la orientación preferente de todos aquellos minerales que contribuyen a la susceptibilidad magnética, de modo que las variaciones en la orientación e intensidad de la fábrica magnética de las rocas quedan reflejadas como variaciones en la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética. La ASM se define como un tensor simétrico de segundo orden en el que la magnitud y orientación de sus principales direcciones ( $K_1, K_2, K_3$ , donde  $K_1 \geq K_2 \geq K_3$ ) depende de una compleja función de varios factores tales como la mineralogía, forma, tamaño, distribución y concentración del grano (Tarling y Hrouda, 1993). La forma de este tensor depende de la fábrica mineral ferromagnética en la roca y refleja la orientación estadística preferente de granos y redes cristalinas de todas sus fases minerales. (Hrouda, 1973).

Gráficamente, la ASM se expresa mediante un elipsoide (Figura 2) cuyo eje mayor del elipsoide magnético ( $K_{\max} = K_1$ ) es paralelo a la lineación magnética y el eje corto del elipsoide ( $K_{\min} = K_3$ ), es normal a la foliación magnética (Hrouda, 1982; Borradaile, 1988).

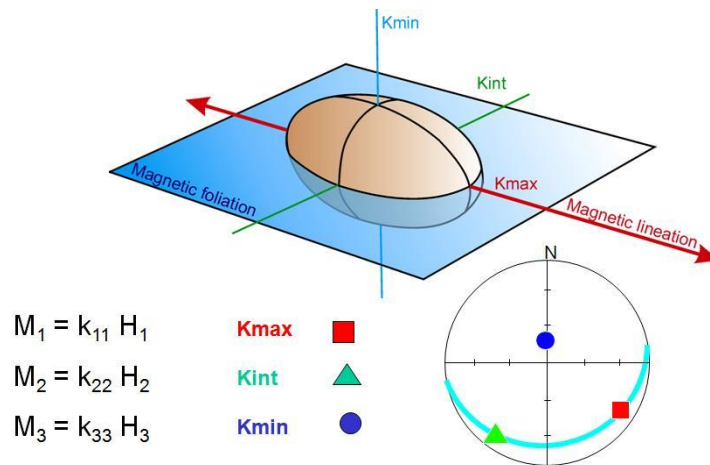


Figura 2. Elipsoide magnético con la posición de los ejes de fábrica magnética  $K_{max} > K_{int} > K_{min}$  (Tomado y modificado de Tarling and Hrouda, 1993).

Se ha comprobado que este elipsoide se puede corresponder con la orientación de las fábricas sedimentaria, magnética o tectónica de las rocas (Hrouda y Stranik, 1985; Lowrie y Hirt, 1987; Parés, 1988; Hrouda y Lanza, 1989). En el caso de rocas deformadas, las susceptibilidades principales a menudo se corresponden con las direcciones principales de la deformación determinadas a partir de marcadores convencionales, y por lo tanto el elipsoide de susceptibilidad magnética es coaxial con el elipsoide de deformación finita (Rathore, 1979; Borradaile, 1988).

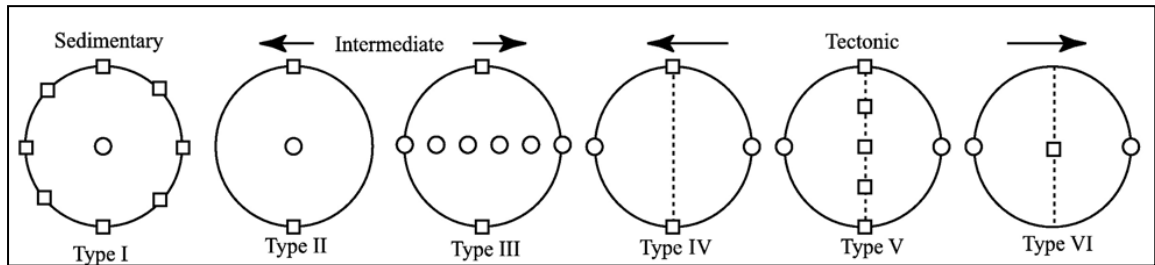
Numerosos estudios se han centrado en el grado de equivalencia cualitativa y cuantitativa entre la deformación natural y la fábrica magnética de las rocas (Gil y Parés, 1996). Estos estudios demuestran que en rocas deformadas los ejes principales del elipsoide de la susceptibilidad coinciden con las direcciones principales del elipsoide de deformación (Rathore, 1979; Hrouda y Janák, 1976; Borradaile y Tarling, 1981; Parés y Dinarés-Turell, 1993). De este modo el eje de susceptibilidad mínima ( $K_{min}$ ) coincide con la dirección media del polo de la esquistosidad y la lineación magnética, definida por el agrupamiento de los ejes de susceptibilidad máxima ( $K_{max}$ ), es paralela a la lineación de estiramiento mineral.

Las fábricas magnéticas primarias son aquellas adquiridas por las rocas sedimentarias o volcánicas durante su depositación. Eventos de deformación sobre las rocas modifican estas fábricas primarias causando lineaciones o fábricas tectónicas con las estructuras (Tarling and Hrouda, 1993).

Por lo anterior, al igual que el análisis estructural, la ASM puede ser empleada para analizar distintos aspectos relacionados con la historia deformacional sufrida por la roca (Avervuch *et al.*, 1992; Parés *et al.*, 1999). La técnica de la ASM es entonces una herramienta de gran utilidad para el análisis de efectos tardíos en la historia deformacional de rocas multideformadas (Pueyo *et al.*, 2004). A diferencia de los métodos clásicos de análisis de la deformación finita de las rocas, la fábrica magnética derivada del análisis de la ASM constituye una técnica no destructiva y de rápida aplicación, muy ventajosa que permite su aplicación a una gran variedad de materiales.

### 3.2.1 Clasificación de la fábrica magnética

Para clasificar las fábricas magnéticas se usó el método propuesto por Robion *et al.*, (2007). En este método las fábricas magnéticas son subdivididas en seis tipos, siendo el tipo I una fábrica magnética de origen sedimentario, mientras que el tipo VI corresponde a una fábrica de origen tectónico (Figura 3).



□ Eje máximo de susceptibilidad,  $K_1$       ○ Eje mínimo de susceptibilidad,  $K_3$

Figura 3. Secuencia de fábrica magnética. Tomado de Robion *et al.*, (2007).

### 3.2.2 Parámetros escalares ASM

A partir de los ejes del elipsoide magnético, los parámetros escalares calculados son:

#### 3.2.2.1 Susceptibilidad magnética promedio ( $K_m$ )

$K_m = (K_1 + K_2 + K_3) / 3$ ; donde  $K_1 = K_{max}$ ;  $K_2 = K_{int}$ ;  $K_3 = K_{min}$ .  $K_m$  depende de las propiedades magnéticas intrínsecas y del hábito de los minerales en la roca (Tarling and Hrouda, 1993).

Como se mencionó anteriormente, la orientación y forma del elipsoide de susceptibilidad magnética quedan definidas por los ejes principales  $K_{max}$ ,  $K_{int}$  y  $K_{min}$ . Cuando  $K_{max} \approx K_{int} \gg K_{min}$  el elipsoide tiene forma aplastada y la fábrica magnética define una foliación magnética con  $K_{min}$  perpendicular a ésta (definida por el plano que contiene  $K_{max}$  y  $K_{min}$ ). En el caso en que  $K_{max} \gg \gg K_{int}$  el elipsoide es de tipo alargado y se habla de lineación magnética (Dinarés-Turell *et al.*, 1991). Las razones axiales para estos conceptos vienen dadas por:

### 3.2.2.2 Grado de anisotropía corregida ( $P'$ )

$P' = P_j = \exp [2(\eta_1 - \eta)^2 + (\eta_2 - \eta)^2 + (\eta_3 - \eta)^2]^{1/2}$ , donde:  $\eta_1 = \ln K_1$ ;  $\eta_2 = \ln K_2$ ;  $\eta_3 = \ln K_3$ ;  $\eta = \ln(K_1 + K_2 + K_3) / 3$  (Jelínek 1981; Hrouda, 1982), que considera la forma del elipsoide y está relacionado a la intensidad de la anisotropía ( $P' \geq 1$ ). Si la muestra no presenta anisotropía, entonces  $P'$  es igual a 1 (Figura 4).

### 3.2.2.3 Parámetro de la forma ( $T$ )

$T = [2 \ln (K_2 / K_3) / \ln (K_1 / K_3)] - 1$ , (Jelínek 1981; Hrouda, 1982), define la simetría de la fábrica magnética o la forma de la trama mineral ( $-1 \leq T \leq +1$ ). Si  $T \leq 0$  la forma de elipsoide magnético es alargada (prolato) indicando fábrica linear; si  $T \geq 0$ , el elipsoide magnético tiene forma achatada (oblato o planar) (Figura 4).

### 3.2.2.4 Lineación magnética ( $L$ )

$L = K_1 / K_2$ , está dada por la relación entre los ejes máximo e intermedio, y la dirección de  $K_1$  representa la dirección de lineación (Tarling and Hrouda, 1993).

### 3.2.2.5 Foliación magnética ( $F$ )

$F = K_2 / K_3$ , está dada por la relación entre los ejes intermedio y mínimo, y la dirección de  $K_3$  representa el polo del plano de foliación (Tarling and Hrouda, 1993).

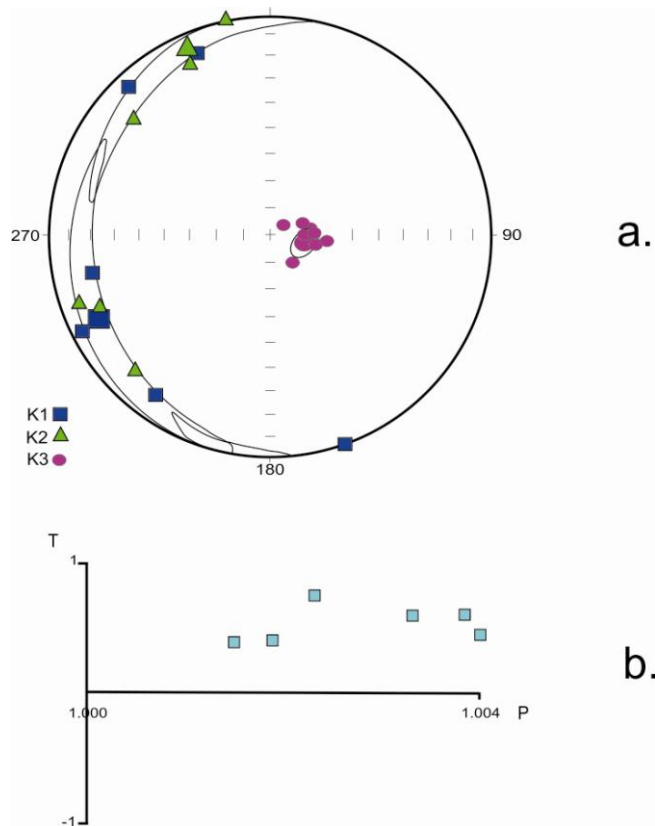


Figura 4. a). Ejemplo de una fábrica primaria en una roca sedimentaria y la distribución de los ejes principales, con  $K_3$  vertical,  $K_1$  y  $K_2$  formando una lineación magnética paralela a la estratificación. b). Gráfica del parámetro de forma (T) y grado de anisotropía (Pj), indicando formas de discos con anisotropía intermedia a alta (Tomado y modificado de Tarling y Hrouda, 1993).

#### **4. METODOLOGÍA**

Para la realización de este proyecto se siguió la metodología presentada en la Figura 5. En los apartados siguientes se detalla el correspondiente trabajo de oficina, campo y de laboratorio.

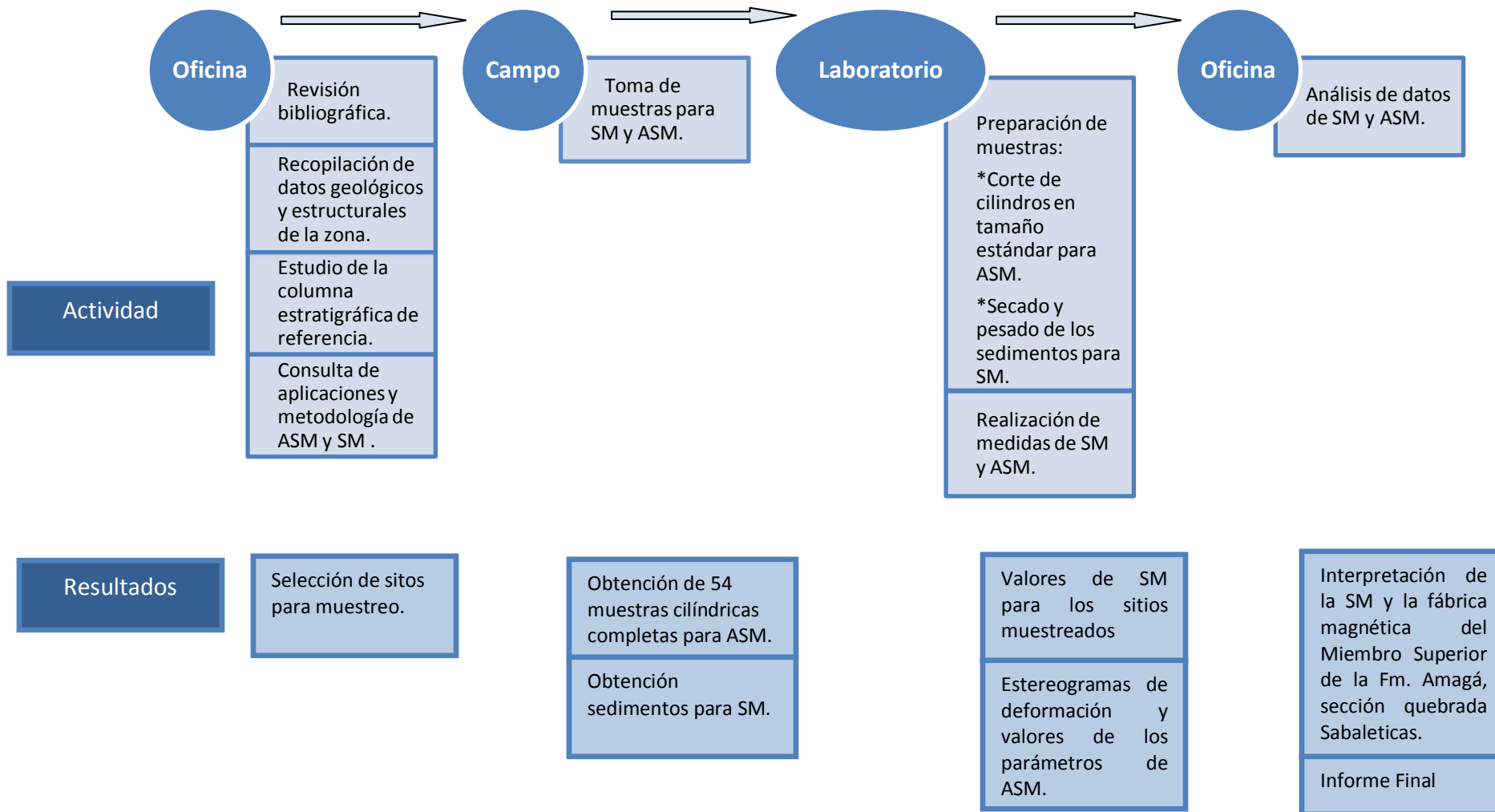


Figura 5. Diagrama metodológico.

## **5. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco Occidental de la cordillera Central, en el Suroccidente del departamento de Antioquia. La zona se encuentra cartografiada en la plancha 166-IV-A Jericó, a escala 1:25.000 del IGAC (1979). La quebrada Sabaleticas, con una longitud aproximada de 5700m nace en el municipio de Damasco y corre hacia el noroeste para desembocar en el río Poblano (Figura 6). El trabajo de muestreo en campo se realizó sobre la secuencia que aflora a lo largo de esta quebrada.

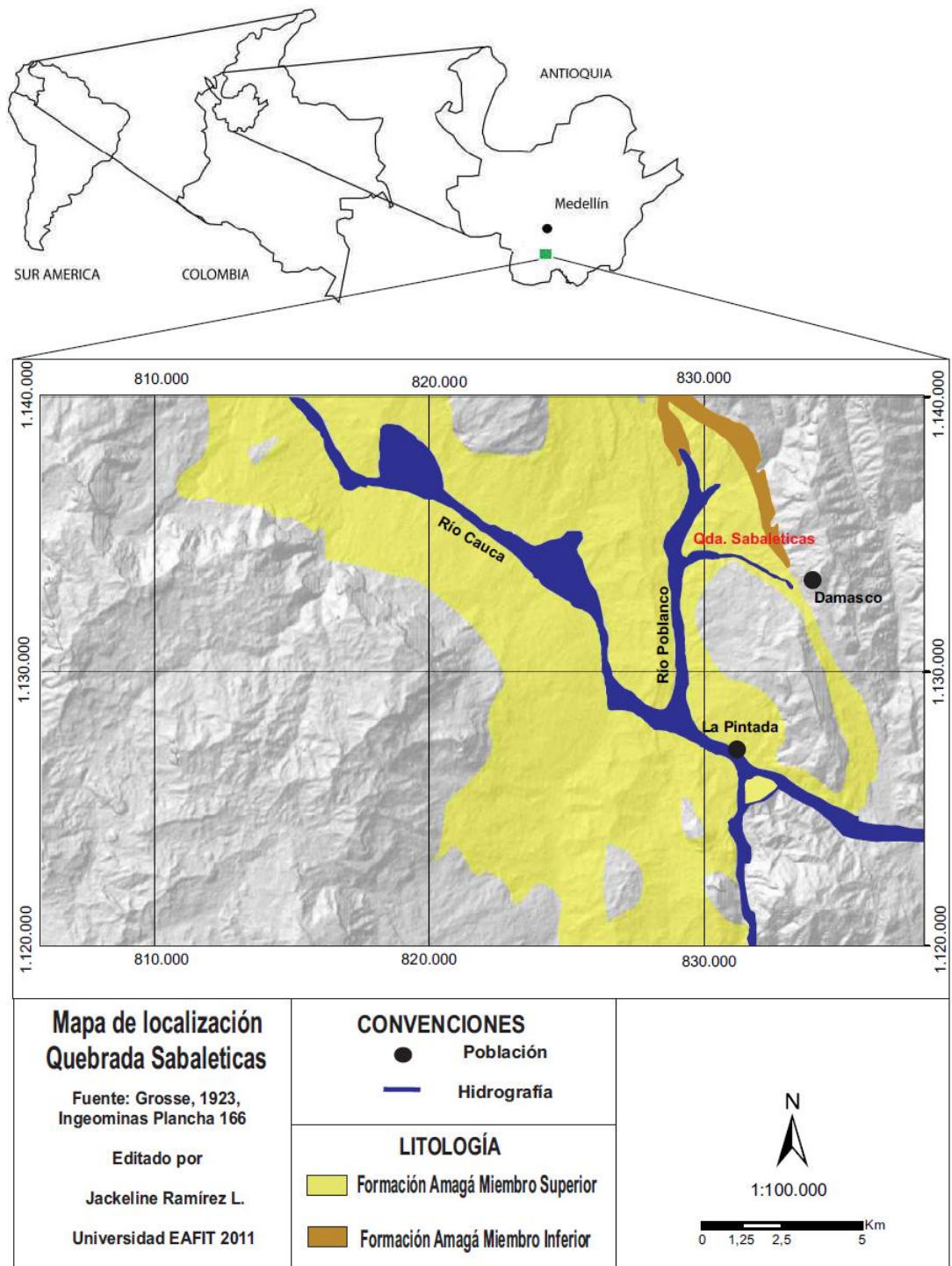


Figura 6. Localización del área de estudio. Quebrada Sabaleticas al suroccidente antioqueño.

## 5.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La esquina noroccidental de Suramérica está sometida a esfuerzos y deformaciones provenientes de la interacción entre las placas litosféricas Suramericana, Nazca y Caribe y dos bloques denominados microplacas de Panamá – Costa Rica y Andes del Norte (Pennington, 1981; Kellogg *et al.*, 1985) (Figura 7).

Actualmente las placas Nazca y Caribe convergen con la Suramericana (Pennington, 1981; Kellogg y Bonini, 1982); la microcuenca de Panamá – Costa Rica continúa su movimiento hacia el ENE y su colisión contra el bloque Andes del Norte (Mann y Corrigan, 1990; Kellogg y Vega, 1995), el cual a su vez tiende hacia el NNE respecto a Suramérica (Pennington, 1981; Ego *et al.*, 1996; Trenkamp *et al.*, 2002).

Los movimientos de estas placas han llevado a múltiples procesos de sedimentación, plutonismo, volcanismo y metamorfismo que dominaron en mayor o menor grado la conformación, origen y evolución de cada una de las tres cordilleras colombianas (Duque-Caro, 1990; Taboada *et al.*, 2000) y cuyas manifestaciones se dan como desplazamientos de rumbo e inversos a lo largo de fallas de tendencia NNE (Pennington, 1981; Ego *et al.*, 1996), transpresión y deformación intracontinental (Taboada *et al.*, 2000; Corredor, 2003), levantamiento de bloques y cabalgamientos de secuencias sedimentarias (Kellogg y Bonini, 1982; Dengo y Covey, 1993) o sismicidad a lo largo de los principales sistemas de fallas (Dimate *et al.*, 2003).

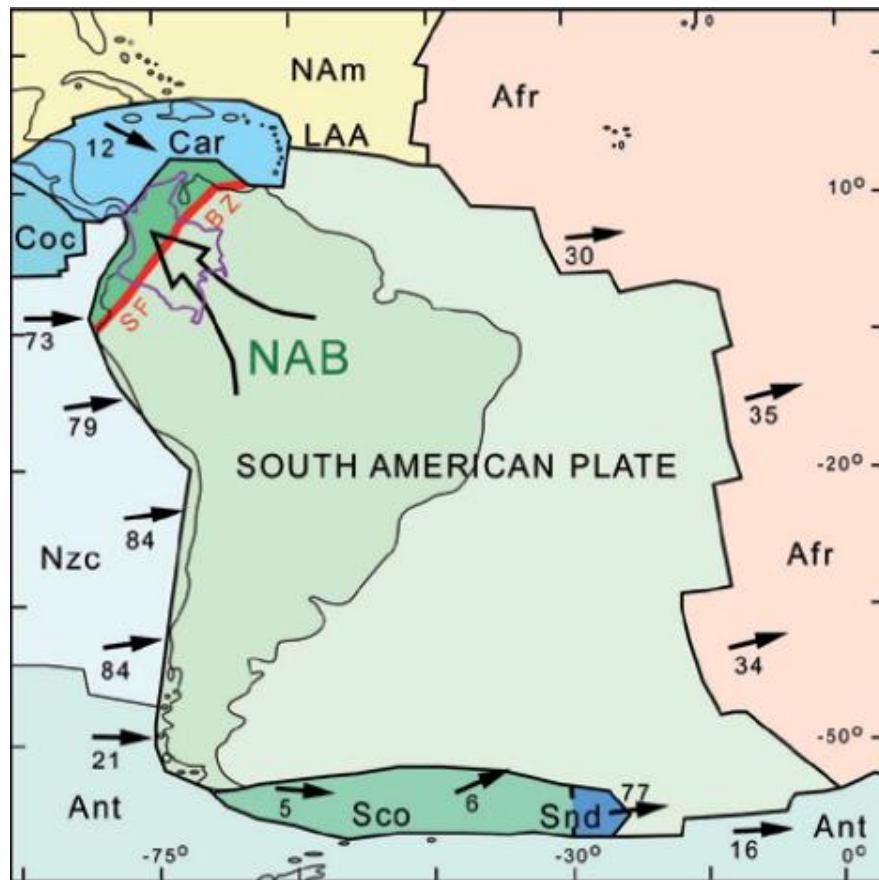


Figura 7. Marco geológico regional. Mapa esquemático de la geodinámica de la esquina NW de Suramérica y parte de Centro América. Abreviaturas: NAB, Bloque Andes del Norte; SFBZ, zona de deformación; Afr, placa Africana; Ant, placa Antártica; Car, placa Caribe; Coc, placa Cocos; LAA, Arcos de Las Antillas Menores; Nam, placa Norte América; Nzc, placa Nazca; Sco, placa Escocia; Snd, placa Sandwich Sur; SSA, Arco Sandwich Sur. (Cediél *et al*, 2003 En: Sierra y Marín-Cerón, 2012)

### 5.1.1 Eventos tectónicos al NW de Suramérica

La evolución de la región Caribe colombiana durante el lapso Mesozoico – Cenozoico estuvo afectada por: 1) la subducción de la placa Farallones durante el Jurásico – Cretácico; 2) el avance relativo hacia el nororiente y oriente de la placa Caribe con respecto a Sur América desde el Cretácico hasta el Mioceno (Aspden *et al.*, 1987; Restrepo y Toussaint, 1988; Grösser, 1989; Pindell 1997; Kerr *et al.*, 1999; Giunta *et al.*, 2002); 3) la partición de la placa Farallones hace 25 Ma en las

placas de Cocos y Nazca (Taboada *et al.*, 2000); 4) la subducción al Este de la placa de Nazca desde el Mioceno (Toussaint, 1999; Aleman y Ramos, 2000), y 5) la acreción de terrenos alóctonos (Cordillera Occidental y Serranía del Baudó) en el Cretácico tardío y Mioceno – Plioceno respectivamente (McCourt *et al.*, 1984; Restrepo y Toussaint, 1988; Grösser, 1989; Kerr *et al.*, 1998; Pardo y Moreno, 2001).

Los anteriores eventos se detallan de la siguiente manera:

1. En el límite Oligoceno – Mioceno, esfuerzos transtensionales dextrales del Sistema de fallas Romeral dieron lugar a varias cuencas *pull – apart* (e.g. Irrá, Amagá, Quinchia) a lo largo de la depresión del Cauca (Alfonso *et al.*, 1994; Sierra, 1994).
2. La acreción del Bloque Chocó comienza durante el Mioceno medio a lo largo de la cuenca del Atrato, deformando las formaciones pre – Miocénicas medias (Duque – Caro, 1990).
3. El esfuerzo compresivo asociado con la acreción del Bloque Chocó, deforma las cuencas *pull – apart* y genera una componente transpresional (López *et al.*, 2006). Durante este tiempo se desarrolla un sistema de fallas con dirección NW – SE, que controla el trayecto del río Cauca desde la desembocadura de los ríos Poblano y Cartama, en el sureste, hasta el río San Juan, en el noroeste (falla de Arma y falla La Mansa). Este sistema se encuentra desplazando las trazas de las fallas originadas durante el Cretácico, afectando las rocas de la Formación Amagá, razón por la cual se correlaciona con dicho evento (López *et al.*, 2006).
4. En consecuencia a este régimen compresivo, el sentido de los esfuerzos dominantes se invierte durante el Plioceno – Pleistoceno, y se desarrolla un movimiento sinextral en el Sistema de fallas de Romeral (Sierra, 1994; MacDonald *et al.*, 1996). Esta inversión es confirmada por estudios paleomagnéticos (Magnetización Remanente Natural y Anisotropía de Susceptibilidad Magnética)

realizados en algunos de los cuerpos intrusivos Terciarios localizados en el suroeste del departamento de Antioquia (Cerro Corcovado, Cerro Tusa, entre otros). Los resultados obtenidos permitieron determinar que dichos cuerpos habían sido rotados por la acción de las fallas de este sistema alrededor de ejes verticales (35° en sentido de las manecillas del reloj hace 8 Ma, y en contra de las manecillas del reloj) y ejes horizontales (~ 90°), estos últimos perpendiculares a la dirección de Romeral (MacDonald, 1980; MacDonald *et al.*, 1996).

## 5.1.2 Geología Regional

### 5.1.2.1 Metasedimentitas de Sinifaná

Al Nororiente de la quebrada afloran las Metasedimentitas de Sinifaná., con edades del Paleozoico Inferior (Restrepo *et al.*, 1991 En: González, 2001 y Bustamante *et al.*, 1999). Algunos autores (Bustamante *et al.*, 1999), consideran que estas rocas presentan una clara afinidad turbidítica de abanicos submarinos distales de margen continental. Estas rocas varían desde, metalimolitas, metalodolitas, metaareniscas, areniscas y grauvacas (González, 2001) y se encuentran en la zona de influencia del Sistema de Fallas de Romeral y Falla Piedecuesta (Figura 8).

### 5.1.2.2 Formación Quebradagrande

Aflora al Oriente de la quebrada Sabaleticas. De edad Cretácica temprano a Cretácico tardío (Botero y González, 1983 En: González, 2001). Está compuesto por secuencias de basaltos, andesitas y rocas volcanoclásticas (Figura 8).

### 5.1.2.3 Miembro Inferior de la Formación Amagá

Al Nororiente de la quebrada aflora el Miembro Inferior de la Formación Amagá, compuesto principalmente por lodolitas, areniscas conglomeráticas cuarzosas y

sublitoarenitas, acompañadas de mantos de carbón. En cuanto a la edad, autores como Van der Hammen (1958) señalan una edad del Oligoceno Medio y Sierra *et al.*, (2011), le asigna una edad Eoceno Medio a partir del estudio de palinomorfos realizado en la zona de Camilo-C (Mina Nechi), Figura 8.

#### 5.1.2.4 Formación Combia

Al Sur de la quebrada aflora la Formación Combia del Mioceno Superior (González, 2001), compuesta por un Miembro volcánico: esencialmente derrames basálticos y andesíticos, aglomerados, brechas volcánicas, tobas, conglomerados con matriz tobácea y areniscas tobáceas. El Miembro sedimentario se compone de sedimentitas con aporte de material volcánico, similar al que constituye el Miembro volcánico; se superpone en discordancia erosiva a la Formación Amagá (González, 2001), Figura 8.

#### 5.1.3 Geología Estructural

El área de estudio se encuentra afectada directamente por la Falla Piedecuesta (Figura 8). Mejía *et al.* (1988) describen la Falla Piedecuesta, como una falla regional de tipo inverso buzando al Este, que marca el límite Occidental del sistema de fallas de Romeral y que genera la mayor evidencia tectónica reciente en la zona.

De la toma de datos estructurales en la sección Cerro Amarillo – Quebrada Sabaleticas (Cerro Amarillo, quebrada La Pita, quebrada Tijereta, quebrada Sabaleticas, quebrada La Loma), realizada por Botero *et al.* (2011) se originan los diagramas de contornos de la Figura 8.

El diagrama de contornos para las estratificaciones de la zona muestra la presencia de plegamientos asimétricos con base en la disposición de los polos representados en la Figura 8a, con un eje en sentido NW-SE, coincidente con el tren de esfuerzos observados en las diaclasas (Figura 8b). Sin embargo, algunos datos estructurales de diaclasas sugieren otra dirección en sentido NE-SW que puede indicar un esfuerzo correspondiente a otro evento deformacional.

La Figura 8c muestra la tendencia de las estratificaciones de la quebrada Sabaleticas en un marcado sentido NE-SW, de igual manera la representación de las foliaciones muestran una direccionalidad en sentido SW (Figura 8d).

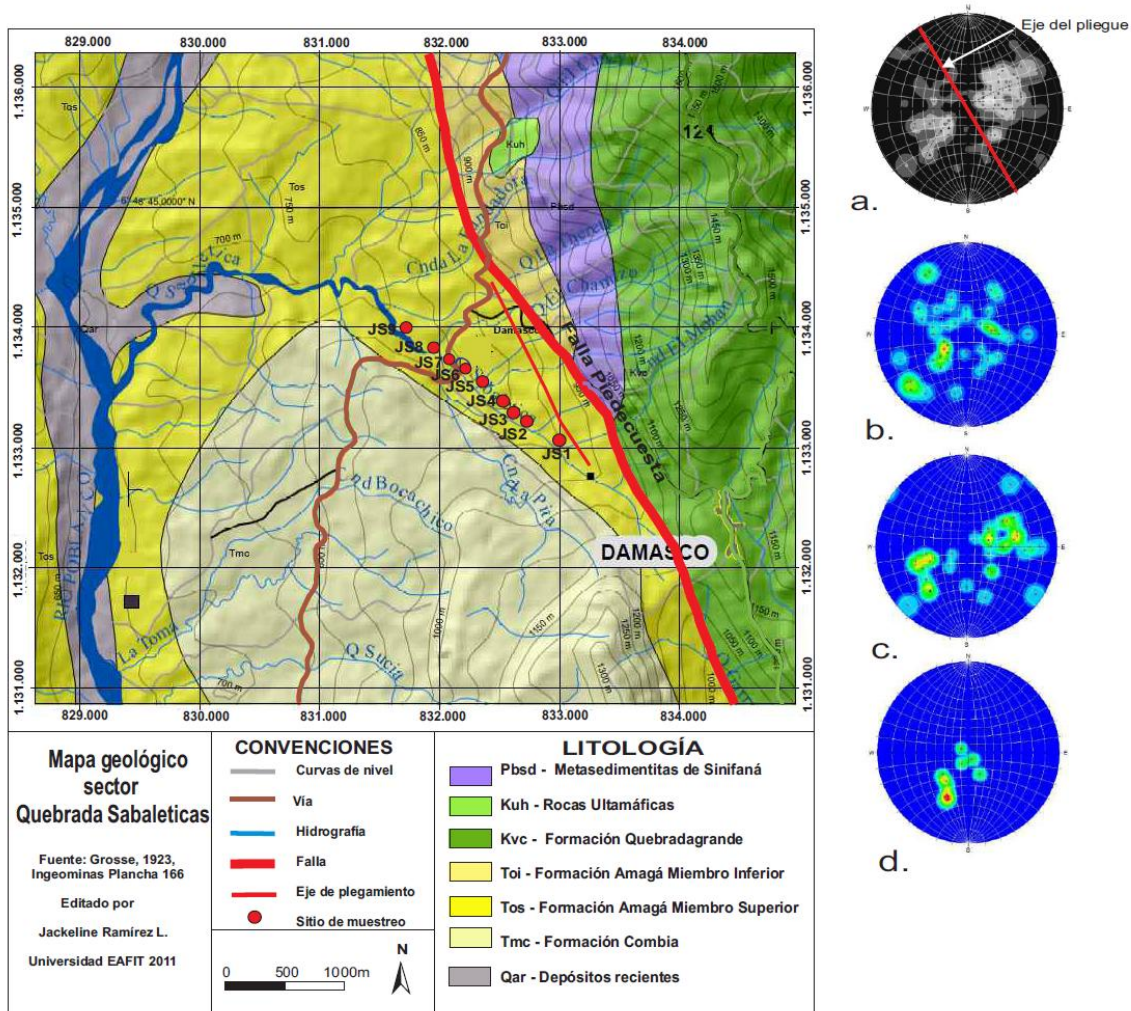


Figura 8. Mapa geológico, sector quebrada Sabaleticas. Diagramas de contornos zona estudiada por Botero *et al.* (2011). a) Diagrama de contornos estratificaciones de la zona. b) Diagrama de contornos diaclasas de la zona. c) Diagrama de contornos estratificaciones quebrada Sabaleticas. d) Diagrama de contornos foliaciones quebrada Sabaleticas.

## 5.2 GEOLOGÍA LOCAL

### 5.2.1 Formación Amagá

Aflora en una franja S-N desde el Norte del departamento de Caldas hasta Sopetrán en el departamento de Antioquia. Esta Formación fue descrita por Grosse (1926) como Terciario Carbonífero de Antioquia dividiéndola en tres pisos, tomando como criterio la diferencia de carbones explotables. El piso inferior compuesto de conglomerados, areniscas, arcillolitas con mantos delgados de carbón; el piso medio constituido por areniscas y arcillolitas con presencia de mantos de carbón explotables; el Miembro Superior formado por areniscas y arcillolitas pero sin conglomerados ni carbones.

González (1976) redefine el Terciario Carbonífero de Antioquia dándole el nombre de Formación Amagá y de Miembros a los pisos.

La Formación se localiza entre las cordilleras Central y Occidental, cubre un área aproximada de 400 km<sup>2</sup>. Reposa discordantemente sobre los esquistos verdes de Sabaletas y la diorita de Pueblito; muestra contactos fallados con estos dos mismos cuerpos y con el stock de Amagá y la Formación Barroso; es intruida por masas porfídicas del Terciario superior y por la diabasa de la Popala de edad Miocena; muestra relación discordante con la unidad volcano-sedimentaria de la Formación Combia (González, 2001).

Varios autores (p.e. Sierra *et al.*, 2003, 2011; Silva *et al.*, 2008) con estudios y observaciones más recientes, subdivide la Formación Amagá en dos Miembros cada una con dos unidades de acuerdo a las asociaciones de facies y características petrográficas. Este tema se ampliará en el apartado de Petrografía.

La edad del Miembro Superior fue señalada por Van der Hammen (1958) por correlación con otras unidades como del Mioceno tardío.

### 5.2.2 Columna estratigráfica de referencia

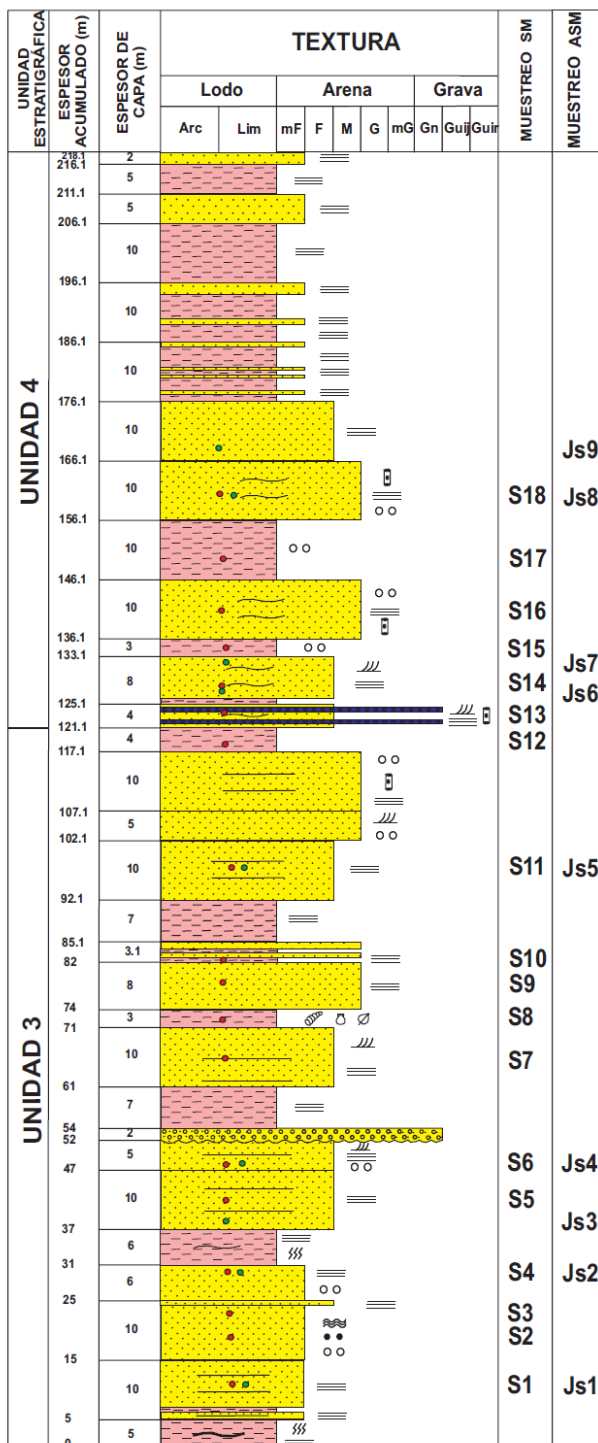
La Formación Amagá está subdividida en dos Miembros (Inferior y Superior) de acuerdo a las asociaciones de facies y características petrográficas que presenta cada uno (p.e. Sierra *et al.*, 2003, 2012; Silva *et al.*, 2008). Específicamente en la quebrada Sabaleticas, aflora una buena sección del Miembro Superior, en la cual se logran identificar las Unidades 3 y 4, con asociaciones faciales de ríos meándricos y trenzados, respectivamente (Páez *et al.*, 2011), Figura 9.

Con el fin de mejorar el conocimiento de la porción mas oriental de la Formación Amagpa, en el presente trabajo se tuvo como columna estratigráfica base, la columna realizada por Páez *et al.* (2011), Figura 9. Estos autores identifican en este miembro una baja preservación de las características morfológicas, en contraste con el Miembro Inferior, el cual está compuesto principalmente por wackas líticas y litoarenitas feldespáticas, con ausencia de carbón.

## COLUMNA ESTRATIGRÁFICA QUEBRADA SABALETICAS

COORDENADAS: X= 832.254  
Y= 1' 132.761  
Z= 946 m

ESCALA= 1: 500



### CONVENCIONES

**LITOLOGÍAS**

- Conglomerado
- Arenisca conglomerática
- Arenisca
- Arenisca con lentes de carbón
- Arenisca con láminas materia orgánica
- Limolita
- Limolita con lentes de carbón

**ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS**

- Laminación plana paralela continua
- Laminación cruzada en surco
- Laminación ondulosa paralela
- Contacto erosivo

**ESTRUCTURAS ORGÁNICAS**

- Bioturbación alta

**FÓSILES**

- Xilópalos

**OTROS**

- Nódulos de siderita
- Nódulos de pirita
- Muestra para Susceptibilidad Magnética (SM)
- Muestra para Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM)

Figura 9. Columna estratigráfica base. Tomada y modificada de Páez *et al.*, 2011. Escala 1:500

### 5.2.3 Petrografía

Las areniscas del Miembro Superior de la Formación Amagá presentan una inmadurez textural y composicional reflejada por la presencia de granos angulares y subangulares mal seleccionados con un porcentaje de cuarzo entre 50-60%, feldespatos (plagioclasa y feldespato potásico) entre 10-20% y fragmentos líticos entre 20-30% de los cuales predominan los líticos sedimentarios y volcánicos. La matriz está compuesta por minerales arcillosos, el cemento es silíceo y en algunos casos calcáreo. Dentro de los minerales accesorios se encuentran minerales densos (apatito, circón, opacos, anfíbol, epidota y zoisita), micas (moscovita, biotita y cloritoide), glauconita y materia orgánica en agregados irregulares y en láminas (Páez *et al.*, 2011). Estos mismos autores identifican dos petrofacies diferentes que describen el Miembro Superior de base a techo: Petrofacie 1, formada por wacas líticas (Figura 10); Petrofacie 2, constituida por litoarenitas (Figura 11).

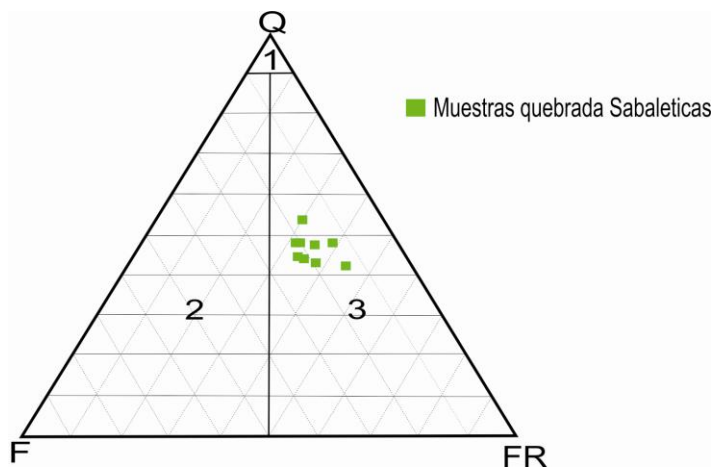


Figura 10. Diagrama composicional de la Petrofacie 1 del Miembro Superior de la Formación Amagá (Quebrada Sabaleticas). Wacas cuarzosas (1), wacas feldespáticas (2) y wacas líticas (3). Tomado de Páez *et al.* (2011).

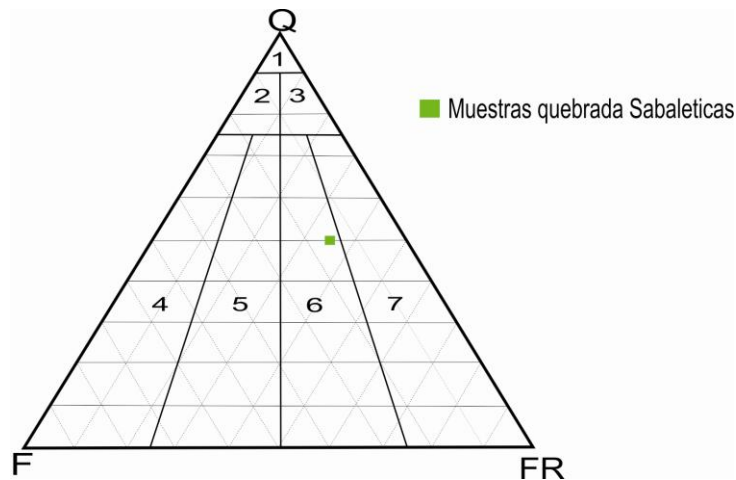


Figura 11. Diagrama composicional de la Petrofacie 2 del Miembro Superior de la Formación Amagá (Quebrada Sabaleticas). Cuarzoarenita (1), subarcosa (2), sublitoarenita (3), arcosa (4), arcosa lítica (5), litoarenita feldespática (6) y litoarenita (7). Tomado de Páez *et al*, (2011).

#### 5.2.4 Minerales densos

Los minerales densos son un grupo de minerales accesorios presentes en las rocas sedimentarias que poseen una densidad mayor a  $2,8 \text{ g/cm}^3$  y se caracterizan por su resistencia a la meteorización, abrasión y disolución. A este grupo de minerales pertenecen los anfíboles, piroxenos, micas, carbonatos, apatito, circón, turmalina, etc.

En la quebrada Sabaleticas se identificaron 15 especies minerales dentro de la fracción pesada. El mineral predominante es la hornblenda, le siguen en su orden de aparición la glauconita, epidota y zoisita y en menor concentración se encuentran óxidos, granate, clorita y tremolita (Páez *et al.*, 2011), Tabla 2 y Figura 12.

Tabla 2. Distribución de minerales densos en la Columna Quebrada Sabaleticas. Los valores están reportados en porcentaje. (Tomado y modificado de Páez, 2011).

Muestra	Hornblenda	Glauconita	Epidota	Zoisita	Opacos	Circón	Apatito	Biotita	Actinolita	Calcita	Siderita	Óxidos	Clorita	Granate	Tremolita
S18	31,6	26,3	21,1	5,3	7,9	2,6	2,6	0	0	0	0	0	0	2,6	0
S16	5,3	12,6	45,3	31,6	3,2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S14	25,4	15,9	23,8	12,7	9,5	1,6	1,6	0	0	0	0	9,5	0	0	0
S11	28,1	27	21,2	14,2	7	1,2	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0
S10	38,5	15	19,9	9,9	2,5	1,2	0,6	9,9	0	0	0	0	0	0	2,5
S9	17,3	44,4	9,9	3,7	4,9	3,7	3,7	9,9	2,5	0	0	0	0	0	0
S7	65	9,4	15,4	3,5	2,6	0,8	0,8	1,7	0	0	0	0	0	0	0,8
S6	31,2	36,1	9,8	6,5	5	3,3	1,6	6,5	0	0	0	0	0	0	0
S5	57,4	13,2	16,2	4,4	2,2	2,2	1,5	0	0	0	0	0	2,9	0	0
S4	36	25,6	9	7,7	3,8	3,8	3,8	0	1,3	7,7	0	0	0	0	1,3
S3	29,5	1,8	3,7	2,5	1,2	0,3	0,3	0	0	42,3	18,4	0	0	0	0
S2	64,4	9,3	13,6	8,5	2,6	0,8	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0
S1	44,8	11,9	22,8	11,9	4,5	1,5	1,5	0	0	0	0	0	0	0	1,1

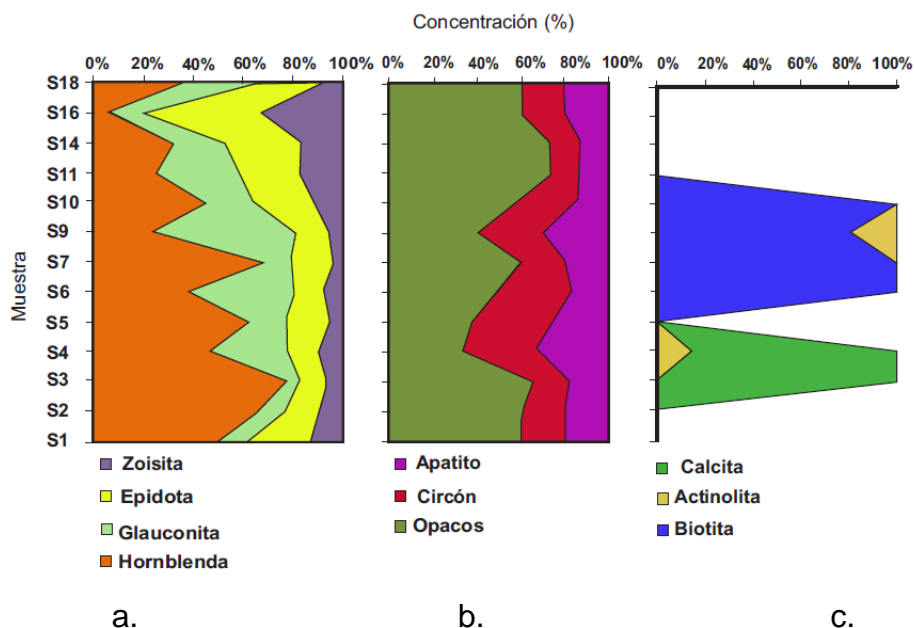


Figura 12. Distribución de los principales minerales densos contenidos en la columna Quebrada Sabaleticas. a) Hornblenda-Glauconita-Epidota-Zoisita. b) Opacos-Apatito-Circón. c) Biotita-Actinolita-Calcita. Tomado y modificado de Páez *et al.* (2011).

### 5.2.5 Estudios de ASM en la zona

Estudios de ASM realizados en la Formación Amagá tanto en el Miembro Superior como para el Miembro Inferior han sido realizados por Sierra *et al.* (2011). Un compendio de los resultados de estos estudios se presenta a continuación (Figura 13).

Del análisis de la fábrica magnética reportada en el estudio de Sierra *et al.* (2011) se concluyó que los ejes  $K_1$  de las rocas sedimentarias de esta parte de la cuenca de Amagá, representan principalmente una fábrica deformada asociada con plegamiento y fallamiento de la Formación y que la diferencia entre la orientación de los ejes  $K_1$  entre el Miembro Inferior y el Miembro Superior es el resultado de una historia de deformación diferente. Concluye además que los elipsoides de los sedimentos del Miembro Superior se presentan de forma oblata, como resultado de procesos de depositación, compactación y deformación, en contraste con el patrón observado para el Miembro inferior, donde los elipsoides de forma prolata, indican una fase diferente de deformación.

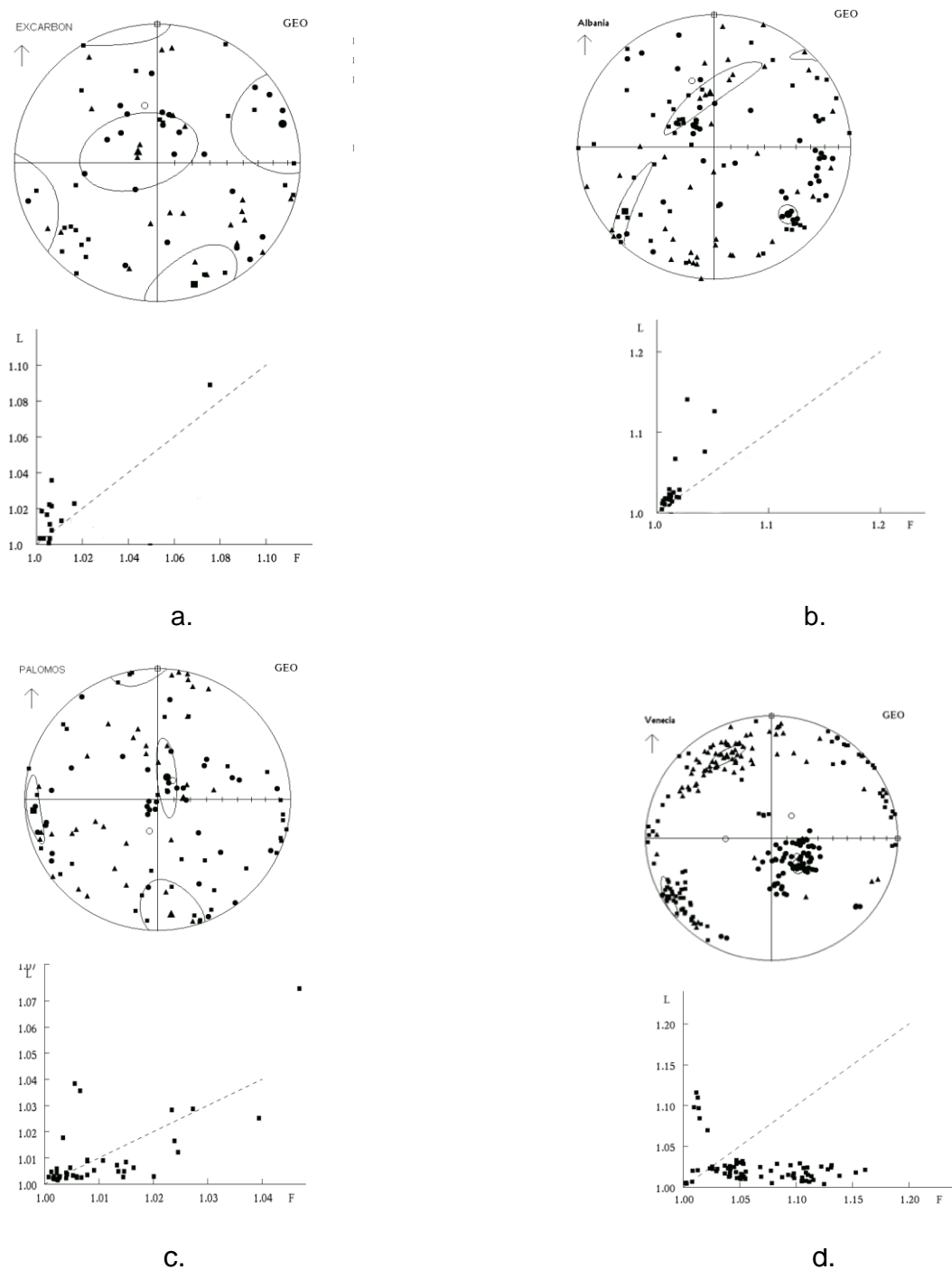


Figura 13. Resultados de estudios de ASM realizados en la Formación Amagá. a) Miembro Inferior, Unidad 1, EXCARBÓN. b) Miembro Inferior Unidad 2, LA ALBANIA. c) Miembro Superior, Unidad 3, PALOMOS. d) Miembro Superior, Unidad 4, VENECIA. (Tomado de Sierra *et al.*, 2011).

## **6. MUESTREO TÉCNICO**

Para el análisis de ASM, se tomaron muestras cilíndricas en nueve sitios a lo largo de la quebrada Sabaleticas (5 en la Unidad 3 y 4 en la Unidad 4) Figura 8, se obtuvieron seis cilindros completos por estación para un total de 54. En el Anexo 1 se presentan las coordenadas de los sitios muestreados.

Para el análisis de SM se tomaron 18 muestras en sedimento. En la Figura 9 se ubican las muestras sobre la columna estratigráfica base, tanto para ASM como para SM.

### **6.1 EQUIPO DE MUESTREO.**

Las muestras de ASM consisten en cilindros de longitud entre 2,2 y 2,5cm y diámetro de 2,5cm. Para la obtención de las muestras se requirió de una perforadora de núcleos portátil con motor a gasolina, con broca con punta de diamante de 2,5cm de diámetro (Figura 14a); al equipo se le acondiciona un tanque de agua para mantener refrigerada la broca mientras está en funcionamiento. Además de la perforadora, se requiere de una brújula solar (Figura 14b) para la determinar la orientación e inclinación de los cilindros y un marcador de cobre para el rayado de la muestra (Figura 14c), necesario para su correcto tratamiento de medición en el laboratorio.



a.



b.



c.

Figura 14. Equipo para toma de muestras para ASM. a) Perforadora portátil. b) Brújula solar. c) Marcador de cobre.

## 6.2 MUESTREO.

- La toma de muestras en campo se realiza siguiendo el protocolo (Tomado y modificado de AGICO, 2011) y la planilla para toma de datos en campo de muestras para análisis paleomagnéticos del Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad EAFIT (Anexo 2):

- Selección de afloramientos para la obtención de núcleos de roca. La roca debe estar fresca, debido a que la alteración cambia la mineralogía original. Así mismo, se debe evitar perforar rocas con presencia de agua, ya que se puede influir en los resultados (Figura 15a).
- Perforación de la roca con el taladro portátil con una profundidad de 6cm como mínimo, el cilindro no debe ser retirado del afloramiento antes de que su orientación sea medida. El diámetro del cilindro perforado no debe exceder de 2,5cm y no debe estar curvado (Figura 15b).
- La brújula geológica se fija en el espacio acondicionado en la brújula solar para tal fin, se introduce el tubo orientador dentro del cilindro de modo que la ranura para marcar las muestras quede en la parte superior (Figura 15c).
- Toma de datos de orientación e inclinación del cilindro, nivelando la brújula geológica y utilizando el inclinómetro provisto en la brújula solar.
- Rayar la muestra cilíndrica con un alambre de cobre, guiándose con la ranura provista en el tubo de la brújula solar, se puede emplear también el marcador de muestras.
- Retirar el cilindro perforado desde el afloramiento y dibujar la marca fiducial y las flechas de orientación correspondientes (flechas de orientación de techo a base de la muestra (Figura 15d y e).
- Como parte del trabajo de muestreo, los cilindros deben prepararse y cortarse en el laboratorio a una altura entre 2,2 y 2,5cm usando una cortadora de núcleos (Figura 15f, g, h), debe señalárseles individualmente la marca fiducial en la parte frontal del cilindro y las flechas de techo a base. Finalmente, las muestras deben quedar totalmente secas (Figura 15i, j).



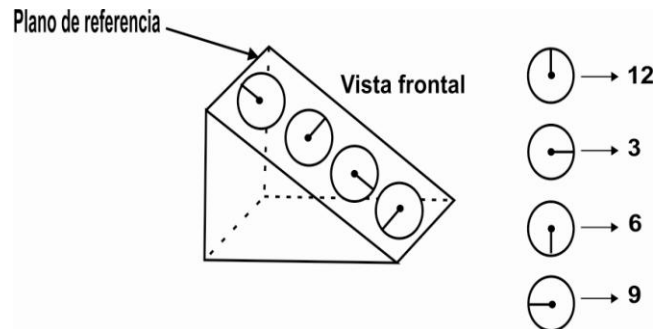
a.



b.



c.



d.



e.

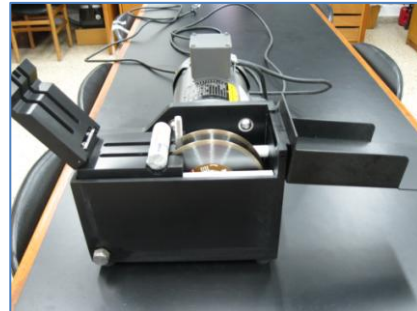


f.

Continuación de la Figura 15.



g.



h.



i.



j.

Figura 15. Protocolo para muestreo de ASM para muestras cilíndricas. a) Limpieza de superficie a muestrear. b) Perforación de la roca con taladro portátil. c) Orientación de cilindros. d) Selección de parámetro para marca fiducial. e) Marcación de cilindros. f) Preparación de cilindros para el corte – marcación completa. g) Cubierta de cilindros con cinta de enmascarar. h) Cortadora de núcleos. i) Ventilación de cilindros para su secado total. j) Marcación individual de cilindros.

### 6.3 TRABAJO DE LABORATORIO

De 54 cilindros completos que se obtuvieron en campo (6 por estación), se consiguieron un total 105 muestras cilíndricas de medida estándar, de las cuales se analizaron 72.

Las mediciones de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) fueron realizadas en el Laboratorio de la Universidad EAFIT de Medellín, en un equipo Kappabridge MFK1-FB (Figura 16) con una frecuencia de operación de 976 Hz y un campo magnético de baja intensidad ( $200 \text{ Am}^{-1}$ ), basado en la medida de las susceptibilidades a lo largo de quince (15) direcciones preestablecida (Jelínek, 1981), Anexo 3. La muestra se cambia manualmente durante las mediciones.

Mediante al programa Safyr 4W Versión 4.0.3 (incorporado en el equipo), se calcula automáticamente el tensor de susceptibilidad así como el error estadístico, el cual debe ser menor a 1% para obtener datos confiables. El programa permite introducir previamente los valores de orientación de cada muestra medidos en campo para ejecutar las correcciones necesarias (Anexo 4), realiza el tratamiento estadístico y el procesamiento de la información de ASM.

El programa Safyr 4W entrega como resultados dos archivos, uno con extensión ASC y otro con extensión RAN; los archivos ASC son archivos que se pueden abrir con un procesador de textos para obtener las orientaciones de  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  de cada uno de las muestras medidas, así como los demás parámetros que describen el elipsoide de ASM.

Los archivos RAN se utilizan para obtener los estereogramas mediante la utilización del *software* Anisof 4.2. (incorporado en el equipo). Los estereogramas son proyecciones de igual área sobre el hemisferio inferior, y muestran las orientaciones de susceptibilidad máxima  $K_1$  (cuadros azules), intermedio  $K_2$  (triángulos verdes) y mínima  $K_3$  (círculos fucsia) del tensor de susceptibilidad de cada sitio de muestreo (Anexo 5).

Todo el trabajo de campo y de laboratorio se llevó a cabo con las herramientas y los equipos del Laboratorio de Paleomagnetismo del Departamento de Geología de la Universidad EAFIT de Medellín.



Figura 16. Kappabridge MFK1 – FB. AGICO – *Advanced Geoscience Instruments Company*, Brno, República Checa).

## 7. RESULTADOS

### 7.1 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

Para el análisis de la susceptibilidad magnética del Miembro Superior de la Formación Amagá, se usaron las muestras (areniscas) sobre las cuales se llevó a cabo el estudio de minerales densos realizado por Páez *et al.* (2011) en la quebrada Sabaleticas (14 en total). A estas 14 muestras de areniscas se adicionaron 4 muestras tomadas en estratos de limolitas a lo largo de la quebrada. Para efectos de análisis se usaron 20g de sedimento de cada muestra. En la Tabla 3 se presentan los valores reportados en las mediciones de susceptibilidad magnética y en la Figura 17 se muestra la gráfica de susceptibilidades correspondiente.

Los valores obtenidos para la susceptibilidad magnética de la quebrada Sabaleticas son, en términos generales bajos (Tabla 3), lo que es de esperarse en rocas sedimentarias cuyas mayores concentraciones mineralógicas están representadas por cuarzo y feldespatos, considerados minerales diamagnéticos.

Sin embargo, los valores de susceptibilidad magnética muestra tramos sesgados con algunos picos de consideración (S5, S7, S11)  $1193,20 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ,  $662,81 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  y  $594,54 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  respectivamente, lo que indica un contraste de mineralogías magnéticas, lo que puede estar asociado a la presencia de zonas reductoras con minerales magnéticos antigénicos secundarios (Camacho, 2010).

Tabla 3. Susceptibilidad másica reportada a lo largo de la quebrada Sabaleticas. Mineralogía tomada de Paéz *et al.* (2011).

Sitio de muestreo	Susceptibilidad másica ( $10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$ )	Mineralogía
S18	33,78	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente metamórfico. Minerales accesorios: biotita, glauconita. Muestra con mayor concentración de granate. Hornblenda.
S17	8,50	Limolita abigarrada.
S16	15,50	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: epidota, biotita, presencia de materia orgánica. Muestra con mayor concentración de epidota y zoisita (óxidos en su interior).
S15	3,72	Limolita.
S14	415,76	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: zoisita (óxidos en su interior), hornblenda alterada a calcita en sus bordes, epidota, biotita, muestra con mayor concentración de circón y apatito. Muestra con mayor concentración de óxidos.
S13	163,12	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: epidota, biotita, hornblenda. Óxidos.
S12	6,26	Limolita carbonatada.
S11	594,54	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: zoisita (óxidos en su interior), epidota, biotita, glauconita en matriz arcillosa y óxidos en sus bordes.
S10	261,11	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: epidota (óxidos en su interior), biotita, zoisita, glauconita. Muestra con mayor concentración de tremolita. Hornblenda.
S8	40,88	Limolita.
S7	662,81	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: epidota, biotita, actinolita. Muestra con mayor concentración de hornblenda.
S6	308,28	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: circón, apatito, glauconita, muestra con mayor concentración de actinolita y calcita. Biotita.

Continuación Tabla 3.

Sitio de muestreo	Susceptibilidad másica ( $10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$ )	Mineralogía
S5	1193,20	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: moscovita, biotita, circón, glauconita, hornblenda, epidota (óxidos en su interior). Presencia de materia orgánica. Muestra con mayor concentración de clorita.
S4	190,41	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: glauconita, epidota, biotita, actinolita, calcita. Presencia de materia orgánica. Muestra con mayor concentración de circón y apatitos. Hornblenda.
S3	525,34	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: hornblenda alterada en los bordes a calcita, circón, zoisita, biotita. Presencia de materia orgánica. Concentración de calcita.
S2	221,80	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, líticos mayormente sedimentarios. Minerales accesorios: epidota (óxidos en su interior), apatito incrustado en cuarzo, biotita, zoisita. Alta concentración de carbonatos. Hornblenda. Posible paleosuelo.
S1	578,56	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, los fragmentos líticos con mayor concentración son líticos sedimentarios. Minerales accesorios: hornblenda, epidota con óxidos en su interior, zoisita, glauconita, biotita. Presencia de materia orgánica. Feldespatos plagioclasa moderadamente alterados a sericita, calcita y epidota. Feldespatos potásicos fuertemente alterados a caolinita.

### COLUMNA ESTRATIGRÁFICA QUEBRADA SABALETICAS

COORDENADAS: X= 832.254  
 Y= 1' 132.761  
 Z= 946 m  
 ESCALA= 1: 500

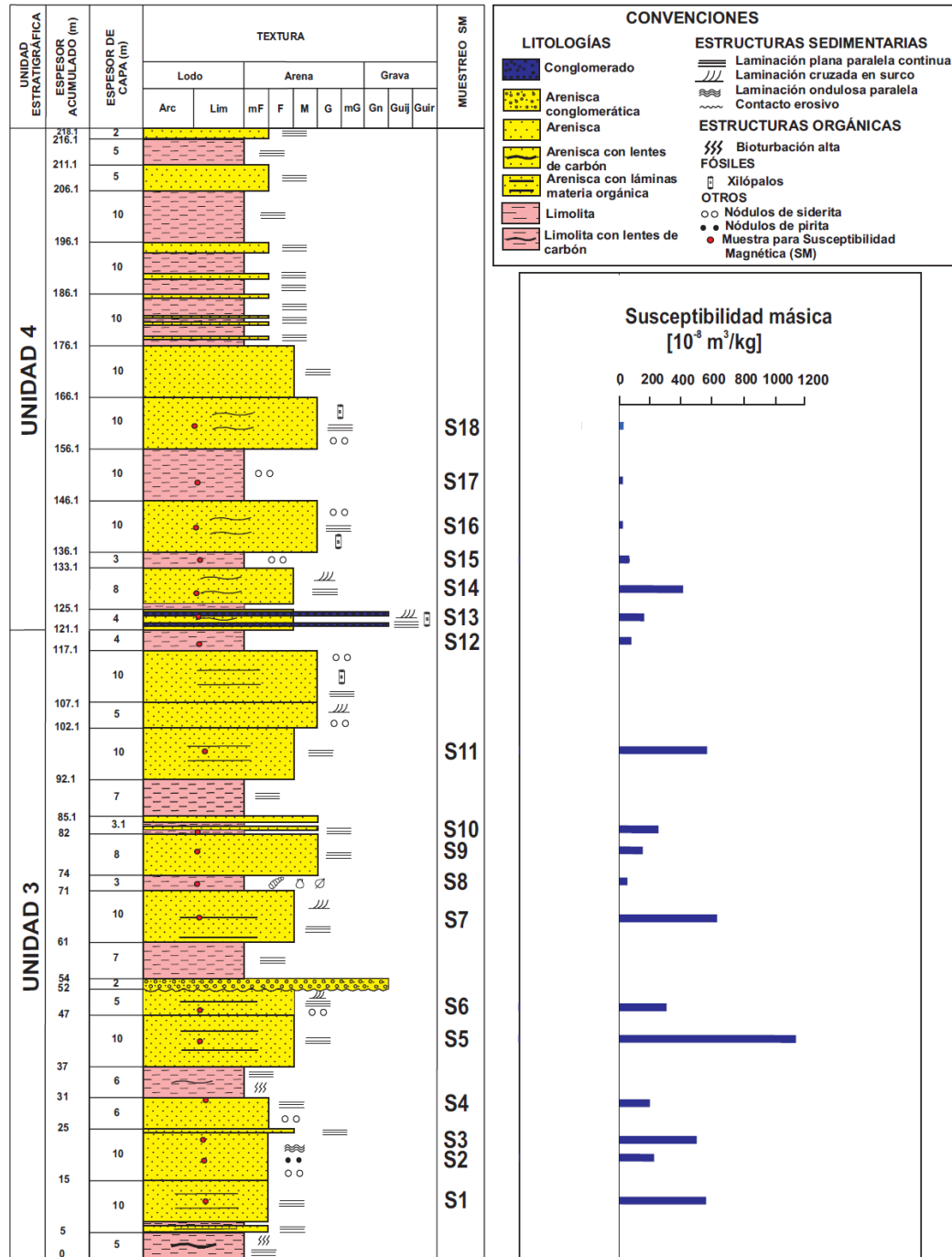


Figura 17. Gráfica de SM a lo largo de la columna estratigráfica Quebrada Sabaleticas.

Las muestras pertenecientes a los estratos constituidos por limolitas (S8, S12, S15, S17) presentan los valores más bajos de susceptibilidad; S8 con  $40,88 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ; S12 con 6,26 y S17 con  $8,50 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ .

La Unidad 4 se caracteriza por tener valores de susceptibilidad bajos con respecto a la media de toda la columna (entre  $3,72 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  y  $163,12 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ). En esta misma Unidad la muestra S14 refleja un aumento brusco en la susceptibilidad ( $415,76 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ), debido a la buena concentración de óxidos allí presente.

La muestra S8 perteneciente al estrato donde se hallaron hojas y gasterópodos posee un valor de susceptibilidad de  $40,88 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ .

La muestra S5 reporta el valor más alto de susceptibilidad ( $1193,20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ), esta muestra presenta altos contenidos de cloritas, hornblenda (ambos minerales paramagnéticos).

Otros valores considerables están representados por las muestras S11 ( $594,54 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) con presencia de glauconita y zoisita; y la muestra S7 ( $662,81 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) en la que se da la mayor concentración de hornblenda, así como presencia de biotita y tremolita.

Las muestras S4, S6, S9, S11, S18, correspondientes a "arenas verdes" presentan valores de susceptibilidad entre medios y altos ( $157,15 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  y  $594,54 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) debido a su contenido de glauconita, constituyente principal de estas arenas. La muestra S18 sin embargo, presenta un valor muy bajo de susceptibilidad magnética ( $33,78 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ).

## 7.2 ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM)

Se tomaron muestras para ASM en 9 estaciones: 5 en la Unidad 3 y 4 en la Unidad 4. En cada estación se realizaron seis perforaciones para obtener cilindros con una longitud de 6cm como mínimo. Después del corte en el laboratorio para obtener cilindros de tamaño estándar, se tomaron los 8 mejores conservados por estación para realizar las mediciones de ASM.

La Figura 18 presenta el mapa de muestreo con los correspondientes estereogramas que reflejan las orientaciones de los ejes principales del elipsoide de susceptibilidad magnética  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  ( $K_{max}$ ,  $K_{int}$ ,  $K_{min}$ ). Los estereogramas se presentan en forma individual en el Anexo 5.

### 7.2.1 Fábrica magnética

De acuerdo a los estereogramas obtenidos, en forma general, la no concentración de los  $K_3$  hacia el centro, elimina una posible consideración de fábrica magnética de tipo depositacional, de acuerdo a la clasificación dada por Robion et.al, (2007). Así mismo, la distribución de los  $K_1$  en forma de guirnalda con respecto al eje NS (JS6, JS7) y una tendencia de los  $K_3$  a estar concentrados permite ubicar estas fábricas magnéticas como del tipo tectónico.

Las fábricas magnéticas de las estaciones pertenecientes a la Unidad 3 presentan las siguientes tendencias: la estación JS1 se caracteriza por mostrar una foliación magnética (relativo buen agrupamiento de los  $K_3$  y dispersión los  $K_1$  y  $K_2$ ). La dirección del  $K_1$  está en sentido NW-SE. Para la estación JS2 se aprecia una guirnalda de los  $K_1$  con dirección NW-S. La estación JS3 presenta también la guirnalda de  $K_1$  con dirección NW-SE y una excelente concentración de  $K_3$  al NE. Para la estación JS4, se observa la misma tendencia de la estación anterior con

una marcada concentración de  $K_3$  al NE. La estación JS5 muestra una concentración neta de los  $K_1$  hacia el SE y de los  $K_3$  en el NE.

Para la Unidad 4 las fábricas magnéticas, se presentan de la siguiente manera: la estación JS6 muestra una guirnalda con los  $K_1$  y una excelente concentración de los  $K_3$  perpendicular a la guirnalda. La estación JS7 presenta una guirnalda de  $K_1$  en dirección NW-S y una concentración de  $K_3$  hacia el NE. La estación JS8 con una concentración de  $K_3$  hacia el NE, una dirección de los  $K_1$  hacia el SE. La estación JS9 continúa con el buen agrupamiento del  $K_3$  al NE y una tendencia de los  $K_1$  NW-SE.

### 7.2.2 Parámetros escalares ASM

Los parámetros de anisotropía de susceptibilidad magnética para cada estación se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores para cada estación muestreada de los distintos parámetros de ASM.

Estación	N	$K_1$	$K_2$	$K_3$	Km	L	F	Pj	T
JS1	8	1,042	1,033	0,025	4,10	1,010	1,116	1,142	0,842
JS2	8	1,028	1,015	0,957	9,72	1,012	1,062	1,080	0,656
JS3	8	1,031	1,009	0,960	0,195	1,022	1,051	1,070	0,401
JS4	8	1,083	1,065	0,852	0,289	1,017	1,249	1,307	0,856
JS5	8	1,039	1,009	0,952	7,24	1,030	1,060	1,094	0,325
JS6	8	1,101	1,093	0,806	0,303	1,007	1,355	1,426	0,953
JS7	8	1,078	1,069	0,853	0,146	1,009	1,252	1,303	0,924
JS8	8	1,029	1,015	0,956	5,33	1,014	1,062	1,082	0,629
JS9	8	1,042	1,034	0,924	3,35	1,008	1,119	1,145	0,866

N=Número de especímenes;  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  eje máximo, intermedio y mínimo respectivamente del elipsoide de anisotropía; Km=susceptibilidad media ( $\times 10^{-3}$  SI); L=lineación magnética; F=foliación magnética; Pj=grado de anisotropía; T=simetría de la forma.

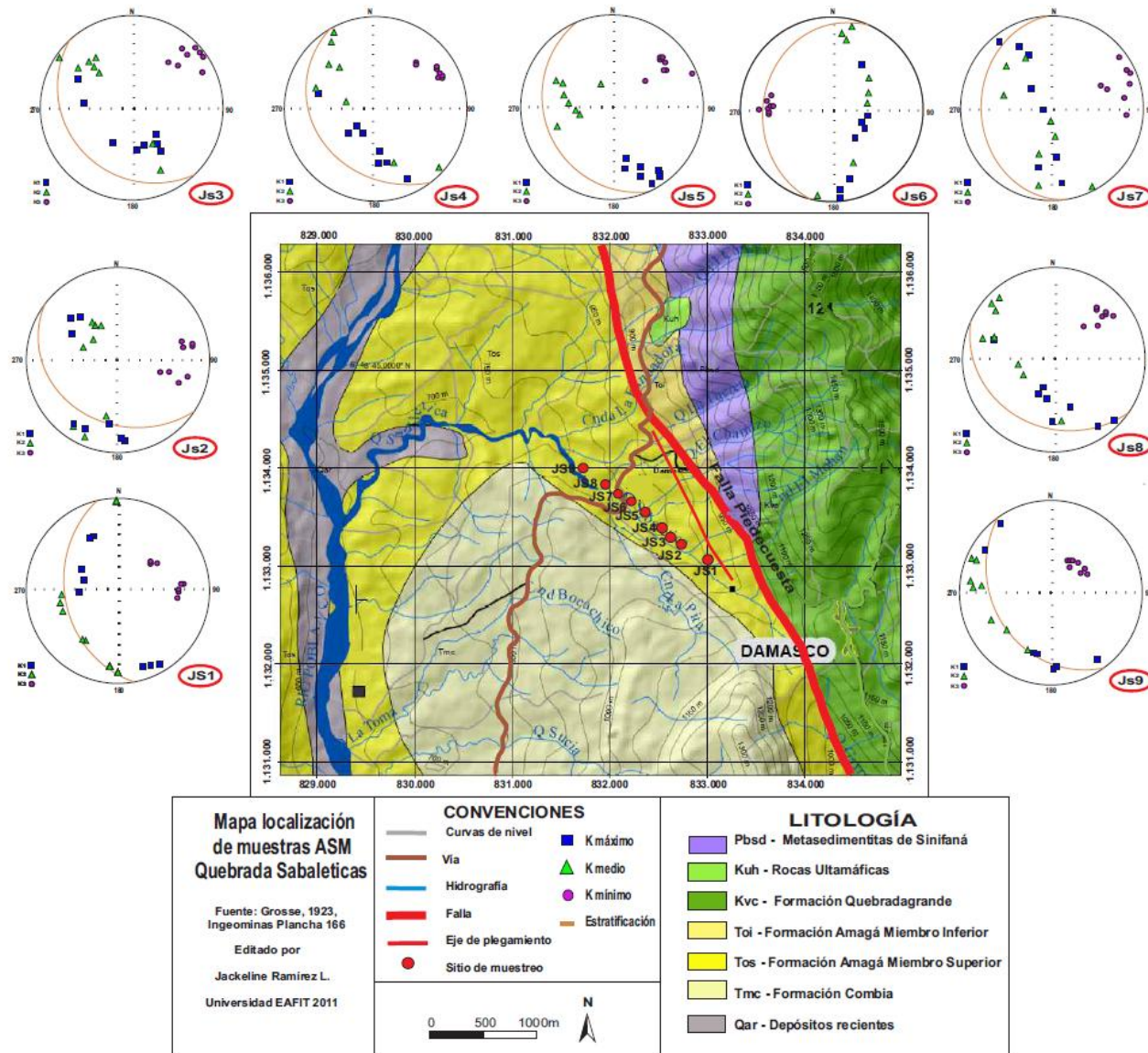


Figura 18. Mapa de ubicación muestreo ASM y sus correspondientes estereogramas.

Para determinar los elipsoides de deformación en cuanto a los parámetros escalares de ASM, correspondientes a grado de anisotropía ( $P_j$ ) y simetría de la forma ( $T$ ) registrado para las estaciones muestreadas, se tiene: considerando como baja anisotropía magnética valores de  $P_j < 1,05$ ; media anisotropía magnética valores de  $1,05 < P_j < 1,1$ ; y alta anisotropía magnética valores de  $P_j \geq 1,1$ . De acuerdo a los sitios muestreados y los datos compilados en la Tabla 4, se observa una anisotropía de media a alta; en la Unidad 3, los sitios JS1 y JS4 presentan altos grados de anisotropía con el 14% y 30% de deformación respectivamente; en la Unidad 4, los sitios JS6, JS7 y JS9 arrojan porcentajes de deformación del 42%, 30% y 14% respectivamente. Los sitios que presentan anisotropía media sin embargo, muestran valores muy próximos a 1,1 (JS2 de 1,080 – JS3 de 1,076 – JS5 de 1,094 en la Unidad 3 y JS8 de 1,082 en la Unidad 4). Estos rangos de  $P_j$  constatan grados de deformación originados por procesos tectónicos.

El parámetro  $T$  determina la forma del elipsoide, de manera que para valores  $-1 < T < 0$  los elipsoides son del tipo constricción aparente o prolatos y para  $0 < T < 1$  los elipsoide son del tipo aplastados u oblatos (Casas et al., 1998). Los sitios muestreados arrojan valores de  $T$  entre 0,401 como mínimo y 0,953 como máximo, por tanto todos los elipsoides de deformación son de tipo oblato. La relación entre la forma del elipsoide ( $T$ ) con el grado de anisotropía ( $P_j$ ) corrobora la forma final del elipsoide (diagramas  $T$  vs.  $P_j$  en Anexo 5). La Figura 19 esquematiza el dominio de la forma del elipsoide de deformación de acuerdo a la relación  $T$  vs.  $P_j$ .

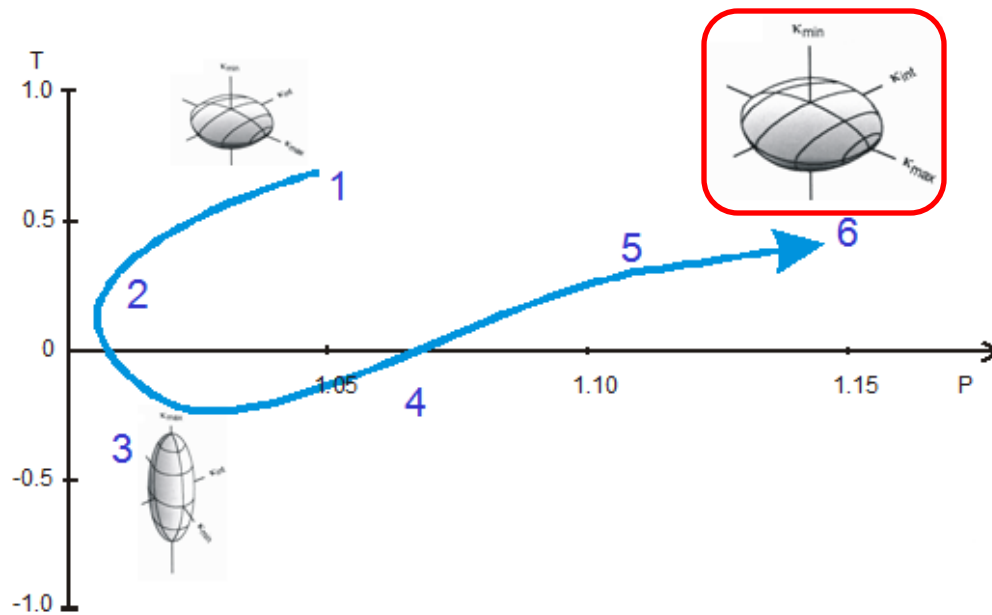


Figura 19. Relación de valores de T y Pj para determinar la forma del elipsoide. Tomado de Agico (2011).

La relación entre el parámetro de lineación magnética (L) y la foliación magnética (F) presentan un dominio total de la foliación frente a la lineación, característico de procesos deformacionales, corroborando además la forma de los elipsoides de anisotropía como netamente de tipo oblató. Las gráficas correspondientes a esta relación para cada sitio muestreado se presentan en el Anexo 6.

La susceptibilidad media ( $K_m$ ) arroja en general valores muy bajos para todas las muestras ( $K_m$  entre  $0,146 \times 10^{-3}SI$  y  $9,72 \times 10^{-3}SI$ ).

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

Los datos de petrografía y minerales densos, suministran una complementaria e importante información para el análisis de la susceptibilidad magnética, ya que ayudan a determinar los constituyentes responsables de la mineralogía magnética de una roca.

Los bajos valores de susceptibilidad magnética de la quebrada Sabaleticas son consistentes con los esperados para las rocas constituyentes del Miembro Superior de la Formación Amagá, es decir, wacas líticas y litoarenitas feldespáticas, cuya mayor concentración mineralógica está representadas por cuarzo, clasificado como mineral diamagnéticos, líticos cuyos fragmentos sedimentarios corresponden en su mayoría a arenas cuarzosas y los fragmentos volcánicos a andesitas porfídicas formadas por feldespatos (mineral diamagnético) y cemento calcáreo.

Los sesgos presentados en la gráfica de susceptibilidad magnética permiten considerar la existencia de minerales que estarían aportando fuentes de hierro a la roca de modo que su susceptibilidad aumente. La variación de la susceptibilidad magnética a lo largo de una columna estratigráfica se asocia entonces a cambios en la concentración de minerales para y ferromagnéticos (Bidegain *et al.*, 2005)

Los minerales densos predominantes en la quebrada Sabaleticas son la hornblenda y la glauconita, ambos minerales paramagnéticos. La hornblenda está presente a lo largo de toda la columna estratigráfica, disminuyendo su concentración de base a techo.

La glauconita en las “arenas verdes” tiene mayor continuidad en los estratos de la Unidad 3 (muestras S4, S6, S9, S11), mientras que en la Unidad 4 (muestra S18) a pesar de su manifestación, sus concentraciones son mínimas.

En la Unidad 3, la muestra S1 presenta un valor de  $578,56 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  debido a su contenido de hornblenda; la susceptibilidad magnética disminuye hacia la muestra S2 ( $221,80 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ) por tratarse de un posible paleosuelo; la presencia de concentraciones de carbonatos produce una caída de la susceptibilidad. La muestra S3 debe su aumento de susceptibilidad ( $525,34 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ) a su contenido de hornblenda, glauconita y siderita; para la muestra S4 la susceptibilidad nuevamente decae, debido a la presencia de minerales como la calcita, el circón y apatitos; los subsiguientes altos y bajos en los niveles de susceptibilidad corresponden a la intercalación de estratos de arenisca, con contenidos de hornblenda y/o glauconita lo que incrementa su susceptibilidad, y estratos de limolitas (decaimiento de la susceptibilidad).

El pico más sobresaliente (S5, con  $1193,20 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ) se debe a una alta concentración de hornblenda, sumando a la presencia de concentración de clorita (mineral hallado sólo en esta muestra).

La Unidad 4 presenta valores muy bajos de susceptibilidad, debido a que sus estratos son limolitas (carbonatadas hacia los estratos inferiores), y areniscas con bajos contenidos de hornblenda, glauconita y presencia de minerales como granate y zoisita.

Algunas muestras de esta Unidad (S14, S16, S18) presentan minerales metamórficos como epidota y zoisita que no aportan concentraciones magnéticas significantes a la susceptibilidad.

La muestra S14 exhibe un aumento en la susceptibilidad, debido a la concentración de óxidos manifiesta en ella. En este estrato se presenta un cambio en las condiciones climáticas (aumento de temperatura, condiciones

reductoras) para favorecer la presencia de óxidos. Esta presencia de óxidos ya alterados se evidencia en los estratos siguientes de limolitas abigarradas (hematita?), sin embargo la presencia de cemento carbonatado, enmascara la susceptibilidad magnética, reduciéndola considerablemente.

Según Páez *et al.* (2011) y Moreno (2011) la procedencia de los minerales del Miembro Superior de la Formación Amagá, está dada por:

- Los fragmentos sedimentarios, provienen del Complejo Quebradagrande (cordillera Central) y el retrabajamiento del Miembro Inferior de la Formación Amagá.
- Los fragmentos de origen volcánico se derivan de la Formación Combia.
- Los fragmentos metamórficos proceden del basamento metamórfico exhumado de la proto-cordillera Central.

Durante la formación del Miembro Inferior de la Formación Amagá se dieron las condiciones de enterramiento y de clima (condiciones anóxicas en climas calientes y húmedos) que favorecieron la acumulación y preservación de la materia orgánica que originó su transformación en carbón (Moreno, 2011).

La materia orgánica en adición con los contenidos de pirita y matriz detrítica de las areniscas del Miembro Inferior (Moreno, 2011), indica que se dieron unas condiciones de oxido-reducción con presencia de Fe, S y O, lo que permitió la precipitación de sulfuros de hierro, presentes en forma de cemento de óxidos de hierro (hematita).

Al avanzar la mesodiagénesis del Miembro Inferior, la circulación de aguas meteóricas cargadas de Ca, Mg y Fe, origina las condiciones para la alteración de los feldspatos y los granos detríticos que posteriormente producirán cemento carbonato. Así mismo, se aumenta la concentración de CO<sub>2</sub>, se favorece la decarboxilación de la materia orgánica, originándose un aumento en la producción de cemento carbonatado (Moreno, 2011).

Los ambientes de depositación para el Miembro Superior de la Formación según Páez *et al.* (2011) son:

- Orógeno reciclado, que correspondería al Complejo Quebradagrande y del cual se tendrían los aportes de hornblenda.
- Marinos marginales, que facilitarían las condiciones fisicoquímicas y las bajas tasas de sedimentación para la formación de glauconita.

## 8.2 ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

La anisotropía de susceptibilidad magnética presente en la quebrada Sabaleticas es alta, los grados de anisotropía varían entre valores medios y altos (entre el 7% y el 42%) lo que evidencia una fábrica magnética super-impuesta sobre la fábrica sedimentaria, asociada posiblemente a procesos deformacionales de origen tectónicos (Robion *et al.*, 2007).

La forma oblata de los elipsoides de deformación corrobora la anterior consideración. Así mismo la relación entre los ejes principales del elipsoide ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ) permite ver un dominio de la foliación magnética sobre la lineación (dispersión de los  $K_1$  y  $K_2$  y una buena concentración de  $K_3$ ). Esta generalizada buena concentración de los  $K_3$  es un indicativo de una fábrica emplazada en condiciones netamente deformacionales más que un indicativo de una fábrica de flujo.

En general los  $K_3$  se presentan perpendiculares al plano de estratificación, excepto en la estación JS6 de la Unidad 4, donde  $K_3$  está ubicado paralelamente, debido a que este sitio de muestreo se encuentra sobre la zona de pliegue.

La fábrica magnética de la Unidad 3 presenta una mejor concentración que la reflejada por la Unidad 4, donde la fábrica magnética se presenta más aleatoria,

con los porcentajes de anisotropía mayores (30% Unidad 3 y 42% Unidad 4),  
Figura 20.

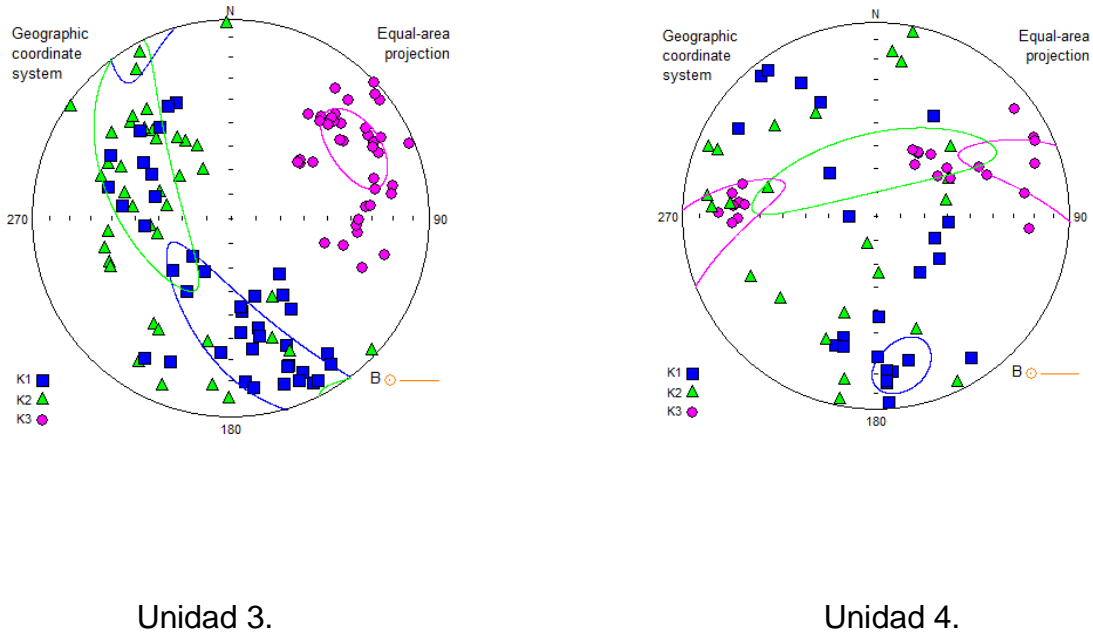
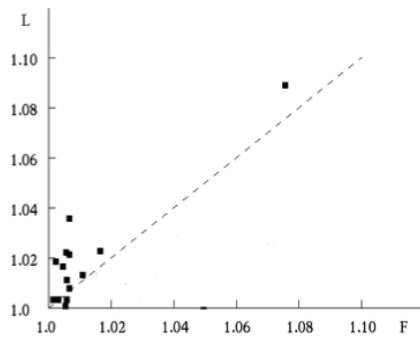


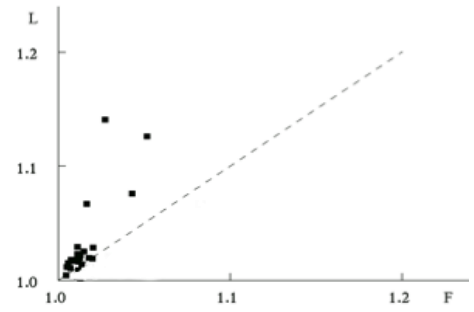
Figura 20. Estereogramas generales para la Unidad 3 y 4 del Miembro Superior de la Formación Amagá, sección quebrada Sabaleticas.

La tendencia direccional de las fábricas magnéticas y sus ejes principales  $K_1$  (NW-SE en la mayoría de las estaciones muestreadas), y los datos estructurales tomados en campo en estratificaciones y diaclasas (NE-SW), evidencia la presencia de diferentes tendencias deformacionales, lo que se corrobora con los estudios de ASM de Sierra *et al.*, (2011) llevados a cabo tanto en Miembro Inferior como en el Miembro Superior.

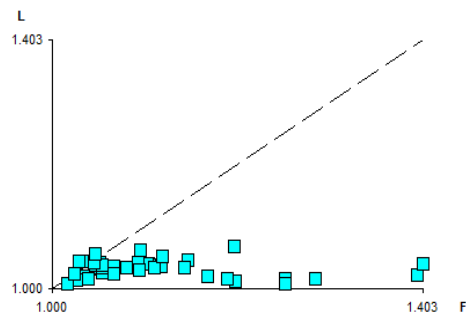
Las diferencias entre los elipsoides de deformación, prolatos para las Unidades 1 y 2 del Miembro Inferior y oblatos, para las Unidades 3 y 4 del Miembro Superior (Figura 21, diagramas L vs. F), permiten determinar la existencia de por lo menos dos estancias deformaciones afectando las rocas de la Formación Amagá.



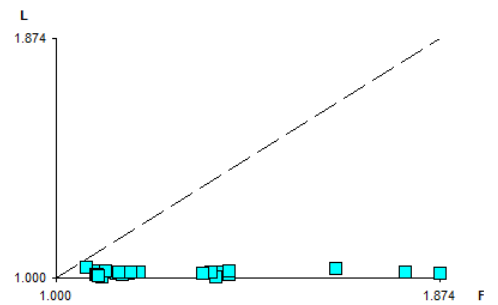
a.



b.



c.



d.

Figura 21. Diagramas de relación entre Lineación magnética y Foliación magnética para el Miembro Inferior y Miembro Superior de la Formación Amagá. a) Unidad 1-Miembro Inferior. b) Unidad 2-Miembro Inferior. c) Unidad 3-Miembro Superior. d) Unidad 4-Miembro Superior.

Un esquema del modelo de procesos que incidieron en la deformación para el Miembro Superior de la Formación Amagá se puede estructurar a partir de las siguientes consideraciones (Figura 22):

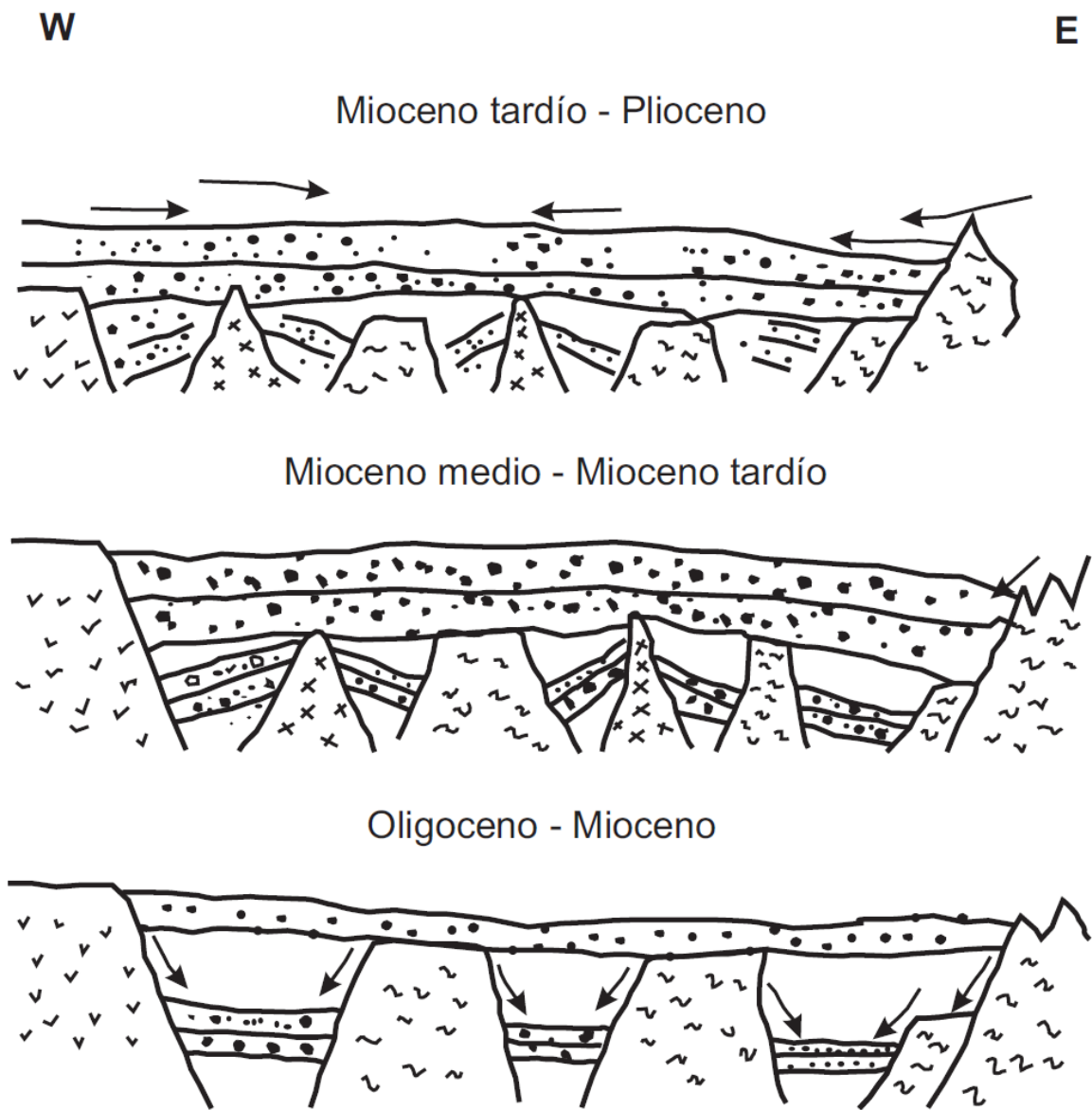


Figura 22. Esquema del modelo de procesos que incidieron en la deformación del Miembro Superior de la Formación Amagá (Tomado y modificado de Sierra, 1994).

- Eoceno (?) Oligoceno – Mioceno

Se presentan esfuerzos transtensionales dextrales del sistema de fallas Romeral. Se desarrollan fallas normales con tendencia NE-SW (Sierra y Marín-Cerón, 2012). Se deposita el Miembro Inferior de la Formación Amagá.

- Mioceno medio – Mioceno tardío

Subducción de la placa Nazca bajo la placa Suramérica. Se genera un desplazamiento lateral izquierdo. La cuenca Amagá es confinada, acompañada de estructuras compresivas que originan pliegues y fallas de cabalgamiento en sentido NE (Sierra y Marín-Cerón, 2012).

Se deposita el Miembro Superior de la Formación Amagá. Durante este tiempo se desarrolla un sistema de fallas con dirección NW-SE que controla el trayecto del río Cauca afectando las rocas de la Formación Amagá (Sierra y Marín-Cerón, 2012).

- Mioceno tardío – Plioceno

Como consecuencia de este régimen compresivo, el sentido de los esfuerzos dominantes se invierten, se desarrollan movimientos sinestrales en el sistema de fallas de Romeral. Los sedimentos del Miembro Inferior y Superior de la Formación Amagá son rotados (Sierra y Marín-Cerón, 2012).

## 9. CONCLUSIONES

La técnica de muestreo para el análisis de ASM, requiere de un estricto protocolo tanto en la recolección de las muestras en campo, como de su posterior tratamiento en el laboratorio. Este protocolo incluye desde la forma correcta del manejo de las herramientas y equipos de campo, la estricta marcación de las muestras, hasta el cuidado en el proceso de corte en laboratorio, de tal forma que las muestras queden de un tamaño estándar y evitando en lo posible, la destrucción o fracturamiento del empaquetamiento con el que la roca fue extraída del afloramiento, lo que permite asegurar que las estructuras minerales no fueron afectadas.

El éxito de las mediciones y posterior análisis paleomagnéticos en el laboratorio, depende en gran medida de la calidad de las muestras y de la adecuada toma de datos en campo.

Los valores de la susceptibilidad magnética para la sección quebrada Sabaleticas del Miembro Superior de la Formación Amagá son bajos (el promedio es de  $250,0 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ), debido a que el principal constituyente de las rocas sedimentarias que lo conforman, es el cuarzo (mineral diamagnético) y a la abundante presencia de cemento calcáreo.

Los aportes de minerales magnéticos a la susceptibilidad magnética en la quebrada Sabaleticas están representados principalmente por la presencia de dos minerales paramagnéticos: la hornblenda y la glauconita.

En la Unidad 3, los valores de susceptibilidad magnética presentan una serie de altos y bajos debido a la intercalación de estratos de arenas y limolitas. En los estratos de arenas, los valores de susceptibilidad aumentan debido a la concentración de hornblenda y glauconita principalmente; en los estratos de limolitas, los valores de susceptibilidad disminuyen debido a la presencia de carbonatos que reducen de manera significativa la susceptibilidad.

En la Unidad 4, susceptibilidad magnética presenta una tendencia de valores muy bajos, debido primero a la mínima concentración de hornblenda, segundo a la mayor presencia de líticos metamórficos que no aportan susceptibilidad magnética significativa y tercero, la concentración de carbonatos en algunos de sus estratos. La muestra S14 de esta misma Unidad 4 refleja un pico en la susceptibilidad magnética, debido a una pequeña concentración de óxidos (hematita?).

El pico más sobresaliente (S5, con  $1193,20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) se debe a una alta concentración de hornblenda, sumado a la presencia de clorita (mineral hallado sólo en esta muestra).

Del análisis direccional y de la forma de los elipsoides magnéticos, se desprende que los sitios muestreados para ASM presentan una fábrica magnética deformacional superimpuesta a la fábrica depositacional.

El grado de anisotropía de susceptibilidad magnética del Miembro Superior de la Formación Amagá es alto, con elipsoides de deformación de formas oblatas.

La relación entre los parámetros de Lineación y Foliación magnética permite determinar un dominio de la Foliación magnética sobre la Lineación magnética.

La fábrica magnética de las rocas de la Unidad 3 del Miembro Superior de la Formación Amagá, presenta un mejor agrupamiento de los  $K_1$  con respecto a los de la Unidad 4 que se muestran más dispersos, lo que determina diferentes procesos de deformación al interior del Miembro Superior.

La dirección de tendencia de la fábrica magnética para el Miembro Superior de la Formación Amagá es NW-SE.

La diferencia en la orientación de los ejes  $K_1$  para el Miembro Superior y Miembro Inferior es el resultado de una historia de deformación diferente, lo que implica por lo menos dos procesos de deformación diferentes.

## **10.RECOMENDACIÓN**

Se sugiere un trabajo continuado en la toma de datos paleomagnéticos que cubra toda el área de la Formación Amagá para lograr un mapeo de zonas de deformación y aportar nueva información acerca de las relaciones entre esta zona y las estructuras deformaciones regionales.

## REFERENCIAS

- AGICO, 2011. User Manual SAFYR4W. 45p.
- Alemán, A., y Barros, V.A., 2000. Northern Andes. Tectonic Evolution of South America. Brazil, 453 – 480.
- Alfonso, C., Sacks, P., Secor, D., Rine, J., and Pérez, V., 1994. A Tertiary fold thrust belt in the Valle del Cauca Basin, Colombia Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 7 (3-4), 387 – 402.
- Aspden, J.A., MacCourt, W.J., Brook, M., 1987. Geometrical control of subduction - related magmatism: The Mesozoic and Cenozoic Plutonic history of Western Colombia. *Journal of the Geological Society of London*, 144, 893 - 905.
- Averbuch, O., Frizon de Lamotte, D., Kissel, C., 1992. Magnetic fabric as a structural indicator of the deformation path within a fold-thrust structure: a test case from the Corbières (NE Pyrenees, France). *Journal of Structural Geology*, 14 (4), 461 - 474.
- Bartel, A.A., Bidegain, J.C., y Sinito, A.M., 2005. Propiedades magnéticas de diferentes suelos del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60 (3), 591 – 598.
- Berner, R., 1971. Principles of chemical sedimentology. International Series in the Earth & Planetary Sciences. McGraw-Hill, 240p.
- Bidegain, J.C., Osterrieth, M., Van Velzen, A., y Rico Y., 2005. Geología y registros magnéticos entre arroyo La Tapera y Santa Clara, Mar del Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60 (3), 599 – 604.
- Bidegain, J.C., Terminiello, L., Rico, Y., Mercader, R.C. y Aragón, E., 2004. Mineralogía magnética en la transición Brunhes / Matuyama. Pleistoceno de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (2), 193 – 199.
- Borradaile, G.J., 1988. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*, 156, 1 - 20.

- Borradaile, G.J., 2001. Magnetic fabrics and petrofabrics: their orientation distributions and anisotropies. *Journal of Structural Geology*, 23, 1581 – 1596.
- Borradaile, G.J., y Henry, B., 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth Science Reviews*, 42, 49 - 93.
- Borradaile, G. J. y Tarling, H., 1981. The influence of deformation mechanisms on magnetic fabrics in weakly deformed rocks. *Tectonophysics*, 77, 151 - 168.
- Botero, A., Carrera, D., Gómez, A., Londoño, C., Mesa, J., Quintero, J.D., Reyes, M., 2011. Aporte al conocimiento estratigráfico-estructural de la Formación Amagá, sección Cerro Amarillo – Quebrada Sabaleticas, Suroccidente Antioqueño. Informe Campo II, Universidad EAFIT, Medellín, 24p.
- Bustamante, A., Cardona, A. y Durán, C., 1999. Estratigrafía y Petrogénesis de las Sedimentitas Paleozoicas en el flanco Occidental de la cordillera Central, departamento de Antioquia. Trabajo de Grado en geología. Universidad EAFIT, 102 p.
- Camacho, V., 2010. Integración de parámetros magnéticos y gamma ray vía RND, en el pozo Saltarín 1-A, Colombia. Tesis de Pregrado en Ingeniería Geofísica. Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 260p.
- Casas, J.M., Parés, J.M., y Megías, L., 1998. La fábrica magnética de los materiales Cambroordovícicos de la parte Oriental del anticlinal de La Massana (Andorra, Pirineo Central). *Sociedad Geológica de España*, 11 (3-4), 317 – 329.
- Corredor, F., 2003. Eastward extent of the Late Eocene-Early Oligocene onset of deformation across the Northern Andes: constrains from the Northern portion of the Eastern Cordillera fold belt, Colombia. *Journal of the South American Earth Sciences*, 16, 445 – 457.
- Dengo, C.A., and Covey, M.C., 1993. Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for trap and regional tectonics. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 77 (8), 1315 – 1337.
- Dimate, C., Rivera, L., Taboada, A., Delouis, B., Osorio, A., Jiménez, E., Fuenzalida, A., Cisternas, A., and Gómez, I., 2003. The 19<sup>th</sup> January Tauramena (Colombia) earthquake: geometry and stress regime. *Tectonophysics*, 363, 159 – 180.

- Dinarès-Turell, J., McClelland, E., Santanach, P., 1991. Significado de la fábrica magnética de algunas rocas sedimentarias de las Unidades sudpirenaicas. Revista: Sociedad Geológica de España, 4, 179 - 186.
- Duque-Caro, H., 1990. El Bloque Chocó en el Noroccidente Suramericano: Implicaciones Estructurales, Tectonoestratigráficas y Paleográficas. Boletín Geológico de Ingeominas, 31 (1), 47 – 71.
- Ego, F., Sébrier, M., Lavenue, A., Yepes, H., and Egues, A., 1996. Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes. Tectonophysics, 259, 101 – 116.
- Gil, A. y Parés, J.M., 1996. Fábrica magnética en las limolitas wealdenses del borde oriental de la Cuenca de Cameros (Cordillera Ibérica): correlación con la deformación finita. Geogaceta, 20 (5), 1047 - 1049.
- González, H., 1976. Informe sobre la Geología del Cuadrángulo J-8 Sonsón. Informe 1704. Bogotá, Ingeominas, 421p.
- González, H., 2001. Memoria explicativa del mapa geológico del departamento de Antioquia. Ingeominas. Bogotá, 256p.
- Grosse, E., 1926. Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte Occidental de la cordillera Central de Colombia entre el río Arma y Sacaojal. Ed. Dietrich Reimer (Ernst Vohsen). Berlín, 361p.
- Grösser, J.R., 1989. Geotectonic evolution of the Western Cordillera of Colombia: New aspects from geochemical data on volcanic rocks. Journal of South American Earth Science, 2, 359 - 369.
- Giunta, G, Beccaluva, L., Coltorti, M., Siena, F., and Vaccaro, C., 2002. The Southern Margin of the Caribbean Plate in Venezuela: Tectono-Magnetic Setting of the Ophiolitic Units and Kinematic Evolution. Lithos, 63, 19 – 40.
- Hrouda, F., 1973. A determination of the symmetry of the ferromagnetic mineral fabric in rocks on the basis of the magnetic susceptibility. Geophysik, 82, 390-396.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. Geophysical Survey, 5, 37 - 82.

- Hrouda, F. y Janák, F., 1976. The changes in shape of the magnetic susceptibility ellipsoid during progressive metamorphism and deformation. *Tectonophysics*, 34, 135 - 148.
- Hrouda, F. y Lanza, R., 1989. Magnetic fabric in the Biella and Traversella stocks (Periadriatic line): implication for the mode of emplacement. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 56, 337 - 348.
- Hrouda, F. y Stráník, Z., 1985. The magnetic fabric of the Zdanice thrust sheet of the flysch belt of the West Carpathians: sedimentological and tectonic implications. *Sedimentary Geology*, 45, 125 - 145.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)., 1979. Plancha topográfica Cuadrángulo 166- IV- A. Escala 1:25.000. Bogotá.
- Jelínek, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, 63 - 78.
- Kellogg, J.N., and Bonini, W.E., 1982. Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South America plate. *Tectonics*, 1 (3), 251 – 276.
- Kellogg, J.N., and Vega, V., 1995. Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: constrains from Global Positioning System geodetic studies and gravity: *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*. Geological Society of America Special Paper, 295, 75 – 90.
- Kellogg, J.N., Ogujiofor, I.J., and Kansakar, D.R., 1985. Cenozoic tectonics of Panama and North Andes Blocks. IV Congreso Latinoamericano de Geología, Bogotá – Colombia, 42 – 49.
- Kerr, A.C., Tarney, J., Nivia, A., Marriner, G., and Saunders, A., 1998. The Internal Structure of Oceanic Plateaus: Inferences from Obducted Cretaceous Terrane in Western Colombia and The Caribbean. *Tectonophysics*, 292, 173 – 188.
- Kerr, A.C., Iturralde, M.A., Saunders, A.D., Babbs, T.L., and Tarney, J., 1999. A New Play Tectonic Model of the Caribbean: Implication from a Geochemical Reconnaissance of Cuban Mesozoic Volcanic Rocks. *Geological Society of American Bulletin*, 111, 1581 – 1599.

- López, A., Ramírez, D., y Sierra, G.M., 2006. Vulcanismo Neógeno en el Suroccidente antioqueño y sus implicaciones tectónicas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 19, 27 – 42.
- Lowrie, W. y Hirt, A.M., 1987. Anisotropy of magnetic susceptibility in the Scaglia Rossa pelagic limestone. *Earth and Planetary Science Letters*, 82, 349 - 356.
- MacDonald, W.D., 1980. Anomalous paleomagnetic directions in Late Tertiary andesitic intrusions of the Cauca Depression, Colombian Andes. *Tectonophysics*, 339 – 348.
- MacDonald, W.D., Estrada, J.J., Sierra, G.M., and González, H., 1996. Late Cenozoic tectonics and paleomagnetism of North Cauca Basin intrusions, Colombia Andes: Dual rotation modes. *Tectonophysics*, 261, 277 – 289.
- Mann, P., and Corrigan, J., 1990. Model for late Neogene deformation in Panama. *Geology*, 18, 558 – 562.
- McCourt, W.J., Aspden, J.A., and Brook, M., 1984. New Geological and Geochronological data from the Colombian Andes: Continental Growth by Multiple Accretion. *Journal of Geological Society of London*, 141, 831 – 845.
- Mejía, M., James, M., y Arias, L.A., 1988. Evaluación de amenazas geológicas en el área Manizales - Valparaíso. INGEOMINAS, sede Medellín.
- Moreno, N., 2011. Análisis de la petrología, área fuente y diagénesis de las areniscas de la Formación Amagá en los Pozos Venecia-1 y El Cinco-1B. Tesis de Pregrado en Geología. Universidad EAFIT, 81p.
- Páez, L., M.I. Marín-Cerón y G.M. Sierra, 2011. Reconstrucción estratigráfica del Miembro Superior de la Formación Amagá en los sectores de La Pintada y Valparaíso (Cuenca Amagá, Andes noroccidentales). *Memorias XIII Congreso Colombiano de Geología y XIV Congreso Latinoamericano de Geología*, 285pp.
- Pardo, A., y Moreno, M., 2001. Estratigrafía del occidente colombiano y su relación con la evolución de la Provincia ígnea Cretácica del Caribe Colombiano. *VIII Congreso Colombiano de Geología*, 19 – 20.

- Parés, J.M., 1988. La utilización de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) en el estudio de la deformación finita: ejemplo en la zona milonítica de Cap de Creus (Catalunya). *Geogaceta*, 5, 30 - 33.
- Parés J.M., Van der Pluijm, B.A., Dinarès-Turell, J., 1999. Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pynenees, Northern Spain). *Tectonophysics*, 307, 1 - 14.
- Parés, J.M. y Dinarès-Turell, J., 1993. Magnetic fabric in two sedimentary rock types from the Southern Pyrenees. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45, 193 - 205.
- Pennington, W.D., 1981. Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11), 10753 – 10770.
- Pindell, J.L., 1997. Tectonic Evolution and Stratigraphic Development of Northern South America. VI Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas.
- Pueyo, O., González, A., Ipas, J., Manuel, J., Orgaz, J.A., Rodés, A., Teixido, F., Gil, A., Millán, H., 2004. Análisis de la deformación a partir del estudio de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) en una estructura de pliegues y cabalgamientos. Ejemplo de un corte del sector central del Pirineo Oscense. *Geo-Temas*. 4 (6), 328 - 330.
- Ramos, V.A., 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*, 22 (3), 183 – 190.
- Rathore, J.S., 1979. Magnetic susceptibility anisotropy in the Cambrian Slate Belt of North Wales and correlation with strain. *Tectonophysics*, 53, 83 - 97.
- Restrepo, J.J. y Toussaint, J.F., 1988. Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. *Episodes*, 11, 189 -193.
- Robion, P., Grelaud, S., and Frizon de Lamotte, D., 2007. Pre-folding magnetic fabrics in fold-and-thrust belts: ¿Why the apparent internal deformation of the sedimentary rocks from the Minervois basin (NE – Pyrenees, France) is so high compared to the Potwar basin (SW – Himalaya, Pakistan)? *Sedimentary Geology*, 196, 181 – 200.


- Rochette, P., 1988. Inverse magnetic fabric in carbonate-bearing. *Earth and Planetary Science Letters*, 90, 229 - 237.
- Sierra, G.M., 1994. Structural and Sedimentary Evolution of the Irra Basin, Northern Colombia Andes. Tesis de Maestría Binghamton University. New York, 102p.
- Sierra, G.M., Silva, J.C., y Correa, L.G., 2003. Estratigrafía secuencial de la Formación Amagá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 15, 9 - 22.
- Sierra, G.M., Marín-Cerón, M.I., y MacDonald, W., 2011. Fábrica magnética de los sedimentos de la Formación Amagá. XIV Congreso Latinoamericano de Geología y XIII Congreso Colombiano de Geología. Medellín. Memorias.
- Sierra, G.M. and Marín-Cerón, M.I., 2012. Amagá, Cauca Patía Basin. In *Petroleum Geology of Colombia*. Editor. Fabio Cediél. Vol (2) Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Silva, J.C., Sierra, G.M., and Corre, L.G., 2008. Tectonic and climate driven fluctuations in the stratigraphic base level of a Cenozoic continental coal basin, northwestern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 369 - 382.
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip H., Bijwaard, H., Olaya, J., y Rivera, C., 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, (19) 5, 787 - 813.
- Tarling, D.H, and Hrouda, F., 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, Londoño, 217p.
- Toussaint, J.F., 1999. Evolución Geológica de Colombia: Pre-Cámbrico a Cenozoico, 103p.
- Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymuller, J.T., and Mora, H.P., 2002. Wide plate margin deformation, Southern Central America and Northwestern South America, CASA GPS Observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 157 – 171.
- Van der Hammen, T., 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. *Boletín Geológico*, 6 (1-3), 70-128.

## ANEXOS

Anexo 1. Coordenadas de los sitios muestreados para ASM. Coordenadas planas Origen Bogotá.

<b>Estación</b>	<b>Coordenada Este</b>	<b>Coordenada Norte</b>	<b>Altura (msnm)</b>
JS1	832.905	1.132.889	870
JS2	832.679	1.133.000	864
JS3	832.448	1.133.153	830
JS4	832.381	1.133.258	829
JS5	832.235	1.133.336	811
JS6	832.167	1.133.407	811
JS7	832.093	1.133.494	800
JS8	831.987	1.133.842	825
JS9	831.684	1.133.839	774


Anexo 2. Planilla para toma de datos en campo de muestras para análisis paleomagnéticos. Laboratorio de Paleomagnetismo Universidad EAFIT.

LABORATORIO DE PALEOMAGNETISMO											
TOMA DE DATOS EN CAMPO PARA ANÁLISIS PALEOMAGNÉTICOS											
Estación	Ubicación (X,Y)	Nombre de la muestra	Tipo de Muestra			Dato estructural de la muestra			Dato estructural de referencia		
			Cilindro	Caja	M.de mano	Dirección (Azimuth)	Buzamiento	Inclinación	Tipo	Dirección (Azimuth)	Buzamiento
	X: Y:										
	X: Y:										
	X: Y:										
	X: Y:										
	X: Y:										
	X: Y:										
	X: Y:										
	X: Y:										

Anexo 3. Posiciones de medida para ASM en muestras cilíndricas (Jelínek, 1981).



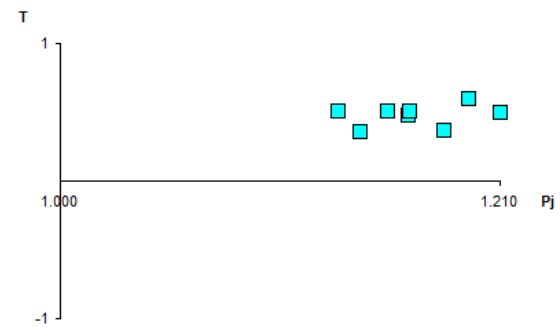
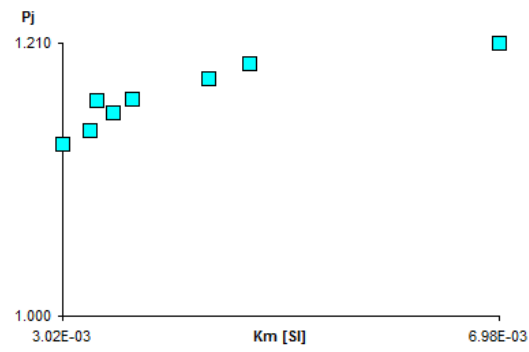
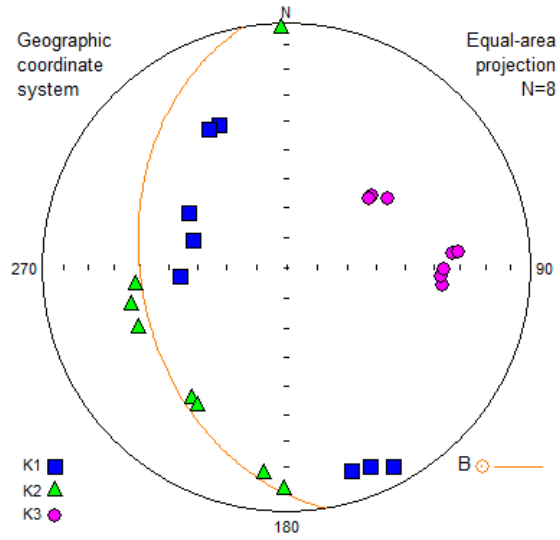
Anexo 4. Plantilla para ingreso de datos al software para ASM. AGICO, 2011.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Site name					<div style="background-color: #00b0f0; color: white; padding: 5px;"> <b>GED Editor</b> <div style="float: right; text-align: center;">                       Martin Chadima                      Agico, Inc.  <a href="http://www.agico.com">www.agico.com</a> </div> <div style="clear: both;"></div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <span>Import GED</span> <span>Save GED</span> <span>Clear all</span> </div> </div>									
2	Longitude														
3	Latitude														
4	Rock														
5	Stratigraphy														
6	Lithostratigraphy														
7	Regional unit														
8	Orientation parameters	P1 12	P2 0	P3 12	P4 0										
10	Specimen name	Orientation		Foliation 1		Lineation 1			Foliation 2			Lineation 2			
11		Azimuth	Plunge	Code	Dip dir.	Dip	Code	Trend	Plunge	Code	Dip dir.	Dip	Code	Trend	Plunge
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															
29															
30															
31															

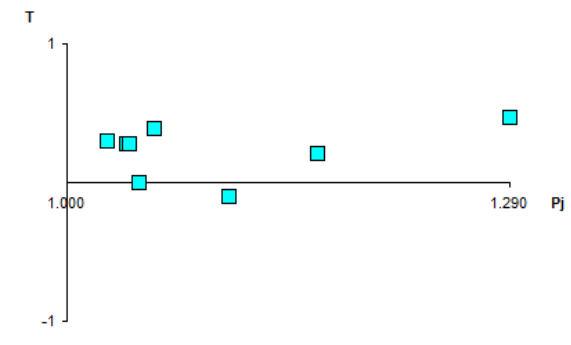
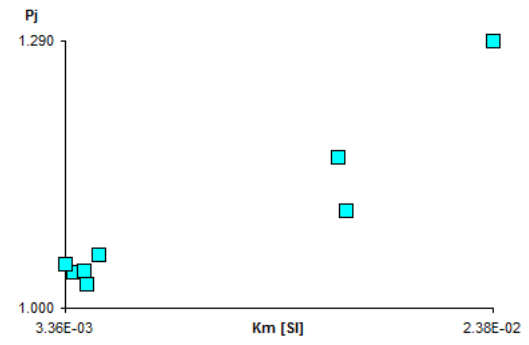
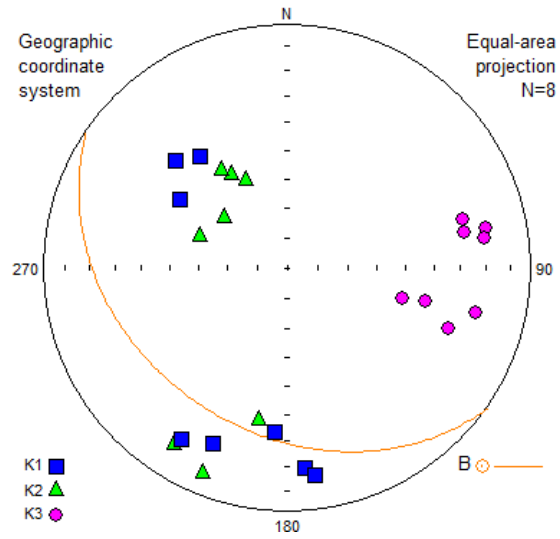
Anexo 5. Estereogramas con las orientaciones axiales de los elipsoides de ASM y diagramas de Pj vs.Km y T vs. Pj.  
 K<sub>1</sub>: cuadros azules; K<sub>2</sub>: triángulos verdes; K<sub>3</sub>: círculos fucsia; plano de estratificación: arco crema.

UNIDAD 3

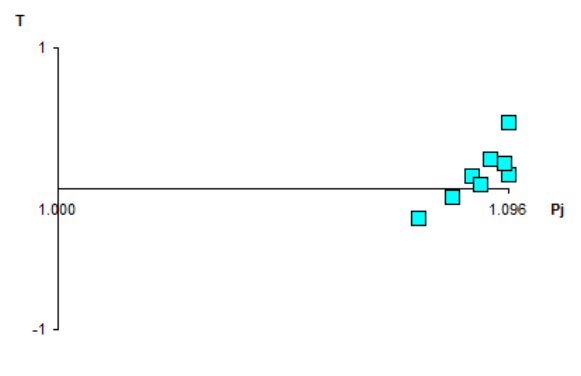
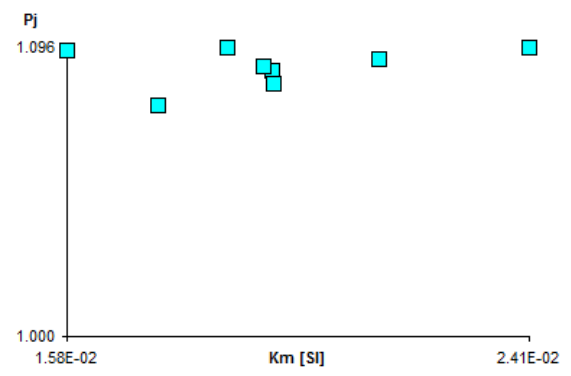
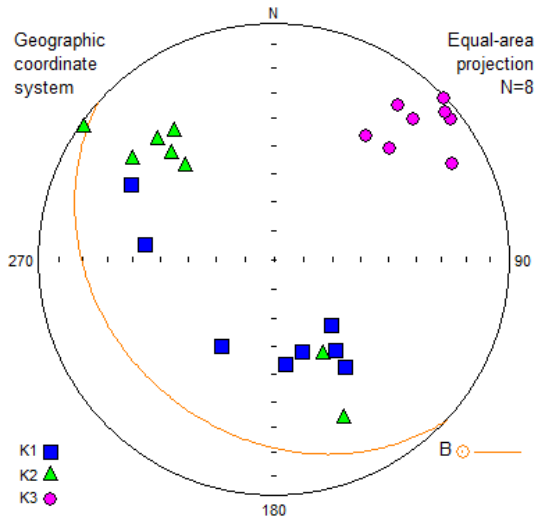
JS1



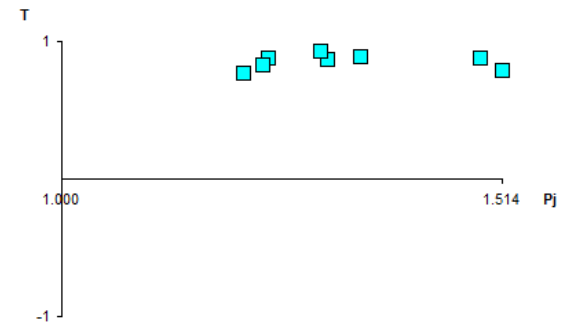
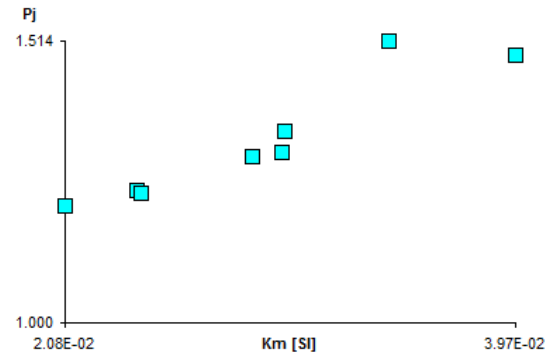
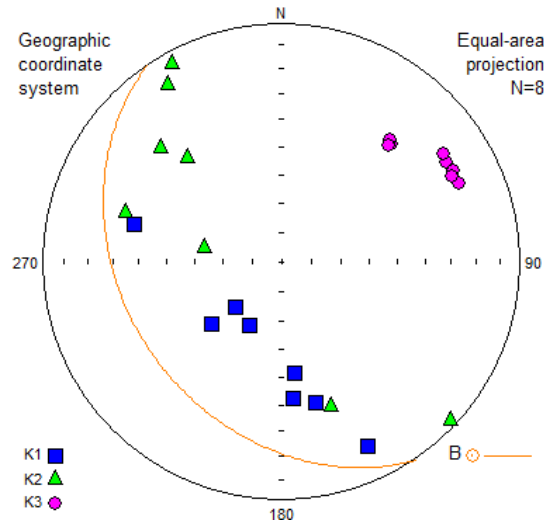
**JS2**



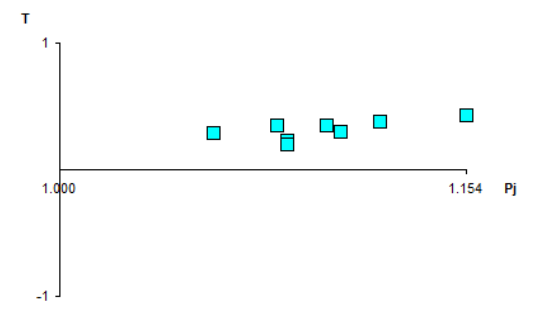
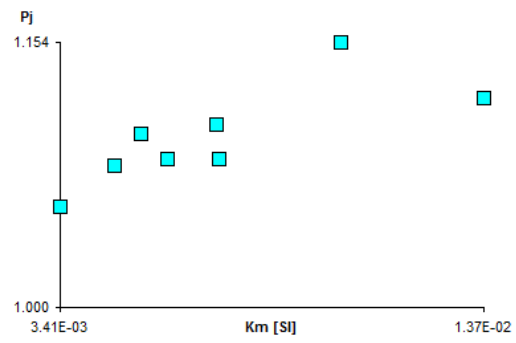
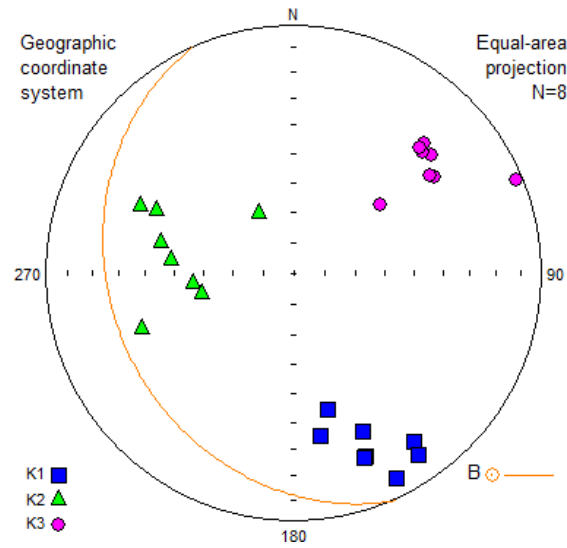
**JS3**



**JS4**

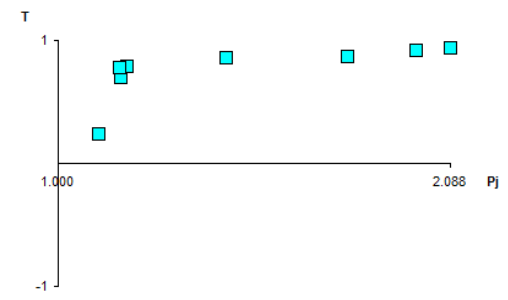
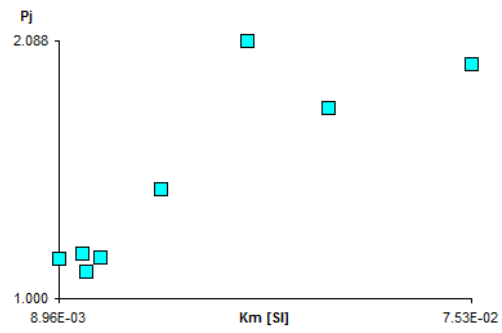
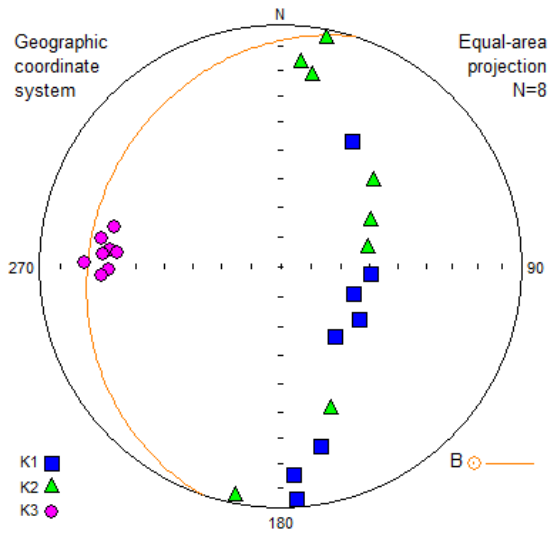


**JS5**

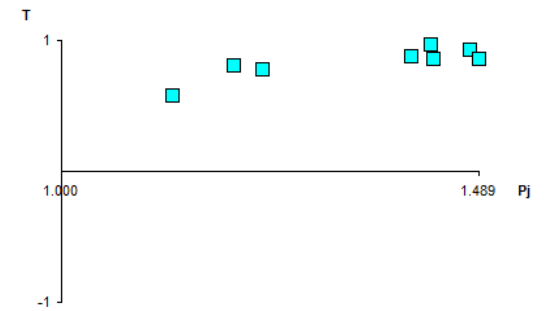
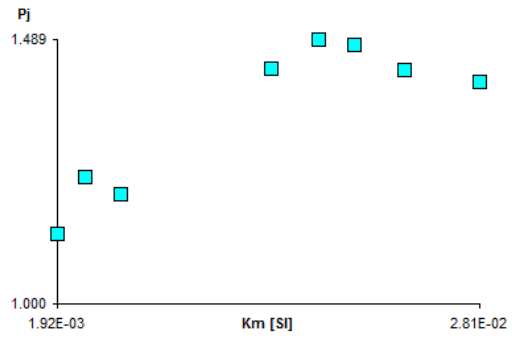
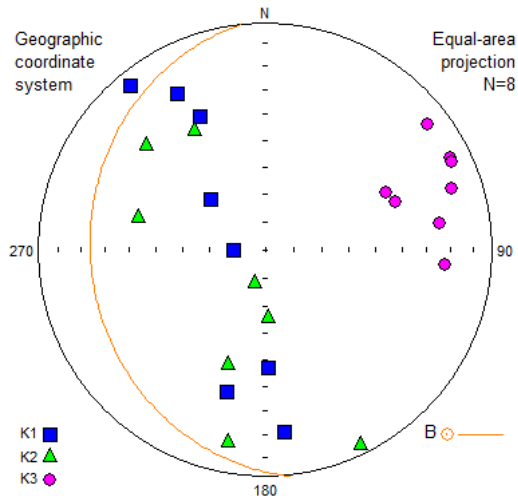


# UNIDAD 4

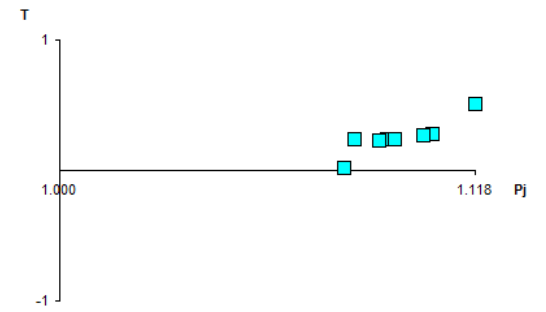
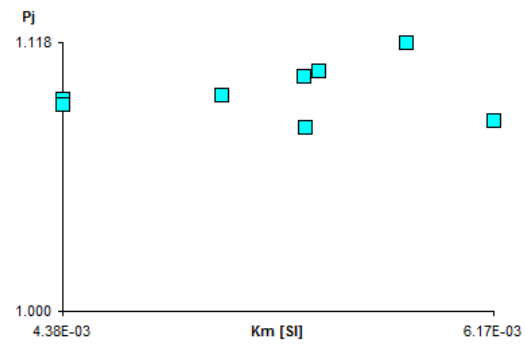
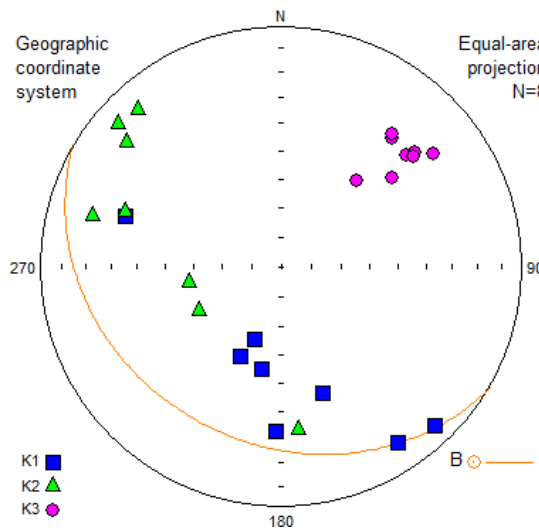
**JS6**



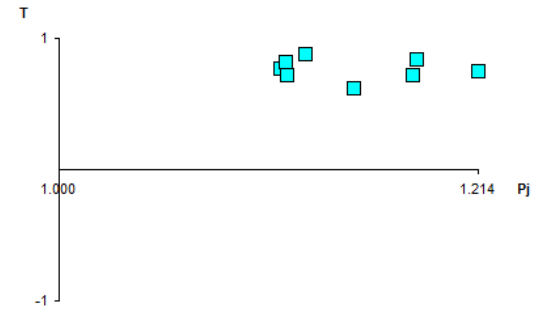
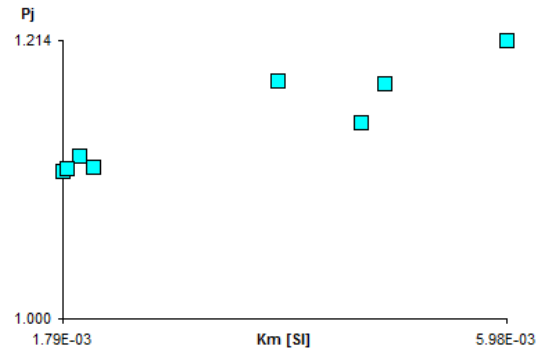
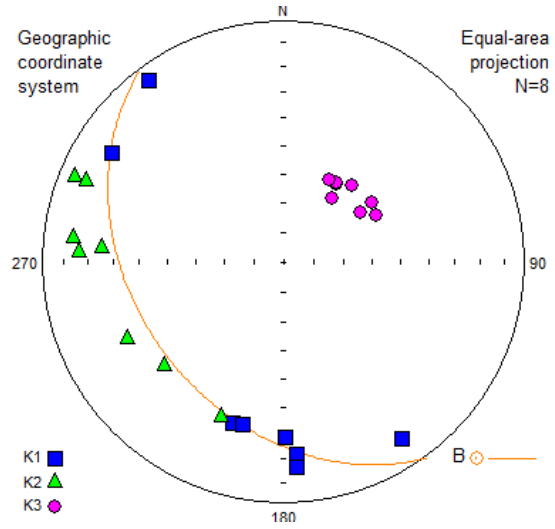
**JS7**



**JS8**

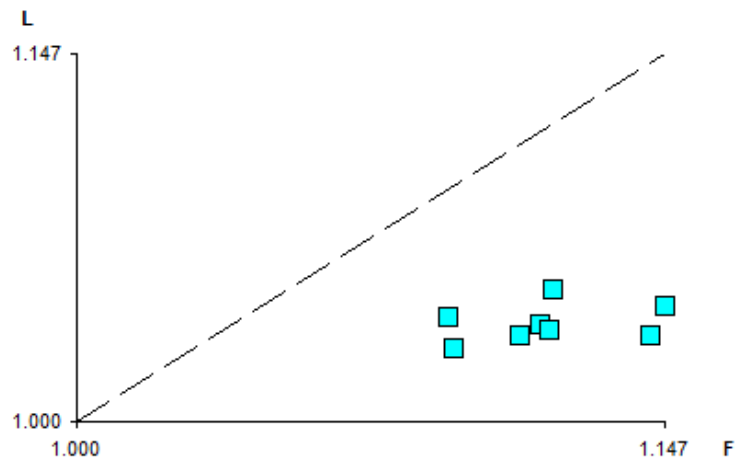


**JS9**

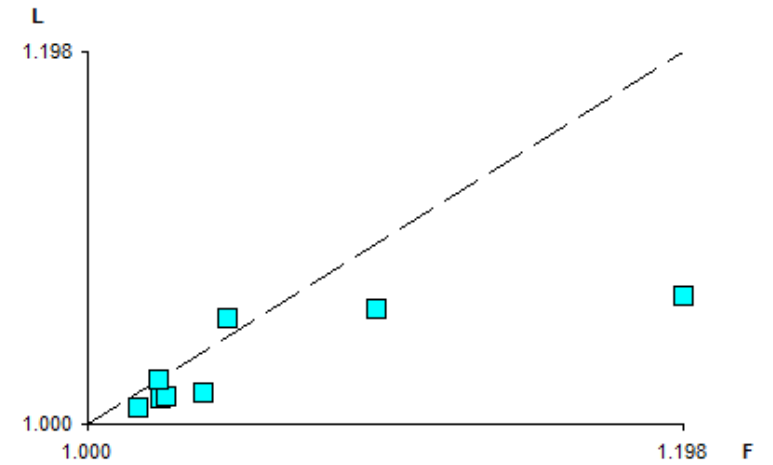


Anexo 6. Gráfica de relación Lineación magnética vs. Foliación magnética.

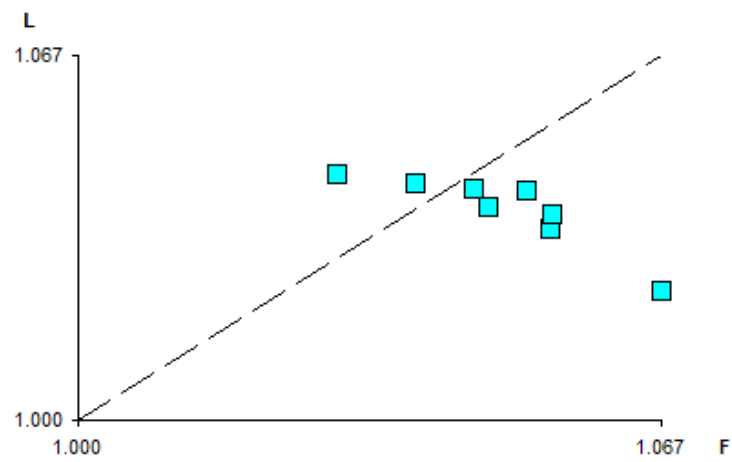
**JS1**



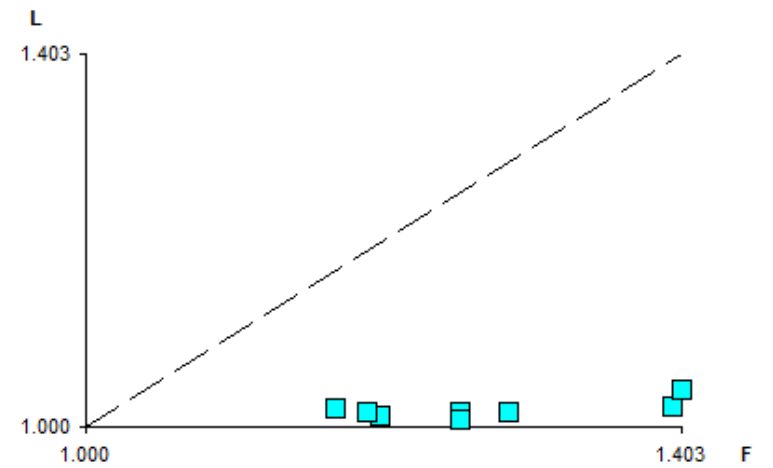
**JS2**



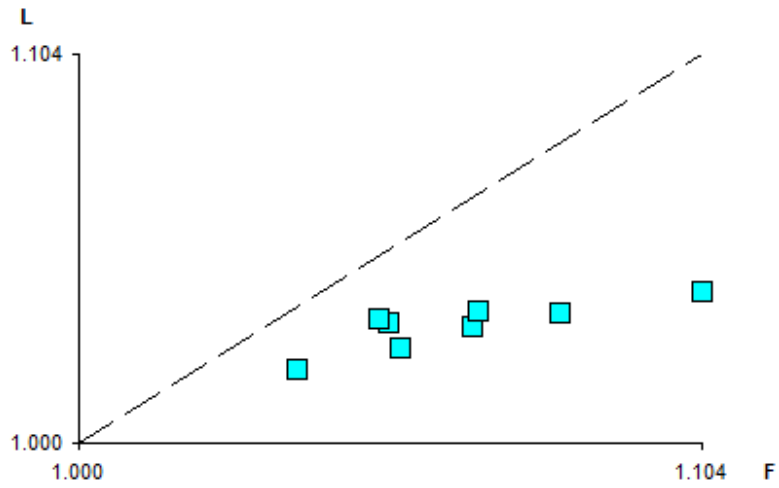
**JS3**



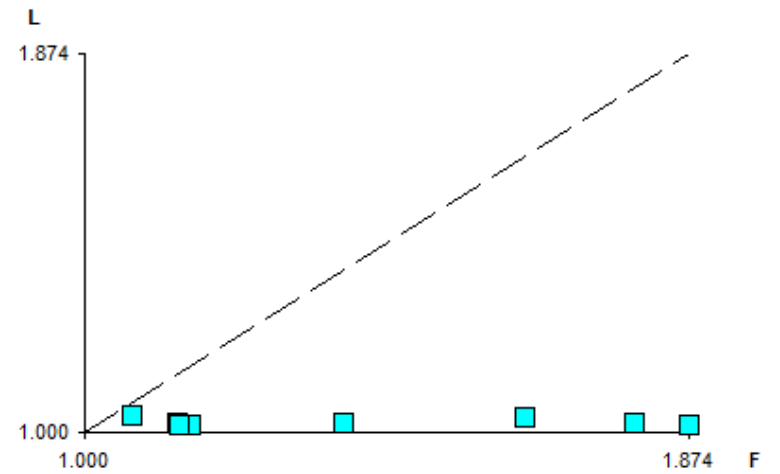
**JS4**



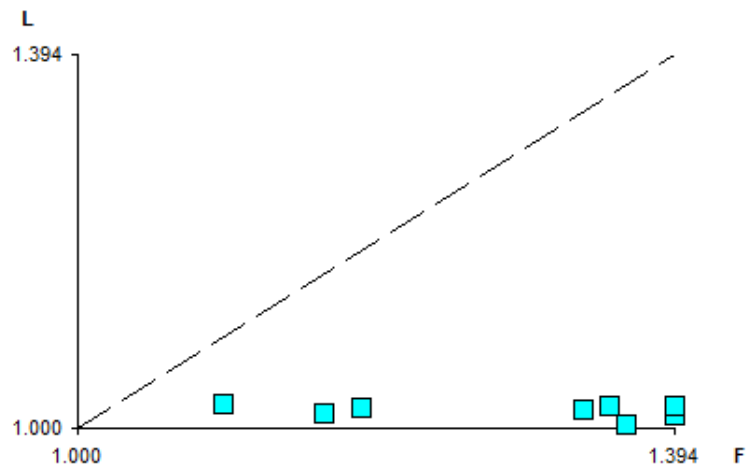
**JS5**



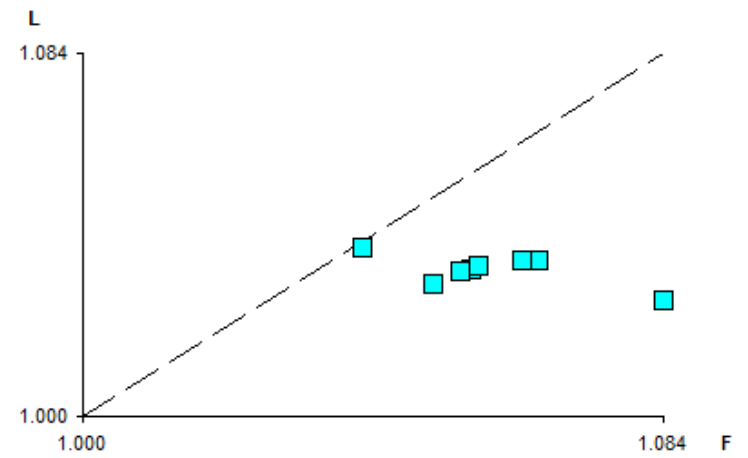
**JS6**



**JS7**



**JS8**



JS9

