



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio paleomagnético de lavas y flujos piroclásticos de edad Plioceno-Holoceno de los complejos volcánicos del centro- occidente y sur-occidente de Colombia

Alexander Sánchez Duque

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C., Colombia
2012

Estudio paleomagnético de lavas y flujos piroclásticos de edad Plioceno-Holoceno de los complejos volcánicos del centro-occidente y sur-occidente de Colombia

Alexander Sánchez Duque

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Geofísica

Ph.D. Victoria Mejía Bernal
Directora

Línea de Investigación:
Paleomagnetismo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C., Colombia
2012

Dedico este trabajo de grado a mis queridos padres y hermanos, Octavio y Luz Marina, Andrés y Luz María, a quienes siempre llevo en lo más profundo de mi ser. Es un orgullo pertenecer a tan bonita familia.

A la memoria de mi amigo Giovanni Andrés Villanueva Martínez, quien se apresuró a abandonar esta forma de existencia mientras me encontraba realizando el trabajo de laboratorio en Gainesville (USA).

Agradecimientos

En primer lugar, mis más profundos y sinceros agradecimientos a mi directora de tesis, Victoria Mejía Bernal, quien durante el desarrollo de la tesis siempre se caracterizó no sólo por ser una excelente tutora académica sino también en ser una gran consejera, motivadora y guía. Además, agradezco igualmente a su esposo Jorge Iván por sus útiles consejos médicos y personales.

Infinita es la deuda de gratitud que tengo con mi hermana Luz María, mi gran apoyo y compañía durante estos años de agridulce estadía en Bogotá. Fue ella quien me ayudó a levantarme en los más duros momentos que tuve en el transcurso de la maestría.

En los aspectos relacionados con el desarrollo de la tesis, agradezco por la gran ayuda en el trabajo de campo a mis compañeros de pregrado en Ingeniería Física Xiomara Jiménez, Jorge Montes y Paula Arboleda, a mi hermano Octavio Andrés, al geólogo Alejandro Pinilla, al geofísico John Barragán, y a los conductores de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales Lisley Rojas, Édgar Calderón y “Lucho”. Gracias al *Research Center for Paleomagnetism and Environmental Magnetism at the University of Florida* en Gainesville (USA), en especial al Dr. Neil D. Opdyke por invitarme a trabajar allí, al Dr. Kainian Huang por guiarme durante todo el trabajo de laboratorio y al Dr. James E.T. Channell por permitirme usar los equipos del laboratorio durante los cuatro meses que duró mi estadía allí.

También extendiendo los agradecimientos a mis compañeros y a toda la gente que hace parte de la maestría en Geofísica y del Departamento de Geociencias, quienes directa o indirectamente también colaboraron con la finalización de este trabajo, en especial gracias a Mónica Tabima, Luzby Arenas y Carlos Lozano.

Para finalizar, quiero dar las gracias a las instituciones que apoyaron esta tesis con aportes económicos, insumos, equipos y/o laboratorios: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, con su Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, y su Dirección de Investigaciones (DIMA); University of Florida (USA); Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP) y Corporación Geológica ARES por su VII convocatoria para la promoción de jóvenes investigadores.

Gracias a la vida por permitirme conocer algunos de los misterios de nuestra amada madre Tierra y del insondable Universo; gracias a la música por hacer más placentero este camino que he escogido.

... y aunque en términos generales no me agradan las religiones y quienes las manejan ... JESÚS: ¡EN VOS CONFÍO!

Resumen

Cincuenta y dos lavas del Pleistoceno a la actualidad del complejo volcánico del centro-occidente de Colombia y cuarenta lavas del Plioceno a la actualidad pertenecientes a los complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia han sido muestreados para realizar estudios de campo geomagnético promediado en el tiempo (TAF) y variaciones paleoseculares. Un total de 10 núcleos fueron extraídos por lava (sitio), siendo sometidos a desmagnetización progresiva AF y térmica. Posteriormente se realizaron análisis de componentes principales y cálculos de la dirección media por sitio, 40 sitios del complejo volcánico del centro-occidente de Colombia (37 y 3 con polaridad normal e inversa, respectivamente) y 28 sitios pertenecientes a los volcanes andinos del sur-occidente (16 y 12 con polaridad normal e inversa, respectivamente), con $\alpha_{95} < 5.5^\circ$ fueron seleccionados para cálculos posteriores.

La dirección media para todos los sitios del complejo volcánico del centro-occidente de Colombia ($D = 3.7^\circ$; $I = 6.4^\circ$; $\alpha_{95} = 4.6^\circ$) ajusta bien (a un nivel de confianza del 95%) con la dirección paleomagnética esperada (en el área de estudio) de un campo geomagnético compuesto principalmente por un dipolo axial geocéntrico con un 5% de componente cuadrupolar ($I = 5.59^\circ$), pero no coincide con modelo simple de GAD ($I = 9.8^\circ$). La dispersión de los VGP's (12.5°) es similar a la predicha por el Modelo G (12.0°).

Para los complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia la dirección media para todos los sitios ($D = 357.7^\circ$; $I = 7.0^\circ$; $\alpha_{95} = 7.3^\circ$) ajusta bien (a un nivel de confianza del 95%) con la dirección paleomagnética esperada (en el área de estudio) de un simple campo geomagnético GAD ($I = 3.25^\circ$), pero no coincide con un campo geomagnético compuesto principalmente por un dipolo axial geocéntrico con un 5% de componente cuadrupolar ($I = -1.03^\circ$). La dispersión de los VGP's (14.1°) es similar a la predicha por el Modelo G (11.9°).

Palabras clave: paleomagnetismo, variación paleosecular, Andes Colombianos, TAF, lava.

Abstract

Fifty two Pleistocene to recent lava flows from the west-central volcanic complex of Colombia and forty Pliocene to recent lava flows that belong to the southwestern volcanic complex of Colombia have been sampled for geomagnetic time average field (TAF) and paleosecular variation studies. A total of 10 cores were drilled per lava (site), stepwise AF and thermal demagnetization has been carried out. After principal component analysis and mean-site direction calculations, 40 sites from the west-central volcanic complex (37 and 3 with normal and reverse polarity, respectively) and 28 sites from the southwestern volcanic complex (16 and 12 with normal and reverse polarity, respectively), with $\alpha_{95} < 5.5^\circ$ were selected for further calculations.

The overall mean direction among the sites from the west-central volcanic complex of Colombia ($D = 3.7^\circ$; $I = 6.4^\circ$; $\alpha_{95} = 4.6^\circ$) closely fits (at the 95% confidence level) the expected paleomagnetic direction (at the area of study) of a geomagnetic field composed primarily by a geocentric axial dipole with 5% axial quadrupole component ($I = 5.59^\circ$), but do not coincides with a simple GAD model ($I = 9.8^\circ$). VGP's scatter (12.5°) is similar to that expected from Model G (12.0°).

For the southwestern volcanic complex of Colombia the overall mean direction among the sites ($D = 357.7^\circ$; $I = 7.0^\circ$; $\alpha_{95} = 7.3^\circ$) fits (at the 95% confidence level) the expected paleomagnetic direction (at the area of study) of a geomagnetic field of a simple GAD ($I = 3.25^\circ$), but do not coincides with a geomagnetic field composed primarily by a geocentric axial dipole with 5% axial quadrupole component ($I = -1.03^\circ$). VGP scatter (14.1°) is slightly higher to that expected from Model G (11.9°).

Keywords: paleomagnetism, paleosecular variation, Colombian Andes, TAF, lava.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Lista de figuras.....	15
Lista de tablas.....	19
Glosario.....	21
Lista de símbolos y abreviaturas.....	25
Introducción.....	1
1 Marco teórico.....	5
1.1 Campo magnético de la Tierra.....	5
1.1.1 Representación matemática.....	7
1.1.2 Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF).....	8
1.1.3 Hipótesis del Dipolo Axial Geocéntrico (GAD).....	9
1.1.4 La geodínamo.....	10
1.2 Modelos del campo promediado en el tiempo (TAF).....	10
1.3 Variación secular y paleosecular (SV - PSV).....	12
1.4 Variación Paleosecular en Lavas (PSVL).....	13
1.4.1 Dispersión angular del campo geomagnético.....	13
1.4.2 Modelos de PSVL.....	14
1.4.3 Modelo G.....	15
1.5 Magnetización remanente.....	17
1.5.1 Magnetización Remanente Natural (NRM).....	17
1.5.2 Magnetización Termoremanente (TRM).....	17
1.5.3 Magnetización Remanente Viscosa (VRM).....	18

1.5.4 Magnetización Remanente Isotermal (IRM).....	18
1.5.5 Magnetización Remanente Anhisterética (ARM).....	19
1.5.6 Magnetización Primaria.....	19
1.5.7 Magnetización Remanente Característica (ChRM).....	19
1.6 Análisis de componentes principales (PCA).....	20
1.7 Estadística de vectores.....	20
1.7.1 Estimación de la dirección media.....	20
1.7.2 Estimación de la dispersión.....	22
1.7.3 Comparación entre direcciones.....	23
1.8 Ciclo de histéresis.....	23
1.9 Diagrama tipo Day.....	24
2 Metodología.....	26
2.1 Selección de los sitios de muestreo.....	26
2.2 Muestreo paleomagnético.....	26
2.3 Trabajo de laboratorio.....	28
2.3.1 Preparación de especímenes.....	28
2.3.2 Desmagnetización.....	29
2.3.3 Histéresis.....	30
2.4 Análisis paleomagnético.....	30
2.4.1 Correcciones y ajustes de datos.....	30
2.4.2 Análisis de componentes principales (PCA).....	31
2.4.3 Cálculo de dirección media de sitio y región, y polo paleomagnético por región.....	31
2.5 Análisis magnético.....	34
2.6 Calidad de datos.....	34
2.7 Cálculo de la variación paleosecular en lavas	35
2.8 Correlación magnetoestratigráfica.....	36
2.9 Software utilizado.....	36
3 Configuración tectónica de las zonas de estudio.....	38

3.1 Marco geológico continental: Sur América.....	38
3.2 Marco geológico regional: NVZ.....	40
3.3 Marco geológico local: complejo volcánico del centro-occidente de Colombia (o Ruiz-Tolima).....	42
3.4 Marco geológico local: complejos volcánicos del suroccidente colombiano.	43
4 Resultados paleomagnéticos.....	46
4.1 Complejo volcánico del centro-occidente de Colombia.....	46
4.1.1 NRM y magnetismo de rocas.....	47
4.1.2 Desmagnetización.....	52
4.1.3 Dirección paleomagnética por sitio y región, polo paleomagnético.....	56
4.1.4 Correlación magnetoestratigráfica.....	62
4.2 Complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia.....	64
4.2.1 NRM y magnetismo de rocas.....	68
4.2.2 Desmagnetización.....	71
4.2.3 Dirección paleomagnética por sitio y región, polo paleomagnético.....	75
4.2.4 Correlación magnetoestratigráfica.....	79
4.3 Complejos volcánicos del sur-occidente: Cauca y Nariño.....	82
4.3.1 Departamento del Cauca.....	82
4.3.2 Departamento de Nariño.....	84
4.4 Modelo de un campo tipo GAD más cuadrupolo.....	86
4.5 Variación paleosecular del campo geomagnético.....	88
5 Discusión.....	89
5.1 NRM, magnetismo de rocas y desmagnetización.....	89
5.2 Direcciones, polos paleomagnéticos, implicaciones tectónicas.....	90
5.2.1 Región centro-occidente.....	90
5.2.2 Región sur-occidente.....	91
5.2.3 Región sur-occidente: Cauca y Nariño.....	91
5.2.3.1 Departamento del Cauca.....	91
5.2.3.2 Departamento de Nariño.....	92

5.3 Modelo de un campo tipo GAD más cuadrupolo.....	93
5.4 Variación paleosecular del campo geomagnético.....	94
6 Conclusiones y recomendaciones.....	95
6.1 Conclusiones.....	95
6.2 Recomendaciones.....	96
A Anexo: Base de datos de estudios paleomagnéticos ordenados según su latitud.....	99
Bibliografía.....	103

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Modelo del dipolo geocéntrico inclinado.....	6
Figura 1-2: Componentes vectoriales del campo geomagnético.....	6
Figura 1-3: Ciclo de histéresis.....	24
Figura 2-1: Sitio de muestreo y uso del equipo de extracción de núcleos.....	27
Figura 2-2: Unidad de orientación tipo Pomeroy, toma de datos y muestras rotuladas.....	27
Figura 2-3: Sierra para cortar los núcleos; especímenes obtenidos y rotulados.....	28
Figura 2-4: Magnetómetro criogénico (2-4a); desmagnetizadores tipo AF (2-4b) y térmico (2-4c).....	29
Figura 2-5: Cálculo de dirección media de un sitio empleando estadística fisheriana.....	32
Figura 2-6: Sitio representativo del cálculo de dirección media empleando círculos máximos de remagnetización.....	33
Figura 3-1: Configuración tectónica de Sur América.....	39
Figura 3-2: Mapa de localización de las regiones volcánicas estudiadas.....	41
Figura 4-1: Mapa con sitios de muestreo en el complejo volcánico del centro-occidente.....	47
Figura 4-2: Proyección de áreas iguales de todos los especímenes del complejo volcánico del centro-occidente.....	50
Figura 4-3: Comportamiento de las curvas de histéresis.....	51
Figura 4-4: Diagrama de Day para sitios analizados.....	52
Figura 4-5: Gráficas representativas de la desmagnetización del primer grupo de sitios.....	53

Figura 4-6: Gráficas representativas de la desmagnetización del segundo grupo de sitios...	54
Figura 4-7: Gráficas representativas de la desmagnetización del tercer grupo de sitios.....	55
Figura 4-8: Gráficas representativas de la desmagnetización del cuarto grupo de sitios.....	56
Figura 4-9: Resumen gráfico del procesamiento de todos los especímenes.....	58
Figura 4-10: Resumen gráfico del procesamiento de todos los sitios.....	59
Figura 4-11: Dirección paleomagnética media calculada, región centro-occidente.....	60
Figura 4-12: Polos virtuales geomagnéticos (VGP's), región centro-occidente.....	62
Figura 4-13: Correlación magnetoestratigráfica, región centro-occidente.....	63
Figura 4-14: Mapa con sitios de muestreo en el departamento del Cauca.....	64
Figura 4-15: Mapa con sitios de muestreo en el volcán Galeras y altiplano Nariñense.....	65
Figura 4-16: Proyección de áreas iguales de todos los especímenes de los complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia.....	68
Figura 4-17: Comportamiento de las curvas de histéresis.....	69
Figura 4-18: Diagrama de Day para sitios analizados.....	70
Figura 4-19: Gráficas representativas de la desmagnetización del primer grupo de sitios..	71
Figura 4-20: Gráficas representativas de la desmagnetización del segundo grupo de sitios.	72
Figura 4-21: Gráficas representativas de la desmagnetización del tercer grupo de sitios.....	73
Figura 4-22: Gráficas representativas de la desmagnetización del cuarto grupo de sitios.....	74
Figura 4-23: Resumen gráfico del procesamiento de todos los especímenes.....	75
Figura 4-24: Resumen gráfico del procesamiento de todos los sitios.....	77
Figura 4-25: Dirección paleomagnética media calculada, región sur-occidente.....	78
Figura 4-26: Polos virtuales geomagnéticos (VGP's) calculados para la región de estudio.	79
Figura 4-27: Correlación magnetoestratigráfica, región sur-occidente.....	81
Figura 4-28: Dirección paleomagnética media calculada para la subregión Cauca.....	82
Figura 4-29: Dirección paleomagnética media calculada para la subregión Nariño.....	84
Figura 4-30: Variación de la inclinación magnética con respecto a la latitud.....	86

Figura 4-31: Variación de la inclinación magnética con respecto a la latitud. Ampliación de los recuadros señalados en la Figura 4-15.....	87
Figura 4-32: Dispersión de los VGP's comparada con el Modelo G.....	88

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Tratamientos empleados para la desmagnetización por campo alterno.....	30
Tabla 2-2: Tratamiento empleado para la desmagnetización térmica.....	30
Tabla 4-1: Información de los sitios muestreados en el complejo volcánico del centro-occidente.....	48
Tabla 4-2: Parámetros obtenidos de la curva de histéresis de algunos sitios.....	50
Tabla 4-3: Estadísticas paleomagnéticas para cada sitio muestreado.....	57
Tabla 4-4: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para el complejo volcánico del centro-occidente de Colombia.....	61
Tabla 4-5: Información de los sitios muestreados en los complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia.....	66
Tabla 4-6: Parámetros obtenidos de la curva de histéresis de algunos sitios.....	69
Tabla 4-7: Estadísticas paleomagnéticas para cada sitio muestreado.....	76
Tabla 4-8: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para los complejos volcánicos de sur-occidente de Colombia.....	80
Tabla 4-9: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para los complejos volcánicos de la subregión Cauca.....	83
Tabla 4-10: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para los complejos volcánicos de la subregión Nariño.....	85

Glosario

Coercitividad (B_c ó $\mu_0 H_c$): es la intensidad del campo magnético necesaria para anular la magnetización presente en un material ferromagnético, luego de que el material ha sido magnetizado hasta saturación. Por lo tanto, mide la resistencia de un material ferromagnético a ser desmagnetizado. Los materiales ferromagnéticos con muy alta coercitividad son llamados materiales duros desde el punto de vista magnético, y son utilizados para fabricar imanes permanentes. Los materiales con baja coercitividad son llamados blandos desde el punto de vista magnético.

Declinación magnética (D): es el ángulo entre el norte geográfico y el norte magnético, en la mayoría de lugares de la Tierra existe una deflexión a partir del norte geográfico. Es positivo en el sentido horario a partir del Norte y va de 0 a 360° (las declinaciones hacia el occidente también pueden ser expresadas como números negativos; p. ej., 350° = -10°).

Espécimen: son segmentos obtenidos al cortar una muestra que tienen las dimensiones adecuadas para medir la Magnetización Remanente Natural (NRM). El espécimen estándar para este estudio tiene unas dimensiones de 1 cm de altura y 2.5 cm de diámetro ($\approx 5 \text{ cm}^3$). De cada muestra individualmente orientada en el campo se cortan dos o más especímenes. Las direcciones de magnetización remanente primaria de los especímenes se promedian para obtener la dirección media de cada muestra.

Geomagnetismo: se ocupa del estudio del campo magnético terrestre, tanto de su generación como de su variación espacial y temporal. Dentro de su estudio distingue entre campo interno y campo externo. En el campo interno intenta buscar una explicación para la generación y mantenimiento de un campo magnético propio y para las variaciones espaciales y temporales detectadas en la superficie terrestre, basándose en la teoría de la dínamo. En el campo externo estudia el efecto del campo magnético interno y del viento solar sobre la ionosfera.

Inclinación magnética (I): es el ángulo a partir del plano horizontal donde reposa la componente horizontal del campo geomagnético. Es positivo hacia abajo y su rango va desde $+90^\circ$, para el ángulo recto hacia abajo, hasta -90° , para el ángulo recto hacia arriba.

Muestra: corresponde a un cilindro individual de roca ígnea orientado para su análisis paleomagnético. Las direcciones de Magnetización Primaria de las muestras se promedian para obtener la dirección media de magnetización del sitio.

Paleointensidad: así como una roca puede retener un registro de la dirección del campo geomagnético cuando se enfría desde una temperatura alta, puede registrar igualmente una intensidad que también es función del campo. A veces es posible estimar la magnitud vectorial del campo geomagnético en el pasado a partir de muestras geológicas, normalmente se determina a través del análisis de la Magnetización Termorremanente (TRM) de rocas ígneas.

Paleolatitud: latitud de una roca muestreada, perteneciente a una formación geológica, en el momento de adquisición de la magnetización primaria. Puede ser obtenida a partir de la inclinación magnética, a través de la ecuación del dipolo, asumiendo que el campo geomagnético promediado en el tiempo es del tipo Dipolo Axial Geocéntrico (GAD).

Paleomagnetismo: estudio de la Magnetización Remanente Natural (NRM) de las rocas y otros materiales para determinar la intensidad y la dirección del campo magnético de la Tierra en la época en que los materiales fueron magnetizados. Tiene como adjuntos el arqueomagnetismo (estudio del magnetismo de la Tierra durante tiempos históricos) y el magnetismo de rocas (estudio básico de las propiedades magnéticas de rocas y minerales).

Polo geomagnético norte (sur): punto imaginario donde el eje del dipolo geocéntrico calculado de mejor ajuste corta la superficie de la Tierra en el hemisferio norte (sur). El dipolo geocéntrico de mejor ajuste se calcula a partir de la sumatoria de los términos de primer orden, excluyendo los términos no dipolares, que resultan del análisis de armónicos esféricos de observaciones del campo magnético en la superficie terrestre y distribuidas globalmente. Los polos geomagnéticos se encuentran opuestos diametralmente uno del otro.

Polo Geomagnético Virtual (VGP): frecuentemente estamos interesados en conocer si el polo geomagnético ha cambiado, o si un fragmento en particular de la corteza ha rotado con respecto al polo geomagnético. Para ello necesitamos una manera de transformar una dirección observada en su polo geomagnético equivalente. En paleomagnetismo, un dipolo geocéntrico imaginario podría dar lugar a una dirección de campo magnético observada, en una latitud λ y longitud ϕ dadas. Partiendo de lo anterior, el VGP es el punto en el globo terrestre que corresponde al polo geomagnético de este dipolo imaginario. Si un

número de VGP's son promediados, la posición promedio del polo es llamada polo paleomagnético.

Polo magnético norte (sur): punto en la superficie de la Tierra donde la inclinación magnética observada es $+90^\circ$ (-90°). Los polos magnéticos no están opuestos diametralmente.

Polo paleomagnético: posición del polo calculada a partir de direcciones medias de polos geomagnéticos virtuales (VGP's) para promediar la variación secular de las componentes dipolar y no dipolar del campo geomagnético. Un promedio de un conjunto de VGP obtenidos de sitios magnetizados en un período entre 10^4 a 10^5 años, proporciona una adecuada compensación de la variación secular geomagnética obteniendo así una posición promedio del polo. El polo promedio resultante se llama polo paleomagnético, se asume usualmente que es coaxial con el eje de rotación de la Tierra.

Sitio: corresponde a una unidad de enfriamiento en un complejo ígneo (por ejemplo, un flujo de lava, un flujo piroclástico o un dique). Un sitio individual provee un registro de la dirección del campo geomagnético en la localidad de muestreo durante el intervalo de tiempo cuando la magnetización primaria fue adquirida. Un conjunto de 10 muestras orientadas individualmente, recolectadas en una extensión lineal superior a 5 metros en el afloramiento, idealmente, corresponden a un sitio.

Lista de símbolos y abreviaturas

Para un mejor entendimiento y una mayor correspondencia con la literatura científica, los términos básicos de paleomagnetismo y magnetismo de rocas en castellano respetan la traducción literal desde la lengua inglesa, así como sus correspondientes acrónimos.

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidades S.I.
$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$	Campo magnético (inducción magnética o densidad de flujo magnético)	$T = \frac{kg}{As^2}$
$Bc = \mu_0 Hc$	Coercitividad magnética	$T = \frac{kg}{As^2}$
$Bcr = \mu_0 Hcr$	Coercitividad magnética de remanencia	$T = \frac{kg}{As^2}$
D_m	Declinación magnética media (para sitio o región)	<i>rad</i>
D_i	Declinación magnética del vector i-ésimo	<i>rad</i>
\mathbf{H}	Intensidad del campo magnético	<i>A/m</i>
I_m	Inclinación magnética media (para sitio o región)	<i>rad</i>
I_i	Inclinación magnética del vector i-ésimo	<i>rad</i>
k	Estimado del parámetro de precisión κ	<i>adimensional</i>
ka	Miles de años (kiloaños)	
l	Coseno director con respecto al Norte de la dirección media	
l_i	Coseno director con respecto al Norte del vector i-ésimo	
m	Coseno director con respecto al Este de la dirección media	
m_i	Coseno director con respecto al Este del vector i-ésimo	
Ma	Millones de años (mega-años)	

Mr	Magnetización remanente	A/m
Ms	Magnetización de saturación	A/m
n	Coseno director con respecto a la Vertical hacia abajo de la dirección media	
n_i	Coseno director con respecto a la Vertical hacia abajo del vector i-ésimo	
N	Número de direcciones paleomagnéticas (para sitio o región)	
Sb	Dispersión angular estándar de los VGP's	
Sl	Límite inferior con un 95% de confianza de la desviación angular estándar	
Su	Límite superior con un 95% de confianza de la desviación angular estándar	
S^2	Varianza angular de un conjunto de direcciones	
$S_{modelo G}^2$	Varianza angular de los VGP's para el Modelo G	
$S_{modelo G}$	Dispersión angular de los VGP's para el Modelo G	
T_b	Temperatura de bloqueo	K
T_C	Temperatura de Curie	K

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidades S.I.
α	Ángulo entre el vector unitario y la dirección media	rad
α_{95}	Cono de confianza del 95%	rad
θ	Colatitud geográfica	rad
Θ	Ángulo de corte óptimo o criterio de Vandamme	rad
κ	Parámetro de precisión de las medidas	$adimensional$
λ	Latitud geográfica	rad
μ_0	Permeabilidad magnética en el vacío	$4\pi \cdot 10^{-7} H/m$
τ	Tiempo de relajación	s
ϕ	Longitud geográfica	rad
Ψ	Potencial magnético	A/m

χ_f	Susceptibilidad ferrimagnética (por volumen)	<i>adimensional</i>
χ_{hf}	Susceptibilidad de campo alto (por volumen)	<i>adimensional</i>
χ_p	Susceptibilidad paramagnética (por volumen)	<i>adimensional</i>

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ARM	Magnetización Remanente Anhisterética (<i>Anhysteretic Remanent Magnetization</i>)
ASD	Desviación Angular Estándar (<i>Angular Standard Deviation</i>)
ChRM	Magnetización Remanente Característica (<i>Characteristic Remanent Magnetization</i>)
DRM	Magnetización Remanente Detrítica (<i>Detrital remanent magnetization</i>)
GAD	Dipolo Axial Geocéntrico (<i>Geocentric Axial Dipole</i>)
GMT	Tiempo medio de Greenwich (<i>Greenwich Mean Time</i>)
IGRF	Campo Geomagnético Internacional de Referencia (<i>International Geomagnetic Reference Field</i>)
IRM	Magnetización Remanente Isothermal (<i>Isothermal Remanent Magnetization</i>)
MAD	Máxima Desviación Angular (<i>Maximum Angle of Deviation</i>)
MD	Multidominio (<i>Multi-domain</i>)
NRM	Magnetización Remanente Natural (<i>Natural Remanent Magnetization</i>)
NVZ	Zona Volcánica Norte de los Andes (<i>The Northern Volcanic Zone</i>)
PCA	Análisis de Componentes Principales (<i>Principal Component Analysis</i>)
PSD	Seudo-mono dominio (<i>Pseudo-mono Domain</i>)
PSV	Variación Paleosecular (<i>Paleosecular Variation</i>)
PSVL	Variación Paleosecular de Lavas (<i>Paleosecular Variation from Lavas</i>)
SD	Monodominio (<i>Single-domain</i>)
SHA	Análisis de Armónicos Esféricos (<i>Spherical Harmonic Analysis</i>)
SQUID	Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica (<i>Superconducting Quantum Interference Device</i>)
SV	Variaciones Seculares (<i>Secular Variation</i>)
TAF	Campo Geomagnético Promediado en el Tiempo (<i>Time-Averaged Field</i>)
TAFI	Iniciativa del Campo Geomagnético Promediado en el Tiempo (<i>Time-Averaged Field Initiative</i>)
TRM	Magnetización Termoremanente (<i>Thermal Remanent Magnetization</i>)
VGP	Polo Virtual Geomagnético (<i>Virtual Geomagnetic Pole</i>)
VRM	Magnetización Remanente Viscosa (<i>Viscous Remanent Magnetization</i>)
VSM	Magnetómetro de Muestra Vibrante (<i>Vibrating Sample Magnetometer</i>)

Introducción

Son varias las razones que motivan a la comunidad científica relacionada con las disciplinas del geomagnetismo y paleomagnetismo en profundizar el conocimiento que se tiene en la actualidad sobre el comportamiento del Campo Geomagnético Promediado en el Tiempo (TAF en adelante). De una característica sobresaliente del campo geomagnético, como lo es su cambio de polaridad, surgen algunos de los cuestionamientos más inquietantes: ¿qué pasa con el campo geomagnético y qué manifestaciones se presentan durante una transición de polaridad?, ¿qué señales lo preceden?, ¿en cuánto tiempo transcurre un cambio de polaridad en promedio?.

Estudios de paleointensidad magnética indican que la dínamo terrestre, generadora del campo geomagnético, llegó a ser tan eficiente como en la actualidad [*Yoshihara y Hamano, 2000*] hace unos 2600 millones de años (Ma en adelante). Además, se ha encontrado que el campo geomagnético tiene inversiones de polaridad y éstas no son periódicas, de hecho son casi aleatorias, aunque la duración media entre transiciones de polaridad parece cambiar progresivamente en períodos largos de tiempo [*Glatzmaier y Coe, 2009*]: promediando el tiempo transcurrido entre las inversiones para los últimos 165 Ma, se observa que el campo geomagnético ha invertido su polaridad a una razón de dos veces por cada millón de años, restringiendo el cálculo del promedio para los últimos 10 Ma se observa que se ha invertido unas cuatro a cinco veces por cada millón de años. Debido a que la última transición de polaridad ocurrió hace unos 780000 años [*Cande y Kent, 1995*], y que se ha observado una constante disminución de la intensidad del campo magnético, aproximadamente de un 10% a partir del primer valor registrado alrededor del año 1830, *Glatzmaier y Olson* [2005] cuestionan si un posible cambio de polaridad magnética estaría en camino de suceder.

En adición a lo anterior, las investigaciones recientes en paleomagnetismo se han centrado en encontrar respuestas a viejas preguntas relacionadas con otras características del TAF; ejemplos de algunos interrogantes los presenta *Tauxe* [2005]: ¿cuál es tiempo requerido para que el TAF se comporte como un Dipolo Axial Geocéntrico (GAD en adelante)?; ¿cuál es la desviación esperada a partir del GAD?; ¿el TAF ha sido exclusivamente dipolar o más complejo a través de la historia de la Tierra?.

La hipótesis del GAD afirma que el TAF se origina en un dipolo ubicado en el centro de la Tierra, alineado con el eje rotacional de la misma [Hospers, 1955]. Se constituye en uno de los supuestos más útiles en paleomagnetismo para reconstruir de manera aproximada el campo geomagnético, y en una herramienta crucial en áreas de estudio donde se necesite determinar paleolatitudes de un lugar dado, como por ejemplo en la tectónica [Merrill y McFadden, 2003]. Además, es una hipótesis comprobable, válida al menos para los últimos 5 Ma, y provee un excelente ajuste para los datos globales encontrando que las contribuciones no dipolares axiales generalmente no superan el 5% del total del campo geomagnético [Quidelleur et al., 1994; Johnson y Constable, 1995, 1998; Kelly y Gubbins, 1997; Carlut et al., 2000]. Contribuciones como la cuadrupolar axial y la octupolar axial, han sido sugeridas como estructuras del campo geomagnético persistentes en el tiempo en simulaciones de la geodinamo [Christensen y Olson, 2003], y podrían ser regidas por las condiciones de la frontera térmica entre el núcleo externo y el manto.

Es bien conocido que existen desviaciones del modelo del GAD para algunos lugares en la superficie terrestre, con valores medios de intensidad magnética menores a los esperados, característica que sugiere un dipolo desplazado hacia el norte unos pocos cientos de kilómetros a lo largo del eje de rotación de la Tierra, situación que puede ser explicada por la combinación de las componentes dipolar axial y cuadrupolar axial en el modelo de armónicos esféricos [Wilson, 1970]. La naturaleza de las desviaciones del modelo del GAD aún es materia de discusión [Johnson y Constable, 1995; McElhinny et al., 1996; Merrill et al., 1998]; ellas pueden introducir errores en las reconstrucciones paleogeográficas de los continentes, pero también pueden proveer información valiosa sobre las propiedades y procesos que actúan en el interior profundo de la Tierra [Merrill y McFadden, 2003].

El entendimiento de la Variación Secular (SV en adelante) y la Variación Paleosecular (PSV en adelante) del campo geomagnético viene principalmente de tres fuentes: *a)* análisis de medidas realizadas por satélites y en observatorios geomagnéticos en superficie, *b)* análisis de datos históricos y paleomagnéticos, y *c)* modelos teóricos [Merrill y McFadden, 2003]. Para evaluar los modelos de PSV, los modelos del TAF y observar la relación de ambos con la latitud, se necesitan investigaciones en nuevas regiones alrededor del planeta que complementen los estudios existentes, incrementando la cantidad y la calidad de datos paleomagnéticos, prioritariamente en latitudes ecuatoriales y en latitudes altas de los hemisferios norte y sur [Johnson et al., 2008].

De especial importancia son los datos obtenidos de lavas [Johnson et al., 2008]: proveen un registro geológico instantáneo del comportamiento del campo geomagnético gracias a su rápido enfriamiento; evitan el promedio temporal inherente de los registros en rocas sedimentarias; además, son apropiados para investigaciones estadísticas del campo paleomagnético. El esfuerzo de recolectar nuevos datos paleomagnéticos alrededor del planeta, se ha iniciado con estudios realizados bajo la Iniciativa del Campo del Tiempo

Promediado (TAFI en adelante) desde La Patagonia hasta Alaska en América [Mejia et al., 2002, 2004, 2005; Tauxe et al., 2003, 2004; Opdyke et al., 2006; Stone y Layer, 2006] y en otros lugares de la Tierra [Johnson et al., 1998; Tauxe et al., 2000, 2004; Brown, 2002; Opdyke y Musgrave, 2004; Opdyke et al., 2010].

La mayor parte de los estudios paleomagnéticos en nuestro país han sido de reconocimiento y tratan de evaluar, generalmente con pocas muestras, la presencia del magnetismo remanente primario [Sierra, 1998]. Se reportan trabajos realizados en: estratos rojos del Jurásico de la Formación Girón [Creer, 1970]; riolitas y dioritas, del Jurásico y Cretáceo respectivamente, en la península de la Guajira [MacDonald y Opdyke, 1974]; estratos rojos y rocas volcánicas jurásicas de la Sierra Nevada de Santa Marta [MacDonald y Opdyke, 1984]; rocas básicas cretáceas del Grupo Diabásico [Espinosa et al., 1986]; cuerpos intrusivos del Mioceno Tardío que afloran a lo largo de la cuenca del río Cauca al norte de La Virginia (Risaralda) [MacDonald, 1980; Estrada, 1995]; rocas sedimentarias terciarias de la cuenca de Irra (Risaralda) [Sierra et al., 1995]; en rocas ígneas hipoabisales del Terciario Tardío adyacentes a la falla de Romeral en la cuenca del río Cauca a la altura del departamento de Caldas [MacDonald et al., 1996]; unidades del Mesozoico de Bucaramanga y el Macizo de Floresta [Ayala et al., 2005]; en rocas de la Formación Saldaña y unidades Cretácicas suprayacentes en la parte norte del Valle Superior del Magdalena [Ayala et al., 2005]; unidades del Cretácico Superior y Paleógeno en tres secciones ubicadas en río Loro (Andes de Mérida, Venezuela), La Guajira (mina del Cerrejón, Colombia) y Cosgua (Cordillera Oriental de Colombia) [Bayona et al., 2006a]; en rocas del Mesozoico de los Andes Colombianos y occidente del Cratón de Guayana [Bayona et al., 2006b]; unidades del Mesozoico de la Sierra Nevada de Santa Marta [Bayona et al., 2009].

En Colombia no existen estudios paleomagnéticos detallados en rocas ígneas de edad inferior a 5 Ma. El presente trabajo de investigación se constituye en el primero realizado en el país en rocas volcánicas dentro de éste rango de edad, en dos regiones diferentes de la cordillera de los Andes (el complejo volcánico del centro-occidente o Ruiz-Tolima y los complejos volcánicos del sur-occidente colombiano).

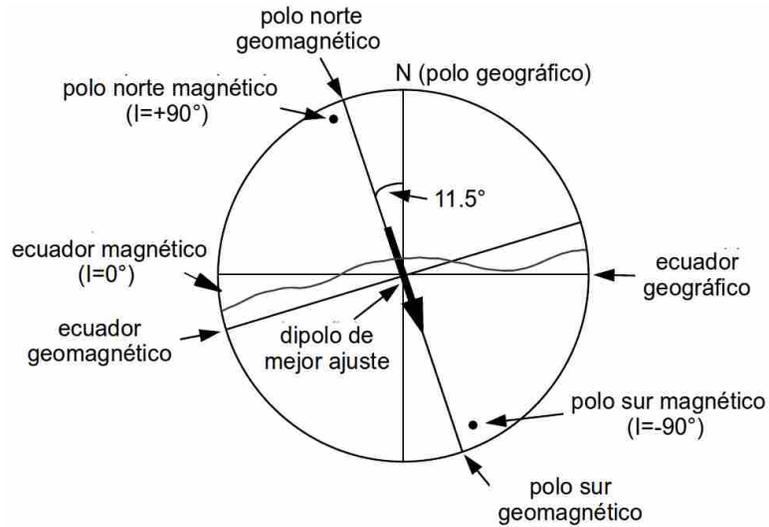
1. Marco teórico

A continuación se definirán algunos conceptos que sirven como marco de referencia básico del trabajo de investigación realizado. Para un lector no familiarizado con el tema y que quiera obtener una descripción más detallada de los fundamentos y de la metodología, se recomienda la lectura de algunos libros específicos en paleomagnetismo y magnetismo de rocas [Butler, 1992; Dunlop y Özdemir, 1997; Merrill *et al.*, 1998; Tauxe, 1998, 2010; McElhinny y McFadden, 2000; Lanza y Meloni, 2006; Gubbins y Herrero-Bervera, 2007; Kono, 2009].

1.1 Campo magnético de la Tierra

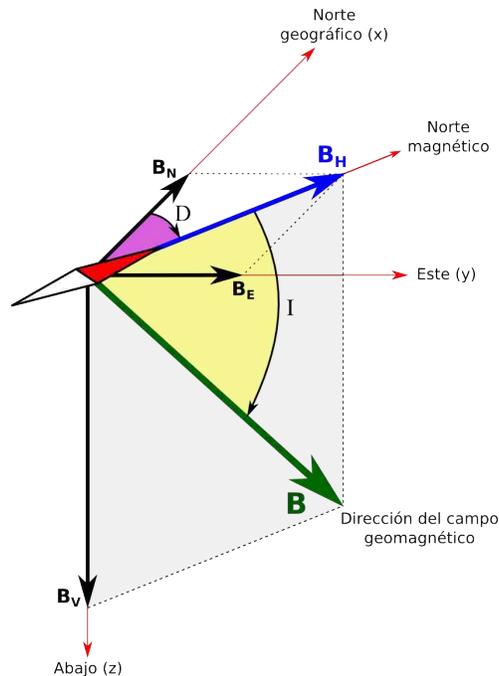
Es definido como el resultado de la superposición de muchos campos originados en fuentes internas y externas a la superficie terrestre y que se extiende hasta la magnetopausa, una frontera dentro de la cual el campo geomagnético permanece confinado. El campo geomagnético interno se divide a su vez en campo geomagnético principal y secundario; el principal es más intenso y es producido en el núcleo externo, el secundario tiene su origen en las rocas magnetizadas presentes en la corteza terrestre. El campo geomagnético externo es producido por corrientes eléctricas en la ionosfera y magnetosfera. Un último campo a considerar es el resultante de la inducción electromagnética, originado por las corrientes inducidas en la corteza y manto superior por variaciones de campos magnéticos externos en el tiempo [Lanza y Meloni, 2006; Kono, 2009].

En primera aproximación, el campo geomagnético se acerca al comportamiento de un campo tipo Dipolo Axial Geocéntrico (GAD), pero son obvias las diferencias con esa configuración simple: los polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos como se espera para un campo tipo GAD y el ecuador magnético serpentea alrededor del ecuador geográfico. Un dipolo geocéntrico inclinado con respecto al eje de rotación terrestre (Figura 1-1), explica en un 90% el campo geomagnético actual sin llegar a ser la respuesta definitiva [Butler, 1992]. El campo geomagnético es bastante complejo para ser explicado únicamente por un modelo dipolar, se hace necesario incluir fuentes de campo no dipolares para obtener un modelo ajustado a la realidad.

Figura 1-1: Modelo del dipolo geocéntrico inclinado.

La letra I representa la inclinación magnética. Redibujado a partir de [Butler, 1992].

El vector del campo geomagnético en paleomagnetismo se describe gráficamente por la intensidad magnética, B , y los ángulos de declinación magnética, D , e inclinación magnética, I , (Figura 1-2).

Figura 1-2: Componentes vectoriales del campo geomagnético.

En un punto ubicado en el hemisferio norte, la componente horizontal del campo, B_H , apunta hacia el norte magnético y la componente vertical, B_V , apunta hacia abajo. La componente horizontal puede ser descompuesta en las componentes norte y este, B_N y B_E respectivamente. El ángulo entre la componente horizontal del campo, B_H , y el norte geográfico es la declinación magnética, D . El campo geomagnético, B , forma un ángulo I con el plano horizontal, conocido como inclinación magnética.

1.1.1 Representación matemática

El método más importante y comúnmente usado para describir cuantitativamente el campo geomagnético es a través del Análisis de Armónicos Esféricos (SHA en adelante). Una considerable cantidad de información acerca del campo y su variación en el tiempo es contenida en los coeficientes de los armónicos esféricos [Merrill *et al.*, 1998].

Se puede establecer que el campo geomagnético, \mathbf{B} , es un campo vectorial conservativo en la región comprendida desde la superficie terrestre hasta 50 km de altitud, y esta asociado a un potencial escalar, Ψ , que satisface la ecuación de Laplace [Merrill *et al.*, 1998]. Además, se puede afirmar que el potencial, y por tanto el campo geomagnético, tiene su origen en el interior de la Tierra, considerando a las fuentes externas como de carácter despreciable [Lanza y Meloni, 2006]. La utilidad de emplear el potencial geomagnético radica en que el campo vectorial puede ser evaluado en cualquier región externa a la fuente del campo [Tauxe, 2010]; el potencial geomagnético para fuentes de origen interno en coordenadas esféricas es:

$$(1.1) \quad \Psi(r, \theta, \phi) = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} P_l^m[\cos(\theta)] [g_l^m \cos(m\phi) + h_l^m \sin(m\phi)]$$

donde:

Ψ = función potencial del campo geomagnético

r = distancia desde el centro de la Tierra (vector radial)

θ = colatitud (90° – latitud)

ϕ = longitud

a = radio medio de la Tierra (6.371×10^6 m)

P_l^m = funciones de Schmidt parcialmente normalizadas asociadas a los polinomios de Legendre

g_l^m, h_l^m = coeficientes de expansión para el potencial magnético o coeficientes de Gauss para fuentes hipotéticas de radio menor a a calculados en un año

l = grado

m = orden

Revisando la ecuación anterior encontramos lo siguiente [Merrill *et al.*, 1998; Tauxe, 2010]:

- No encontramos el coeficiente g_0^0 , lo cual correspondería a un inexistente monopolo magnético.
- Los términos de primer grado ($l=1$) pueden ser pensados como dipolos geocéntricos alineados con tres ejes diferentes: el coeficiente g_1^0 , con el eje de rotación terrestre; los

coeficientes g_1^1 y h_1^1 , con dos ejes ecuatoriales que se intersecan con el ecuador en el meridiano de Greenwich y a 90° Este respectivamente. La suma vectorial de los tres representa la contribución dipolar que actualmente está inclinada 11.5° con respecto al eje de rotación (Figura 1-1).

- Para $l=2$ tenemos cinco coeficientes: g_2^0 , g_2^1 , g_2^2 , h_2^1 y h_2^2 , que colectivamente representan la contribución cuadrupolar. Para $l=3$ tenemos siete coeficientes que colectivamente representan la contribución octupolar. Finalmente la suma vectorial de todos los términos diferentes al campo geomagnético dipolar representa el campo geomagnético no dipolar.

Un aspecto importante del SHA es que éste permite la separación de contribuciones internas y externas al campo geomagnético, aunque no puede dar la localización exacta de las fuentes magnéticas [Merrill et al., 1998; Lanza y Meloni, 2006]. Quizás los resultados más importantes del SHA son que el campo geomagnético en la superficie terrestre es dominado por los términos de grado uno ($l=1$) y las contribuciones externas son muy pequeñas [Tauxe, 2010].

1.1.2 Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)

La undécima generación del IGRF fue actualizada en 2009; consiste en un modelo matemático empleado para calcular el vector del campo geomagnético interno de la Tierra, \mathbf{B} , en términos de un potencial escalar, Ψ , para sitios ubicados en o arriba la superficie terrestre, válido para el intervalo comprendido entre los años 1900 al 2015 y designado como definitivo entre los años 1945 a 2005 [International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V, Working Group V-MOD: Geomagnetic Field Modeling, 2010]. Una vez que un modelo constitutivo se designa como definitivo se le llama Campo Geomagnético de Referencia Definitivo (DGRF) y no se revisa en las generaciones posteriores del IGRF. Los modelos constitutivos no definitivos se conocen como modelos IGRF; los modelos DGRF se han producido sólo para épocas desde 1945 en adelante.

Los coeficientes de Gauss son determinados ajustando las observaciones del campo magnético realizadas en observatorios magnéticos, satélites y sondeos magnéticos en la ecuación de potencial para un tiempo en particular [Tauxe, 2010]. La parte interna del campo geomagnético, la cual es generada casi en su totalidad en el núcleo, experimenta cambios lentos pero notables en escalas de tiempo que van de años a décadas, en consecuencia, el IGRF debe ser revisado por lo general cada cinco años, para que permanezca actualizado al día y lo más exacto posible. Finalmente, el modelo del campo principal para el IGRF-11 viene dado como una serie finita del potencial escalar, Ψ , el

grado máximo de expansión de los coeficientes de armónicos esféricos es elegido de manera tal que los coeficientes del modelo sean determinados de manera confiable según la cobertura disponible y la calidad de las observaciones. Para el IGRF-11, el grado máximo de expansión elegido fue 10 para datos hasta el año de 1995; para años posteriores se extendió hasta el grado 13, para tomar ventaja de los excelentes datos proporcionados por los satélites Ørsted y CHAMP [*International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V, Working Group V-MOD: Geomagnetic Field Modeling*, 2010].

1.1.3 Hipótesis del Dipolo Axial Geocéntrico (GAD)

Se sustenta en que el TAF puede ser explicado como un campo geomagnético dipolar, generado por un imán gigantesco (GAD) ubicado en el centro de la Tierra y colineal con su eje de rotación [*Butler*, 1992]. Desde el punto de vista matemático, afirma que todos los términos del desarrollo en armónicos esféricos del campo serían nulos, excepto el correspondiente al primer coeficiente de Gauss, g_1^0 .

Por convención, el polo norte del dipolo geomagnético apunta hacia el polo sur geográfico, y las líneas de campo magnético apuntan hacia el polo norte geográfico. En un GAD la componente horizontal del campo geomagnético apunta hacia el norte geográfico, por lo tanto la declinación magnética es igual a cero en cualquier lugar de la superficie terrestre; las líneas de inclinación varían de manera regular desde -90° hasta $+90^\circ$ en los polos, con 0° en el ecuador, generando contornos paralelos a las líneas de latitud [*Tauxe*, 2010].

Gracias a la suposición que el campo geomagnético es producido por un GAD, se puede relacionar la inclinación del campo geomagnético I , con la latitud geográfica λ , a través de la ecuación del dipolo:

$$(1.2) \quad \tan(I) = 2 \tan(\lambda)$$

La hipótesis del GAD, a través del uso de la ecuación anterior, permite calcular paleolatitudes a partir de las direcciones de la inclinación paleomagnética de las rocas, un resultado que es fundamental en reconstrucciones de: movimientos de placas tectónicas, deriva continental, y deformación geológica regional [*Gubbins*, 2007; *Tauxe*, 2010]. En períodos de tiempo que promedien la variación secular (≈ 100 ka), la hipótesis del GAD parece describir adecuadamente el campo paleomagnético. Esta hipótesis es igualmente válida para períodos de polaridad normal o inversa, pero no es aplicable para interpretar las componentes de remanencia magnética adquirida durante los períodos en los que el campo transita de una polaridad a otra.

1.1.4 La geodínamo

Las leyes de Maxwell establecen que cargas eléctricas en movimiento generan campos magnéticos, así como campos magnéticos variables en el tiempo generan corrientes eléctricas; son conceptos básicos de la teoría electrodinámica que pueden servir para explicar cómo se genera el campo geomagnético. En un nivel muy elemental, el campo interno principal se origina en las corrientes de convección presentes en la aleación líquida hierro-níquel del núcleo externo de la Tierra. Los movimientos del fluido conductor, controlados parcialmente por la rotación de la Tierra, actúan como una dínamo magnetohidrodinámica auto-excitable que genera un enorme campo magnético [*Glatzmaier y Olson*, 2005; *Tauxe*, 2010].

1.2 Modelos del campo promediado en el tiempo (TAF)

Cuando se elabora un modelo que represente el comportamiento del campo geomagnético en largas escalas de tiempo como una serie de armónicos esféricos, se llega a un límite de tiempo donde no hay suficientes datos con adecuado control de edad y densidad espacial para constreñir el modelo [*Tauxe*, 2010]. Debido a lo anterior, la manera de abordar largos períodos de tiempo ha sido observar el campo geomagnético promedio.

Los últimos 5 Ma han sido un foco de atención para los modelos del TAF debido a que los efectos producidos por el movimiento de placas son pocos y porque existen cientos de estudios. A pesar de la relativa abundancia de datos para los últimos 5 Ma, una porción considerable de los mismos ha sido obtenida con criterios de calidad menos rigurosos que los empleados en los estudios paleomagnéticos actuales, por lo que se descartarían en el proceso de obtener un modelo robusto del TAF [*Tauxe*, 2010]. La clave para obtener un modelo que se ajuste mejor a la realidad del comportamiento promedio del campo geomagnético en el tiempo geológico, radica en emplear datos paleomagnéticos de calidad, distribuidos en el tiempo y en el espacio alrededor del planeta [*Merrill et al.*, 1998]. Adicionalmente, se debe realizar el promedio temporal sobre intervalos más grandes que los mayores períodos de variación paleosecular, para favorecer la cancelación de las componentes tesorales y sectoriales (componentes no zonales) del potencial escalar, y así, obtener un potencial puramente zonal (términos de tipo axial g_1^0, g_2^0, g_3^0 , etc.). El comportamiento promedio del campo geomagnético se expresa en términos de su similitud o no con el modelo tipo GAD, la existencia o no de componentes no dipolares persistentes en el tiempo, la variación y el valor medio de la intensidad.

A partir de los datos paleomagnéticos y haciendo uso de la técnica del SHA, la mayoría de las investigaciones coinciden en señalar que: a) el TAF en primera aproximación es

semejante a un campo tipo GAD ($\approx 95\%$ del campo total); y *b*) se presentan desviaciones significativas de segundo orden con respecto al GAD, y diferencias estadísticas entre el comportamiento promedio de la polaridad normal e inversa.

Al comparar los resultados obtenidos en los modelos propuestos por los diferentes autores, se observan diferencias originadas en la dificultad de promediar las propiedades del campo geomagnético, tanto en el espacio como en el tiempo, incrementando la incertidumbre al definir cuáles términos no dipolares se manifiestan como constantes, e introduciendo artefactos debido a la manipulación de los datos paleomagnéticos. Además, el SHA de los datos se verá severamente truncado dado el número finito de los mismos. Las diferencias en los resultados, se centran en la caracterización de las componentes no dipolares, y el peso porcentual asignado a cada una sobre la totalidad del campo.

Algunos autores señalan la presencia de un cuadrupolo axial cercano al 5% del campo geomagnético total [*Johnson y Constable, 1995; McElhinny et al., 1996; Hatakeyama y Kono, 2002*]. La componente cuadrupolar se observa como una persistente anomalía negativa de la inclinación para los datos paleomagnéticos de polaridad normal, y positiva para los datos de polaridad inversa; dicho patrón de anomalías de inclinación, confirma que el término cuadrupolar axial es real y no un artefacto.

Algunos investigadores concluyen que el octupolo axial es un artefacto [*McElhinny et al., 1996*], introducido por varios factores como: errores en la inclinación magnética presentes en algunos sedimentos y lavas; el uso de vectores unitarios en los análisis (en otras palabras, no se tiene en cuenta la paleointensidad magnética); desmagnetización incompleta en particular en rocas magnetizadas con polaridad inversa. Para otros autores el término octupolar es real [p. ej., *Hatakeyama y Kono, 2002*]. Algunas investigaciones [*Quidelleur et al., 1994; McElhinny et al., 1996; Carlut y Courtillot, 1998*] concluyen que los términos no zonales no se pueden determinar a partir del SHA de los datos paleomagnéticos; y que la afirmación de la existencia de dichas componentes permanentes en el TAF, debe provenir de un campo promediado incorrectamente, de la inclusión de efectos tectónicos, o de los procesos experimentales paleomagnéticos en sí mismos.

Se ha establecido un acuerdo de facto en la comunidad científica [*Merrill y McFadden, 2003*], de elegir un intervalo de tiempo desde hace 5 Ma hasta el presente, para obtener modelos confiables que caractericen mejor el TAF. En ésta ventana de tiempo, se satisface el criterio de promediar las PSV, además, se estima que no es necesario realizar correcciones tectónicas debido a que el movimiento de las placas es pequeño. Los modelos más recientes para el TAF en los últimos 5 Ma, han usado compilaciones de direcciones paleomagnéticas provenientes de estudios de Variación Paleosecular en Lavas (PSVL en adelante), con datos paleomagnéticos bien distribuidos en todo el planeta, representativos de ambas polaridades del campo, y con unos mínimos criterios de calidad. Algunos de los

modelos han empleado únicamente datos de paleointensidad [*Kono et al.*, 2000], datos de paleodirecciones [*Carlut y Courtillot*, 1998; *Hatakeyama y Kono*, 2002; *Johnson y Constable*, 1997; *McElhinny et al.*, 1996], o la combinación de ambas clases de datos [*Kelly y Gubbins*, 1997].

1.3 Variación secular y paleosecular (SV - PSV)

La variación secular geomagnética (SV) se define como la variación temporal del campo magnético de origen interno con respecto a la superficie terrestre. Cuando hablamos de SV en tiempos pre-arqueológicos, nos referimos a variaciones paleoseculares (PSV), y se investigan a través de estudios paleomagnéticos en sedimentos lacustres recientes o en flujos de lava.

Las variaciones observables en la superficie terrestre, tienen períodos que van desde un límite inferior cercano a un año a más de 100 Ma. El tiempo característico de la SV y PSV tienden a reflejar el origen de esas variaciones; se definen variaciones de corto y de largo plazo [*Heller et al.*, 2002]: *a)* de corto plazo, con duración menor que 1 Ma, relacionadas principalmente los cambios dominados por procesos de la geodinamo relacionados con la inducción magnética en el núcleo externo líquido (por ejemplo, sacudidas o “*jerks*” geomagnéticos, excursiones magnéticas); y *b)* de largo plazo, con tiempos de duración mayores que 20 Ma, reflejando principalmente la evolución de la difusión magnética en la frontera núcleo-manto.

Otras manifestaciones comunes de las SV de corto plazo, pueden ser divididas a su vez en variaciones del campo dipolar principal, que domina variaciones de mayor período, y variaciones del campo no dipolar, que domina variaciones de menor período [*Butler*, 1992]. Para el campo dipolar, las variaciones destacadas más recientes en el tiempo son: la disminución en la intensidad del momento dipolar magnético, el movimiento de precesión del dipolo alrededor del eje de rotación terrestre, y un ligero desplazamiento del dipolo a lo largo de su eje hacia el norte geográfico, a una velocidad cercana de 2 km/año . Para el campo no dipolar, la variación se ha notado como una clara deriva de casi todas las líneas de contorno de la declinación hacia el occidente, y un segundo comportamiento, geográficamente estacionario, con una fuerte variación de la inclinación [*Lanza y Meloni*, 2006].

De acuerdo con *Merrill y McFadden* [2003], la comprensión de la SV y la PSV se da a partir de tres fuentes: *a)* el análisis de las medidas del campo magnético hechas en la superficie de Tierra (mediciones históricas); *b)* el análisis de datos paleomagnéticos; y *c)* los resultados de la teoría. En lo que respecta al análisis de datos paleomagnéticos, se presentan dos enfoques distintos para analizar los datos. En el primero, se reconoce que las lavas sólo proporcionan observaciones distribuidas discretamente en el tiempo; se puede

utilizar la dispersión angular de los polos virtuales geomagnéticos (VGP en adelante) relativa al eje de rotación, para un grupo de sitios paleomagnéticos de una región, como una representación de la PSV [Merrill y McFadden, 2003]. En el segundo enfoque, se incluye y se trata de explicar el conjunto total de observaciones paleomagnéticas individuales; supone que los coeficientes de Gauss varían con la distribución Gaussiana y que la variación de cada uno de estos armónicos es independiente de todos los demás [Constable y Parker, 1988]. El segundo enfoque no ha sido ampliamente utilizado, pero puede ser empleado para construir modelos globales que combinan datos de PSV con los datos del TAF.

Uno de los objetivos de los estudios de PSV, es probar la validez de la hipótesis del GAD a largo plazo y de la noción de un espectro estacionario de PSV con potencia limitada mayor a 10 ka. Se necesita un intervalo de al menos 100 ka para promediar la variación en el tiempo de la intensidad del campo y de las excursiones magnéticas, éstas últimas ligadas con períodos de significativa baja intensidad del campo geomagnético y que aparentemente generan un incremento de la dispersión de las paleodirecciones [Merrill y McFadden, 2003]. Por otra parte, debido a la no linealidad en las ecuaciones que gobiernan la geodinamo, es necesario incluir tales intervalos en cualquier procedimiento de ponderación del TAF.

1.4 Variación Paleosecular en Lavas (PSVL)

Como se mencionó en la sección anterior, los estudios de SV y PSV ayudan en la comprensión del comportamiento del campo geomagnético en el tiempo geológico, de la conexión de las diferentes fuentes internas del campo con las componentes dipolares y no dipolares en el SHA, y puede dar pistas sobre el funcionamiento de la geodinamo. Cuando los estudios son realizados a partir de datos obtenidos de flujos de lavas, se denominan Variación Paleosecular en Lavas (PSVL en adelante) para distinguirlos de los estudios realizados en sedimentos lacustres recientes.

Los flujos de lava son registros instantáneos y discontinuos del campo paleomagnético, debido a su corto tiempo de enfriamiento comparado con el tiempo geológico, además, permiten determinar paleointensidades absolutas del campo paleomagnético; este último aspecto puede ser visto como una ventaja en comparación con las variaciones relativas de la intensidad que pueden proporcionar los sedimentos [Dunlop y Özdemir, 1997].

1.4.1 Dispersión angular del campo geomagnético

Es una de las herramientas más útiles para el modelado y análisis de la PSV, quienes a su vez facilitan el entendimiento de las propiedades fundamentales del campo geomagnético. Puede ser calculada empleando dos enfoques diferentes: en el primero, se encuentra la

dispersión relativa al eje de rotación terrestre de los correspondientes VGP's; en el segundo, se encuentra la dispersión de las paleodirecciones del campo. El primer enfoque es utilizado más a menudo, y los resultados muestran que el valor de la dispersión de los VGP's para los últimos 5 Ma es dependiente de la latitud, incrementando monotónicamente desde un valor ecuatorial cercano a 11° hasta un valor cercano a los 20° en los polos [McElhinny y McFadden, 1997]. En esta clase de estudios, el requerimiento estadístico obliga a emplear lecturas puntuales del antiguo campo geomagnético para ser utilizadas en los análisis, por lo que se restringen a datos paleomagnéticos obtenidos en flujos de lava [Merrill y McFadden, 2003].

El análisis de la dispersión de los VGP's, al menos para rocas con edades menores a 5 Ma, proporciona un método de gran alcance y bastante simple para juzgar si en una colección de VGP's calculados para varios sitios en un estudio paleomagnético, se ha muestreado adecuadamente la PSV [Butler, 1992].

Son muchos los estudios realizados sobre PSVL alrededor del planeta [Quidelleur et al., 1994; Johnson y Constable, 1995, 1997, 1998; Kelly y Gubbins, 1997; McElhinny y McFadden, 1997; Carlut y Courtillot, 1998; Carlut et al., 2000]. En la actualidad, la comunidad científica procura tener una base de datos actualizada, que compile todos los datos paleomagnéticos obtenidos en lavas desde la década del 60 del siglo pasado, y que sea relevante para describir el carácter estadístico del campo geomagnético sobre el tiempo (un ejemplo es la base de datos del *Magnetics Information Consortium MagIC*; <http://earthref.org/MAGIC/>). Para edades superiores a 5 Ma los estudios son escasos, al igual que los estudios que integran resultados conjuntos de paleodirecciones y paleointensidades.

1.4.2 Modelos de PSVL

La mayoría de los esfuerzos recientes realizados por la comunidad paleomagnética, se han enfocado en explicar la variación de la dispersión de las direcciones y los VGP's con la latitud [Tauxe et al., 2008]. Se han propuesto dos tipos de modelos para analizar la variación de la dispersión angular con la latitud: los paramétricos y los fenomenológicos [Merrill et al., 1998].

En los paramétricos, las variaciones en intensidad y dirección de los campos dipolar y no dipolar se han modelado de diferentes maneras, separando las contribuciones a la dispersión angular en tres factores [Merrill et al., 1998]: *a*) variación en intensidad y dirección del campo no dipolar; *b*) variación con el tiempo del momento geomagnético dipolar; y *c*) cambios en la orientación del dipolo geomagnético de manera que, promediados, el eje dipolar coincida con el eje de rotación (dipolo divagante o vacilante). Los modelos representativos de esta vertiente son: Modelo A [Irving y Ward, 1964], Modelo

B [Creer, 1962; Creer et al., 1959], Modelo C [Cox, 1962], Modelo D [Cox, 1970], Modelo E [Baag y Helsley, 1974], Modelo M [McElhinny y Merrill, 1975], y Modelo F [McFadden y McElhinny, 1984]. Los fenomenológicos son modelos más recientes y se basan en los armónicos esféricos.

1.4.3 Modelo G

El Modelo G [McFadden et al., 1988, 1991; McElhinny y McFadden, 1997] es el único modelo fenomenológico de PSVL que ha sido propuesto, y es el que mejor se ajusta a las observaciones. No realiza suposiciones sobre la relación entre el campo no dipolar y el dipolar, sino que está basado en un trabajo teórico en relación con la teoría de la dínamo [Roberts, 1972]. En dicho trabajo, las soluciones del campo magnético para una dínamo esférica, bajo ciertas condiciones de simetría, se separan en dos familias de armónicos esféricos completamente independientes: la familia antisimétrica con respecto al ecuador (dipolar), y la familia simétrica con respecto al ecuador (cuadrupolar); es decir, términos de armónicos esféricos con coeficientes de Gauss en que el grado, l , menos el orden, m , son números impares o pares, respectivamente [Merrill et al., 1998].

De acuerdo con este modelo, la familia antisimétrica o dipolar contribuye más fuertemente a la dispersión de los VGP's con la latitud que la familia simétrica o cuadrupolar. A partir del análisis del campo geomagnético actual, se ha observado que la dispersión es proporcional a la latitud, λ , al menos para latitudes inferiores a 70° , y que el promedio de la dispersión de los VGP's del campo magnético presente en los hemisferios norte y sur es similar al Modelo G [McFadden et al., 1988, 1991; McElhinny y McFadden, 1997].

El Modelo G tiene la siguiente forma:

$$(1.3) \quad S_{\text{modelo G}}^2 = (a\lambda)^2 + b^2$$

donde:

$S_{\text{modelo G}}$ = dispersión angular de los VGP en el modelo G

$a\lambda$ = dispersión angular causada por la familia antisimétrica o dipolar

b = dispersión angular causada por la familia simétrica o cuadrupolar

a, b = constantes a ser determinadas

λ = latitud

Los valores estimados de los parámetros $a = 0.26 \pm 0.02$ y $b = 11.9 \pm 0.7$, proporcionan un buen ajuste a los conjuntos de datos de calidad óptima representativos de los últimos 5 Ma y a ambas polaridades [McElhinny y McFadden, 1997].

Es importante realizar una selección cuidadosa de todos los datos paleomagnéticos disponibles en cada región de estudio, para calcular una adecuada dispersión angular del TAF y así comparar los resultados obtenidos con el Modelo G; por tal motivo, se excluyen del análisis los datos de transiciones de polaridad o de excursiones geomagnéticas. Para tal exclusión, se hace necesario definir algún ángulo de corte para la latitud de los VGP's, medido a partir de los polos, que delimite una región en la que los VGP's que la integren no sean incluidos en el conjunto de datos a analizar. *Vandamme* [1994], propone la siguiente relación para definir los ángulos de corte para los VGP's:

$$(1.4) \quad \Theta = 1.8 ASD + 5^\circ$$

donde:

Θ = ángulo de corte óptimo o criterio de *Vandamme*

ASD = desviación angular estándar o dispersión angular total de los *VGP*

Ya que la *ASD* puede variar entre 11° y 22° entre el ecuador y el polo geográficos, el ángulo de corte, Θ , debería variar entre 25° y 45° .

Finalmente, una de las mayores utilidades del Modelo G consiste en la evaluación de un conjunto de datos paleomagnéticos obtenidos en una región para promediar la PSV, al ser un marco de referencia que permite comparar la dispersión observada de los VGP's con la dispersión esperada del modelo. Si la PSV se ha muestreado adecuadamente, la dispersión angular observada de los VGP's debe ser semejante al valor esperado para la paleolatitud de los sitios muestreados. Si la dispersión observada de los VGP's es mucho menor que la esperada, entonces los VGP's están agrupados más estrechamente que lo deseado en un muestreo adecuado de la PSV. Una probable explicación es que los sitios del muestreo paleomagnético no muestrearon un intervalo de tiempo que cubriese las periodicidades más largas de la PSV; la implicación es que tal conjunto de datos paleomagnéticos no proporciona el promedio en el tiempo de la PSV necesario para la determinación precisa de un polo paleomagnético. La situación opuesta se presenta cuando una dispersión de los VGP's es sustancialmente mayor que la esperada. Esta observación indica que hay una fuente de dispersión de los VGP's adicional a la originada en la PSV, quizás producida por una perturbación tectónica en la región de muestreo o por alguna dificultad en la determinación de las direcciones características de los sitios. En cualquier caso, una dispersión observada de los VGP's sustancialmente superior a la esperada en el Modelo G, es una señal de advertencia que indica que los datos paleomagnéticos son de dudosa fiabilidad [*Butler*, 1992].

1.5 Magnetización remanente

Ciertos materiales cristalinos tienen la capacidad de producir su propio campo magnético en ausencia de campos magnéticos externos; dicho campo es el resultado de procesos que ocurren a escala atómica y está íntimamente relacionado con los espines electrónicos, que en algunos cristales actúan coordinadamente para producir un campo magnético neto. La energía de anisotropía magnética es la clave para que la magnetización espontánea presente en algunos cristales magnéticos sea fijada y así retener el campo geomagnético al momento de la formación de una roca, y de su preservación a través del tiempo geológico. La magnetización remanente en las rocas constituye la base del paleomagnetismo [Butler, 1992].

Para estudiar el comportamiento del campo geomagnético a través del tiempo geológico, miles o millones de años antes del campo observado y registrado por las diferentes civilizaciones, debemos recurrir a los registros accidentales, como aquellos almacenados en rocas y sedimentos (objeto de estudio del paleomagnetismo) o en piezas arqueológicas (objeto de estudio del arqueomagnetismo).

A continuación se presenta una breve descripción de las diferentes magnetizaciones remanentes relacionadas con éste trabajo de investigación en paleomagnetismo.

1.5.1 Magnetización Remanente Natural (NRM)

Una roca extraída de una formación geológica tiene una remanencia magnética que pudo haber sido adquirida por una variedad de mecanismos, y por simplicidad se denomina NRM para evitar darle una connotación de un origen en particular en ausencia de otras pruebas [Tauxe, 2010]. La NRM es a menudo una combinación de varias componentes, cada una con su propia historia; en el laboratorio de paleomagnetismo se analiza cuidadosamente la roca con el fin de separar las diversas componentes antes de atribuir un posible origen a la remanencia.

1.5.2 Magnetización Termoremanente (TRM)

Es la magnetización adquirida por enfriamiento, desde una temperatura superior a la temperatura de Curie, T_C , hasta alcanzar la temperatura ambiente, en la presencia constante de un campo magnético débil. Las rocas ígneas adquieren una TRM cuando se enfrían. Dependiendo de su composición y distribución de tamaños de granos ferromagnéticos, la roca presentará un rango de temperaturas de bloqueo, T_b , distribuido por debajo de su T_C . Cuando cada grano individual se enfría por debajo de su T_b , experimenta un rápido aumento de su correspondiente tiempo de relajación, τ ,

adquiriendo una magnetización estable. La TRM total de una roca se bloquea cuando se enfría por debajo de la T_b más pequeña de sus granos ferromagnéticos [Butler, 1992].

Un aspecto significativo de la TRM es que un pequeño campo magnético puede, a temperatura elevada, impartir un pequeño sesgo en la distribución de los momentos magnéticos de los granos magnéticos y producir magnetización remanente. A temperatura ambiente, esta magnetización puede ser estable sobre el tiempo geológico y resistente a los efectos de campos magnéticos posteriores al campo presente durante el enfriamiento de la roca [Butler, 1992].

1.5.3 Magnetización Remanente Viscosa (VRM)

Después de adquirir su magnetización remanente primaria, las rocas son expuestas continuamente al campo geomagnético a través de su historia. Cuando un conjunto de granos está expuesto al campo geomagnético durante un tiempo T , se desbloquean magnéticamente aquellos granos con tiempos de relajación $\tau \leq T$, adquiriendo gradualmente una magnetización secundaria en dirección del campo geomagnético presente [McElhinny y McFadden, 2000]. La intensidad de la VRM resultante aumenta cuanto mayor sea el tiempo de exposición al campo, según se sobrepasa el tiempo de relajación de más granos. Los granos con monodominio y pseudo-monodominio magnético, debido a su mayor tiempo de relajación, tienen menos probabilidad de adquirir una VRM que los granos con multidominio magnético. La VRM constituye una componente magnética no deseable para una investigación paleomagnética como la desarrollada en este trabajo.

1.5.4 Magnetización Remanente Isotermal (IRM)

Exponer una roca a un gran campo magnético, permitirá a los granos cuya coercitividad esté por debajo del campo girar sus momentos magnéticos hacia una dirección con un ángulo más favorable respecto del campo aplicado, resultando un aumento de la remanencia magnética en esa dirección. La IRM de origen natural se debe al impacto de un rayo, directamente o cerca de una roca: una corriente eléctrica con una intensidad mayor a 100 amperios fluye en la roca por algunos milisegundos generando un campo magnético muy fuerte, el cual imprime en la roca una IRM de dirección aleatoria e intensidad muy alta, que puede aproximarse al valor de magnetización de saturación de los granos [Lanza y Meloni, 2006].

Éste efecto puede ser eliminado a veces en laboratorio, sometiendo a la roca a un proceso de desmagnetización progresiva, bien sea térmica o por aplicación de campo alterno. En experimentación en laboratorios de paleomagnetismo, la IRM es bastante útil para deducir la mineralogía magnética de las rocas, el tamaño del grano magnético, y la coercitividad de la remanencia magnética [Tauxe, 2010].

1.5.5 Magnetización Remanente Anhisterética (ARM)

Otra forma de magnetizar las rocas (no se presenta en la naturaleza), es someter una muestra a un campo magnético alterno que decrece desde un valor máximo hasta cero. Las partículas magnéticas cuya coercitividad sea menor que el pico máximo del campo oscilatorio, alternarán sus momentos magnéticos junto con el campo aplicado. Suponiendo que hay una gama de coercitvidades en una muestra de roca, la contribución neta a la remanencia será cero, debido a que la mitad de los granos de baja estabilidad magnética tendrán sus momentos alineados en una dirección solidaria con una de las dos direcciones del campo alterno aplicado, mientras que la otra mitad se alineará con la dirección en sentido contrario. Este es el principio de la técnica de laboratorio denominada desmagnetización por campo alterno, y se aplica en cada uno de los tres ejes ortogonales del espécimen o muestra [Tauxe, 2010]. Si existe un pequeño campo magnético no alternante superpuesto sobre el campo alterno, entonces habrá una preferencia estadística en la remagnetización de granos hacia la dirección del campo no alternante, situación que es análoga a la TRM adquirida durante el enfriamiento de la roca ígnea; esta magnetización neta se llama magnetización remanente anhisterética o ARM, y se emplea en el laboratorio para realizar estudios de paleointensidad magnética [Tauxe, 2010].

1.5.6 Magnetización Primaria

Es aquella componente de magnetización que fue adquirida en el tiempo de la formación de la unidad rocosa. Para rocas ígneas, la magnetización primaria es la TRM adquirida durante el enfriamiento inicial; mientras que para rocas sedimentarias, es la magnetización remanente detrítica (DRM) adquirida durante la deposición. En general, no es fácil probar que una magnetización remanente característica (ChRM en adelante) aislada durante el proceso de desmagnetización es una verdadera remanencia primaria de la roca. Se asume que las rocas ígneas jóvenes obtenidas en esta investigación (< 5 Ma), durante el transcurso de tiempo desde su formación hasta el presente, no han sido sometidas a procesos físicos (p. ej., exposición a temperaturas superiores a la T_C de los minerales ferromagnéticos por un largo período de tiempo) y/o químicos (p. ej., procesos asociados a la meteorización: alteraciones químicas de minerales magnéticos preexistentes que puedan alterar el tamaño del grano o generación de nuevos granos gracias a la precipitación de minerales ferromagnéticos a partir de una solución) que pudiesen haber borrado en su totalidad la magnetización original y forzado a adquirir una magnetización diferente.

1.5.7 Magnetización Remanente Característica (ChRM)

La componente de la NRM de mayor estabilidad aislada durante la desmagnetización progresiva. Al contrario que una remanencia primaria, una ChRM no informa sobre el tiempo de su adquisición.

1.6 Análisis de componentes principales (PCA)

Es una técnica estadística cuantitativa y rigurosa desarrollada por *Kirschvink* [1980], que se usa para determinar la recta que mejor ajusta un conjunto disperso de direcciones vectoriales de ChRM obtenido tras una desmagnetización progresiva y proyectado en un diagrama ortogonal de desmagnetización [*Zijderveld*, 1967] o una proyección de áreas iguales, que puede incluir o no el origen. Cuando existe solapamiento entre las componentes vectoriales de magnetización (multicomponente) el PCA determina el mejor plano de ajuste. La medida cuantitativa de la precisión del mejor ajuste lineal (o del plano) calculado viene dada por la máxima desviación angular (MAD en adelante).

1.7 Estadística de vectores

Se emplea para calcular entre un conjunto de vectores (especímenes por sitio o sitios por región de estudio) la dirección media de la inclinación y la declinación magnética mediante la interpretación de la dispersión originada en los resultados. Los datos de direcciones paleomagnéticas están sujetos a factores que conllevan a la dispersión de los mismos, como por ejemplo: el ruido instrumental y el error humano (presentes en la toma y orientación de muestras en campo, y en el trabajo de laboratorio), variaciones entre muestras según el grado de remoción de las componentes secundarias de magnetización, y la afectación por caída de rayos [*Tauxe*, 2010].

En paleomagnetismo la estadística más empleada es la vectorial fisheriana [*Fisher*, 1953], la cual fue diseñada para evaluar la dispersión de un conjunto de vectores unitarios de magnetización, sobre una esfera unitaria, alrededor de una dirección media, con cuantificación de conos de confianza del 95%, α_{95} , del parámetro de precisión de las medidas, κ , y con la posibilidad de comparar direcciones medias, dispersión, etc. [*Tauxe*, 2010]. Al asumir que todos los vectores tienen una magnitud igual a uno, se puede afirmar que ellos solo representan direcciones.

1.7.1 Estimación de la dirección media

En la estadística fisheriana, cada dirección tiene magnitud igual a uno y es representada por un punto en la superficie de una esfera de radio unitario conocida como la distribución de Fisher. La función de densidad de probabilidad, $P_{dA}(\alpha)$, da la probabilidad por unidad de área angular de encontrar a partir de la dirección media real una dirección vectorial dentro de un área angular, dA , centrada en un ángulo α . El área angular, dA , se expresa en esteradianes, siendo 4π esteradianes el área total de la superficie de la esfera. Las direcciones están distribuidas de acuerdo a la densidad de probabilidad de Fisher, que viene dada por la siguiente expresión matemática:

$$(1.5) \quad P_{dA}(\alpha) = \frac{\kappa}{4\pi \operatorname{senh}(\kappa)} \exp[\kappa \cos(\alpha)]$$

donde:

α = ángulo entre el vector unitario y la dirección media

κ = parámetro de precisión

Para calcular la dirección media de un sitio o de una región, primero se transforman la declinación e inclinación magnética del vector i -ésimo (D_i, I_i) a coordenadas cartesianas, usando los cosenos directores de cada vector individual (l_i, m_i, n_i):

$$(1.6) \quad l_i = \cos(I_i) \cos(D_i) \quad m_i = \cos(I_i) \operatorname{sen}(D_i) \quad n_i = \operatorname{sen}(I_i)$$

donde:

l_i = coseno director con respecto al Norte

m_i = coseno director con respecto al Este

n_i = coseno director con respecto a la Vertical hacia abajo

La dirección media de un número N de direcciones paleomagnéticas (de especímenes por sitio o sitios en una región) se obtiene por una simple suma vectorial. La magnitud del vector resultante, R , se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$(1.7) \quad R^2 = \left(\sum_{i=1}^N l_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N m_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N n_i \right)^2$$

Los cosenos directores de la dirección media, se obtienen a partir de:

$$(1.8) \quad l = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{R} \quad m = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{R} \quad n = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{R}$$

Finalmente la declinación e inclinación (D_m, I_m), de la dirección media vienen dados por:

$$(1.9) \quad D_m = \tan^{-1} \left(\frac{m}{l} \right), \quad I_m = \operatorname{sen}^{-1} n$$

1.7.2 Estimación de la dispersión

Luego de calcular la dirección media, se debe determinar estadísticamente una medida de la dispersión de la población de direcciones obtenidas a partir de los especímenes. Partiendo de la observación de las ecuaciones del ítem anterior, se puede visualizar que la magnitud del vector resultante, R , establece las bases del análisis del grado de agrupamiento de los N vectores de desmagnetización.

El parámetro de precisión teórico para la distribución de Fisher, κ , es una medida de la concentración de la distribución del conjunto de vectores alrededor de la dirección media. Es igual a cero si todos los vectores están uniformemente distribuidos sobre la superficie de la esfera, y tiende hacia infinito si son idénticos al valor medio, es decir, se concentran en un punto de la superficie esférica. A partir de un número finito de direcciones vectoriales, κ es desconocido, pero un buen estimado k de este parámetro de precisión viene dado por:

$$(1.10) \quad \kappa \simeq k = \frac{N-1}{N-R}$$

donde:

R = magnitud o longitud del vector resultante de la suma de los vectores unitarios

N = número de vectores unitarios o direcciones consideradas

El estimado k varía también desde un valor nulo para una distribución perfectamente desordenada si $R \ll N$, hasta infinito para una distribución de puntos idénticos si $R = N$.

El límite de confianza de las direcciones medias obtenidas puede definirse a través del parámetro α_{95} ; consiste en el semiángulo de un cono que define una porción de la superficie de la esfera fisheriana centrada en la dirección media obtenida, y dentro del cual existe la probabilidad del 95% de que esté contenida la dirección "verdadera". Con la siguiente expresión se puede calcular el cono de confianza del 95% ($p = 0.05$) alrededor de la dirección media:

$$(1.11) \quad \alpha_{95} = \cos^{-1} \left[1 - \frac{N-R}{R} \left[\left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right] \right]$$

Una dirección de la componente magnética principal bien definida tendrá valores altos del estimado k (> 50) y valores pequeños del ángulo α_{95} ($< 10^\circ$).

La varianza angular de un conjunto de direcciones es:

$$(1.12) \quad S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta_i^2$$

donde:

Δ_i = ángulo entre la i -ésima dirección y la dirección media calculada

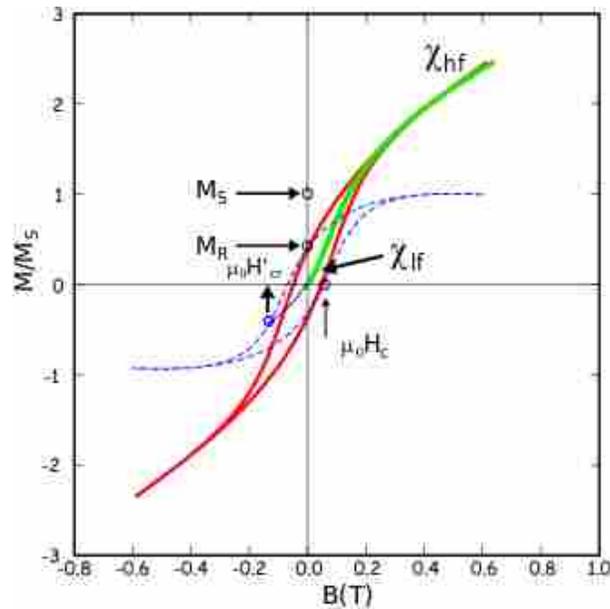
1.7.3 Comparación entre direcciones

El objetivo de calcular límites para los conos de confianza, α_{95} , para datos paleomagnéticos, nace de la necesidad de realizar comparaciones de direcciones o VGP's estimados mediante estadística fisheriana con: a) otras direcciones y VGP's estimados con estadística fisheriana; b) direcciones conocidas (p. ej., IGRF actual, DAG).

Para el primer caso, si los dos conos de confianza (α_{95}) de las direcciones estimadas no se traslapan, se puede afirmar que las dos direcciones son diferentes con un 95% de nivel de certeza; cuando dentro de un cono de confianza de una dirección media se encuentra la media de otro conjunto de direcciones, la diferencia entre ambas direcciones no es significativa; si dos conos de confianza tienen una región de traslape que no incluye la dirección media de alguno de los dos conjuntos de datos comparados se debe recurrir a los métodos estadísticos de comparación para encontrar si existen o no diferencias significativas entre las medias comparadas. Para el segundo caso, si la dirección conocida o estimada yace por fuera del cono de confianza, α_{95} calculado para la dirección media estimada, se afirma que ambas direcciones son diferentes a un nivel de confianza del 95% y viceversa.

1.8 Ciclo de histéresis

Es la curva que evalúa la respuesta de la magnetización de un fragmento de espécimen a un campo aplicado, producida por la suma de las contribuciones de todos los minerales magnéticos que componen la roca. El campo va incrementándose hasta un valor máximo B_s que provoca la saturación de la magnetización, punto donde el material ya no se magnetiza más a pesar que se siga incrementando la intensidad magnética, a continuación se reduce gradualmente hasta cero, se invierte su sentido hasta $-B_s$, y vuelve a reducirse de nuevo hasta cero y cambiar de sentido hasta alcanzar de nuevo el valor B_s (Figura 1-3). Permite identificar visualmente y cuantificar importantes parámetros magnéticos del espécimen, como la magnetización de saturación (M_s), el campo de saturación (B_s) y la coercitividad (B_c).

Figura 1-3: Ciclo de histéresis.

La línea verde es el comportamiento inicial del espécimen desmagnetizado aplicando una rampa de campo magnético que parte de cero hasta alcanzar un campo de saturación. La pendiente inicial es la susceptibilidad inicial o de campo bajo, χ_{lf} . Después de alcanzar la saturación, la pendiente de la curva es la susceptibilidad de campo alto, χ_{hf} , que es la contribución no ferromagnética, en este caso la susceptibilidad paramagnética (porque χ_{hf} es positiva). La línea punteada azul es el ciclo de histéresis después que la pendiente paramagnética ha sido restada. La magnetización de saturación, M_s , es el valor máximo de magnetización después de la corrección de la pendiente. La magnetización de remanencia, M_r , es el valor de la magnetización remanente en campo aplicado cero. También se señalan los puntos en el eje x donde se encuentran los valores de la coercitividad, $\mu_0 H_c$, y la coercitividad de remanencia, $\mu_0 H'_{cr}$. Figura tomada de *Tauxe* [2010].

1.9 Diagrama tipo Day

Se emplea para caracterizar el estado del dominio de los minerales magnéticos utilizando relaciones entre M_r/M_s y B_{cr}/B_c . El diagrama tipo Day [*Day et al.*, 1977; *Dunlop*, 2002] es un arreglo entre relaciones de los parámetros magnéticos muy empleado en magnetismo de rocas, sensible al estado de remanencia y a la fuente de anisotropía magnética, que puede revelar información acerca del tamaño y forma del grano magnético, y mineralogía magnética.

2. Metodología

2.1 Selección de los sitios de muestreo

Un criterio empleado fue seleccionar sitios donde se encontraran afloramientos de lavas o emplazamientos de flujos piroclásticos de edad inferior a 5 Ma, que tuvieran dataciones radiométricas o al menos que su edad pudiese ser inferida por cronoestratigrafía; para tal fin, se recopiló la mayor cantidad de información reportada en la literatura científica referente a cartografía geológica y geográfica, así como la referente a los volcanes presentes en las zonas de estudio. Otro criterio consistió en seleccionar sitios que permitieran realizar un muestreo espacial y temporal representativo de la actividad volcánica en las zonas de estudio, con predilección por sitios de fácil acceso, situados en cortes de carreteras y en drenajes naturales, que maximizaran el número de sitios muestreados por día, y que además, evitaran la carga y transporte del equipo de muestreo en trayectos largos por vías no transitables para automóviles. Además, se trató de muestrear lejos de sitios altos para minimizar el efecto de cambios en la NRM debido a la caída de rayos

2.2 Muestreo paleomagnético

En campo, una vez ubicado el sitio de muestreo (Figura 2-1a), lava o emplazamiento de flujo piroclástico que se presume no ha sido movido de su posición original, se anotaron en una libreta de campo las coordenadas geográficas registradas por un equipo de posicionamiento global (GPS) y la fecha (día, mes y año).

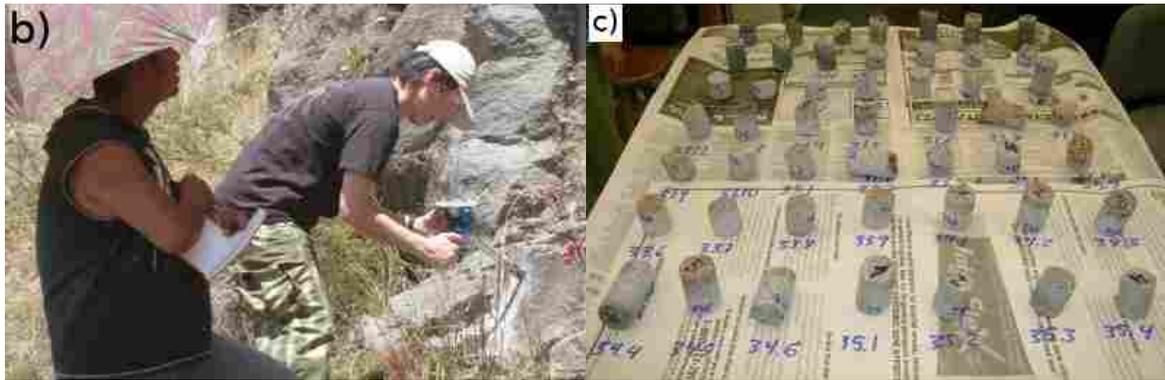
De cada cuerpo ígneo o sitio se extrajeron 10 muestras para reducir la influencia del error de medida en campo y en laboratorio; cada una de ellas corresponde a un núcleo de 2.5 cm de diámetro y longitud no inferior a 3 cm. Para ello se utilizó una broca con punta diamantada marca Pomeroy BSS-1E, accionada por un taladro portátil marca Pomeroy modelo D026-C, lubricada y enfriada con agua (Figura 2-1b). En lo posible, se buscó una separación mínima de 50 cm entre cada muestra extraída para promediar efectos muy locales sobre el NRM (p. ej., contracciones o pequeños desplazamientos de la roca), y detectar posibles alteraciones originadas por el impacto de un rayo.

Figura 2-1: Sitio de muestreo y uso del equipo de extracción de núcleos.

Fotografías tomadas por Victoria Mejía Bernal.

Antes de ser extraído, cada núcleo fue orientado geográficamente utilizando una unidad de orientación tipo Pomeroy (Figura 2-2a). Se anotó en la libreta de campo el valor de las lecturas de (Figura 2-2b): a) declinación magnética señalada por la brújula tipo Brunton; b) declinación solar registrada por la brújula solar (siempre y cuando el brillo solar lo permitió), junto con el tiempo exacto para el momento de toma de la lectura (hora y minutos en un reloj previamente calibrado en hora local con respecto al horario GMT); y, c) el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal. Luego se marcó la dirección de taladrado en el núcleo (marca de orientación en campo), trazando una línea recta con una varilla de cobre (detalle de la varilla sostenida por la mano en Figura 2-2a derecha) a través de una ranura dispuesta en la unidad de orientación (detalle de la ranura en Figura 2-2a izquierda). Los núcleos fueron extraídos, rotulados para identificación, se remarcó la línea trazada con la varilla de cobre, y finalmente almacenados en una bolsa plástica identificada con el número de sitio. En la Figura 2-2c se puede observar un conjunto de muestras de varios sitios rotuladas y listas para dar inicio a la fase de trabajo en el laboratorio.

Figura 2-2: Unidad de orientación tipo Pomeroy, toma de datos y muestras rotuladas.

Figura 2-2: (Continuación)

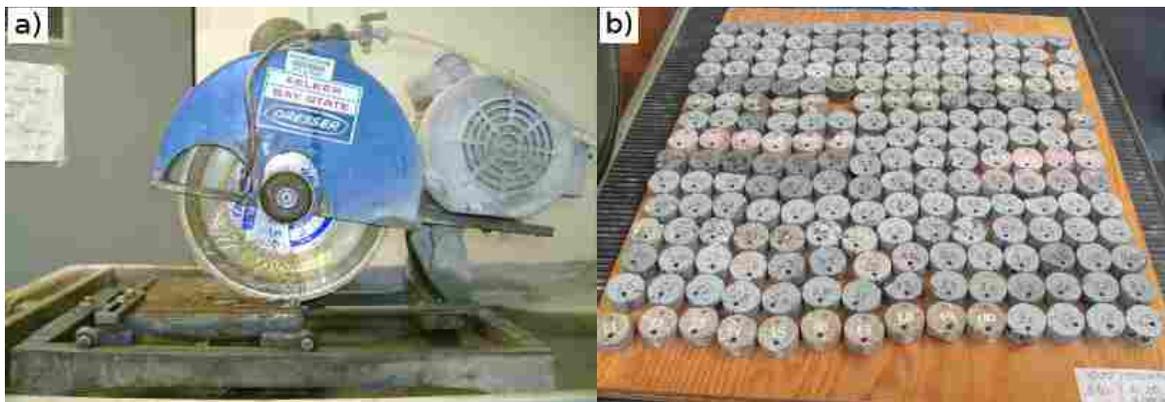
Fotografías tomadas por Alexander Sánchez Duque.

2.3 Trabajo de laboratorio

Todo el trabajo de preparación y procesamiento de especímenes fue realizado en el *Research Center for Paleomagnetism and Environmental Magnetism* de la *University of Florida* en Gainesville (USA).

2.3.1 Preparación de especímenes

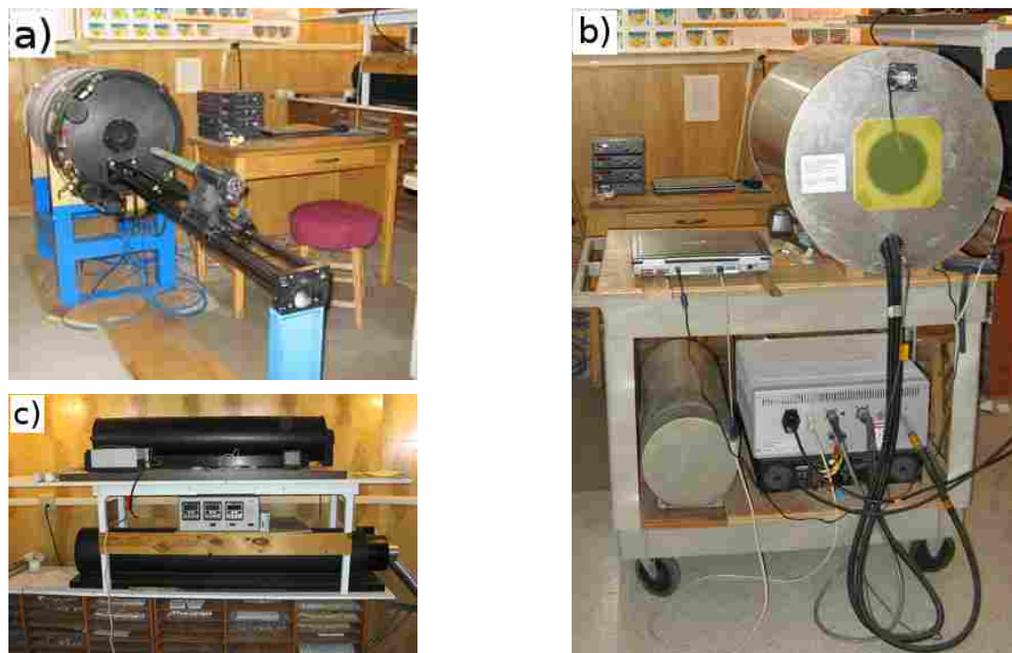
Inicialmente las muestras fueron divididas en especímenes de 2.5 cm de diámetro y 1 cm de longitud; para tal fin se empleó una sierra eléctrica equipada con un disco de corte con borde diamantado lubricado y enfriado con agua (Figura 2-3a). En un número considerable de muestras se obtuvieron dos o más especímenes, lo que permitió seleccionar preferiblemente el espécimen correspondiente a la parte más interna del núcleo, evitando así problemas relacionados con la alteración de las componentes magnéticas internas generados por la meteorización física y química de la roca.

Figura 2-3: Sierra para cortar los núcleos; especímenes obtenidos y rotulados.

Fotografías tomadas por Alexander Sánchez Duque.

Los especímenes seleccionados fueron remarcados y rotulados de nuevo (Figura 2-3b). En primera instancia, a cada espécimen le fue detectada la intensidad de su NRM y sus componentes vectoriales (declinación e inclinación magnética) empleando un magnetómetro criogénico de alta sensibilidad tipo SQUID modelo 2G 755R (Figura 2-4a).

Figura 2-4: Magnetómetro criogénico (2-4a); desmagnetizadores tipo AF (2-4b) y térmico (2-4c).



Imágenes tomadas del sitio web del *Research Center for Paleomagnetism and Environmental Magnetism*. En: http://web.geology.ufl.edu/paleomag_instruments.html

2.3.2 Desmagnetización

Para cada espécimen, la composición vectorial de la magnetización remanente característica (ChRM) de origen primario (termorremanente o TRM) al momento del enfriamiento de la roca fue detectada mediante desmagnetización progresiva con campo alterno aplicado hasta que la remanencia se reduce al nivel de ruido del magnetómetro utilizado (ver sección 1.5.5). Con esta técnica se buscó remover la VRM o magnetización secundaria, con el objeto de aislar la ChRM de cada espécimen; es además una técnica óptima en muestras que se detecten afectadas por rayos (tienen una intensidad muy elevada de la NRM). La desmagnetización progresiva consistió en un tratamiento donde se aplicó una cantidad de pasos de desmagnetización (ver Tabla 2-1). El tratamiento más empleado fue el A, seguido del B. Sólo en 40 especímenes se aplicó el tratamiento C. Luego de cada paso del tratamiento se determinó la magnetización de cada espécimen y sus componentes vectoriales. Los equipos empleados para tal fin fueron un magnetómetro criogénico (Figura 2-4a) y un desmagnetizador DTech 2000 AF (Figura 2-4b).

Tabla 2-1: Tratamientos empleados para la desmagnetización por campo alterno.

Tratamiento	Paso de desmagnetización (en mT)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
B	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100			
C	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80

Para algunos especímenes no fue suficiente el método de campo alterno para eliminar la VRM y detectar adecuadamente la ChRM. Se procedió a realizar en ellos una desmagnetización térmica progresiva con un único tratamiento de varios pasos de temperatura (Tabla 2-2). Luego de cada paso del tratamiento, una vez el espécimen estuviera a temperatura ambiente, se determinó su magnetización y componentes vectoriales. Los equipos empleados fueron un magnetómetro criogénico (Figura 2-4a) y un desmagnetizador térmico ASC TD-48 (Figura 2-4c).

Tabla 2-2: Tratamiento empleado para la desmagnetización térmica.

Tratamiento	Paso de desmagnetización (en °C)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	300	400	500	525	550	575	600	625	650	660	670

Las mediciones de magnetización y los dos tipos de desmagnetización empleadas fueron realizadas en un cuarto de laboratorio aislado de campos magnéticos externos.

2.3.3 Histéresis

Se determinaron ciclos de histéresis a temperatura ambiente, para algunas muestras de las dos regiones de estudio. Se empleó un magnetómetro de muestra vibrante VSM modelo VERSALAB marca Quantum Design, ubicado en el Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

2.4 Análisis paleomagnético

2.4.1 Correcciones y ajustes de datos

Antes de iniciar el análisis estadístico se hizo un acondicionamiento del conjunto de datos obtenidos. Primero, se ajustó a cero la lectura de la declinación magnética obtenida en campo para cada muestra; para llevar a cabo tal ajuste, a cada medida de declinación se le

sumó la correspondiente declinación magnética local de cada sitio, la cual fue calculada a partir del IGRF-10, válido para el intervalo comprendido entre los años 1900-2010 y definitivo para el período de 1945–2000. Segundo, se calculó la declinación solar para los especímenes donde se pudo efectuar la lectura a partir del ángulo de la sombra proyectada sobre el compás solar, la fecha y la hora exacta de la toma de la medida. Tercero, se prefirió el dato de declinación solar en lugar de la declinación magnética en aquellos especímenes donde se pudo efectuar la lectura; lo anterior se justifica en la posibilidad que algunas muestras pudiesen estar afectadas por grandes anomalías magnéticas locales causadas por el impacto de rayos, situación que podría sesgar la dirección de lectura de la declinación magnética. Cuarto, para cada muestra se calculó el buzamiento o inclinación sobre la vertical que apunta hacia abajo mediante un sencillo cálculo, consiste en restar a 90° la lectura de inclinación sobre la horizontal anotada en campo.

2.4.2 Análisis de componentes principales (PCA)

Para visualizar el comportamiento de la desmagnetización progresiva por campo alterno y térmica de cada uno de los especímenes, se elaboraron diagramas de proyecciones ortogonales de *Zijdenveld* [1967], estereogramas de proyección de área iguales (proyección de Lambert), y gráficas de decaimiento de la curva de intensidad de la NRM. Además, para cada sitio muestreado se elaboraron estereogramas de proyección de área iguales para observar el comportamiento de la NRM.

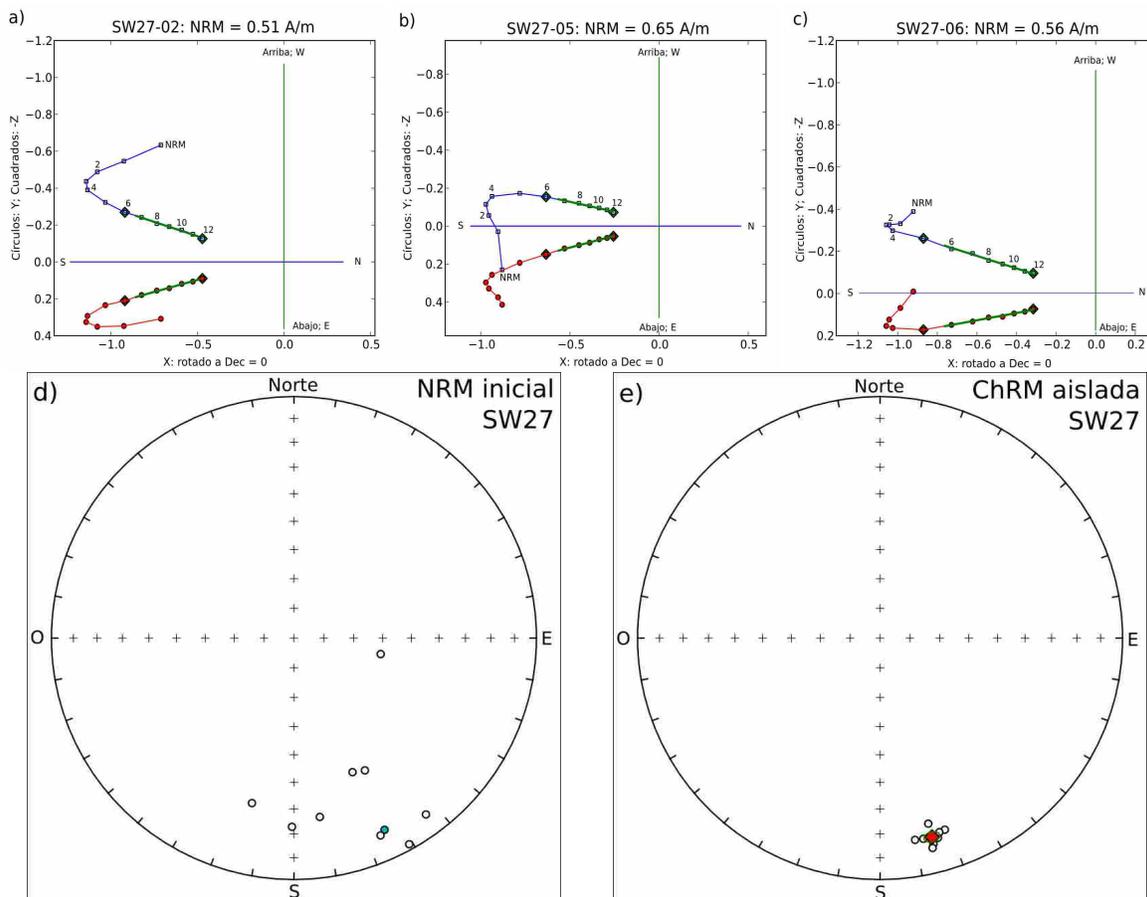
A cada espécimen se le calcularon las direcciones vectoriales de declinación e inclinación mediante el análisis de las componentes principales de magnetización (PCA) [Kirschvink, 1980] con el objeto de aislar la ChRM, determinando la línea de mejor ajuste para datos de una sola componente de magnetización (Figuras 2-5a-c) o el plano de mejor ajuste para datos multicomponente (Figuras 2-6a y 2-6c). En el PCA también se calculó la máxima desviación angular (MAD) para líneas (o planos), y no se obligó a la línea de mejor ajuste a pasar por el origen en el diagrama de proyección ortogonal. Se descartaron pasos de desmagnetización con valores atípicos.

2.4.3 Cálculo de dirección media de sitio y región, y polo paleomagnético por región

Una vez calculada la dirección vectorial de la ChRM para cada espécimen, se determinaron las direcciones vectoriales medias del campo geomagnético de cada sitio empleando estadística vectorial fisheriana [Fisher, 1953] (Figura 2-5), evaluando la dispersión del conjunto de vectores unitarios mediante la cuantificación de conos de confianza del 95%, α_{95} , y del estimado, k , del parámetro de precisión de las medidas, κ . Luego del análisis

de PCA, en los sitios donde se observó una mezcla de especímenes con direcciones vectoriales calculadas con ajuste lineal o con plano de ajuste, la dirección vectorial media de la ChRM se determinó mediante el análisis de círculos máximos de remagnetización [McFadden y McElhinny, 1988], que combina estimaciones lineales y planas (Figura 2-6). Se descartaron especímenes con direcciones vectoriales de magnetización atípicas.

Figura 2-5: Cálculo de dirección media de un sitio empleando estadística fisheriana.

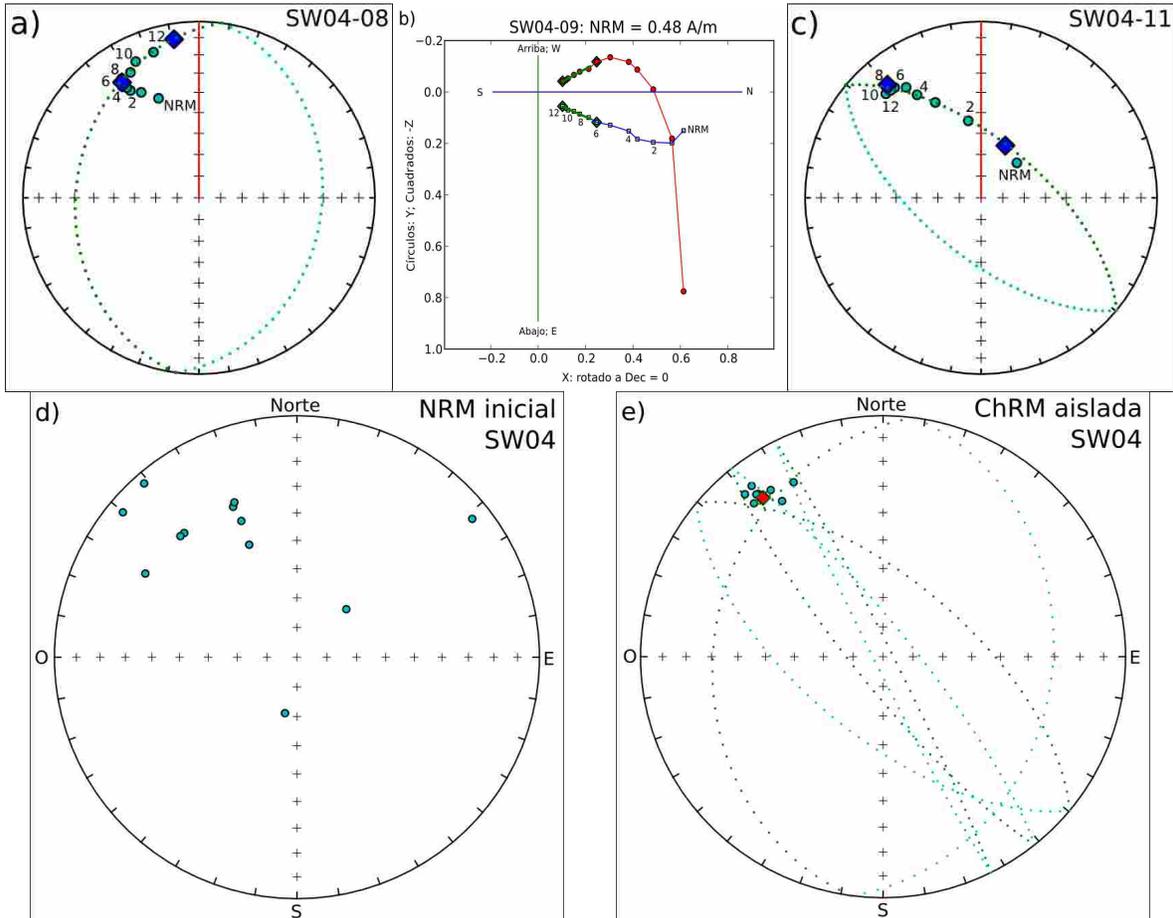


En la primera fila: **2-5a-c**, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos del sitio; línea de mejor ajuste en color verde, calculada mediante el análisis de componentes principales PCA [Kirschvink, 1980]; los diamantes en color verde representan los valores límite del rango seleccionado para realizar el ajuste lineal. En la segunda fila: **2-5d**, proyección de áreas iguales con direcciones de la NRM inicial de sus muestras; **2-5e**, direcciones de la componente característica de sus muestras tras desmagnetización progresiva y cálculo por PCA, dirección media resultante (diamante rojo) calculada empleando estadística fisheriana [Fisher, 1953], con su círculo al 95% de confianza (elipse verde casi imperceptible).

Se determinó si el conjunto de direcciones medias estimadas para todos los sitios correspondía a una distribución fisheriana o no. Se calculó la dirección media para cada región de estudio (complejo volcánico del centro-occidente de Colombia o Ruiz-Tolima y complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia) empleando nuevamente la estadística vectorial fisheriana, evaluando la dispersión cuantificando α_{95} y el estimado k . Si la

distribución de datos tuvo distribución no fisheriana, se empleó el método del *bootstrap* paramétrico [Tauxe et al., 1991] para determinar la dirección media regional, cuantificando la dispersión de datos mediante una elipse de confianza de semiejes Eta y Zeta.

Figura 2-6: Sitio representativo del cálculo de dirección media empleando círculos máximos de remagnetización.



En la primera fila: **2-6a** y **2-6c**, proyección de áreas iguales durante la desmagnetización por campo alterno de dos especímenes representativos del sitio, en la que se observa el círculo de remagnetización que describe, los diamantes en color azul representan los valores límite del rango seleccionado para realizar el ajuste del plano; **2-6b**, diagrama de Zijderveld de un espécimen representativo del sitio con línea de mejor ajuste. En la segunda fila: **2-6d**, proyección de áreas iguales con direcciones de la NRM inicial de sus muestras; **2-6e**, direcciones de la componente característica de sus muestras tras desmagnetización progresiva y cálculo por ajuste de línea o plano, dirección media resultante (diamante rojo) calculada empleando círculos máximos de remagnetización [McFadden y McElhinny, 1988], con su círculo al 95% de confianza (elipse verde casi imperceptible).

Para cada región estudiada, se comparó la dirección media estimada con la dirección de inclinación magnética esperada para los modelos del campo geomagnético tipo GAD y tipo GAD más 5% de componente cuadrupolar. También se comparó con la dirección esperada para el modelo del IGRF-10, estimada para el valor promedio de latitud, altitud y fecha de muestreo en campo de todos los sitios en la región de estudio.

Finalmente, a partir de la dirección vectorial media del campo geomagnético de cada sitio, empleando la ecuación del dipolo (ver ecuación 1.2), se calculó la dirección geográfica de su correspondiente VGP. A partir del conjunto de VGPs de todos los sitios se determinó el polo paleomagnético para la región. Se tuvo en cuenta si el conjunto de VGPs correspondía a una distribución fisheriana o no, para determinar si se empleaba estadística fisheriana o el método del *bootstrap* paramétrico para el cálculo del polo paleomagnético y la evaluación de su dispersión.

2.5 Análisis magnético

Con los ciclos de histéresis se calcularon varios parámetros magnéticos al sustraer del ciclo de histéresis inicial la contribución paramagnética y/o diamagnética; estas contribuciones se determinan a partir de la pendiente de la susceptibilidad de campo alto, χ_{hf} . Los parámetros magnéticos calculados fueron: magnetización de saturación, M_s , y remanente, M_r ; coercitividad magnética, B_c , y coercitividad magnética de remanencia, B_{cr} ; susceptibilidad de campo alto, χ_{hf} , y susceptibilidad paramagnética, χ_p . Se caracterizó el estado del dominio de los minerales magnéticos empleando diagramas tipo Day [Day et al., 1977; Dunlop, 2002] utilizando relaciones entre M_r/M_s y B_{cr}/B_c .

2.6 Calidad de datos

Durante cada etapa de esta investigación, desde el muestreo en campo, pasando por el procesamiento de especímenes en el laboratorio y calculados una vez se ha sustraído del ciclo de histéresis inicial (curva roja en primera fila de la Figura 4-3), la contribución paramagnética y/o diamagnética. Estas contribuciones se determinan a partir de la pendiente de la susceptibilidad de campo alto, culminando con el análisis de la información obtenida en campo y en laboratorio, se tuvieron en cuenta unos estrictos criterios de selección de datos con el fin de garantizar resultados paleomagnéticos de alta calidad en términos de precisión en el cálculo de componentes no dipolares y variaciones seculares del TAF. Por lo tanto, se aplicaron rigurosos lineamientos de calidad planteados en las investigaciones de Mejía et al. [2002, 2004, 2005] y Tauxe et al. [2000].

Un resumen de los criterios de selección aplicados durante la secuencia de trabajo de laboratorio y análisis de resultados se presenta a continuación:

- Se aplicó un número mínimo de 10 pasos de desmagnetización en laboratorio; el objetivo era obtener con mayor exactitud la ChRM de cada espécimen y descartar direcciones no deseadas provenientes de magnetizaciones viscosas.

- El cálculo de las direcciones vectoriales de declinación e inclinación magnética para cada espécimen, mediante la técnica del PCA, se realizó para un mínimo de cinco pasos de desmagnetización en los que no fue incluido el origen (sin “anclar” al origen).
- Se descartaron especímenes con direcciones vectoriales cuyo ángulo de MAD excediera a 5.49° (equivalente a obtener una dirección con un cono de confianza del 95%).
- Antes de realizar el cálculo de la dirección vectorial media por sitio empleando la estadística fisheriana, se descartaron especímenes con direcciones consideradas atípicas¹, detectados al examinar los diagramas de áreas iguales.
- Finalmente, antes de determinar la dirección vectorial media de cada región de estudio, se descartaron sitios donde se presentaba por lo menos uno de los siguientes criterios de rechazo: cono de confianza $\alpha_{95} > 5.49^\circ$; número de especímenes empleados para el cálculo de la dirección $n < 5$; VGP's rechazados por el criterio de corte de *Vandamme* [1994] (ecuación 1.4), al identificar sitios con datos de transiciones de polaridad o de excursiones geomagnéticas.

2.7 Cálculo de la variación paleosecular en lavas

El análisis de la variación paleosecular en lavas (PSVL), se hizo a través del cálculo de la desviación angular estándar, Sb , de los VGP's para la región de estudio. Se asume que la Sb tiene origen en el movimiento del polo magnético con respecto al eje de rotación de la Tierra debido a la variación secular (movimiento de precesión) del dipolo geomagnético y las componentes no dipolares.

La Sb fue determinada a partir de la raíz cuadrada de la ecuación 1.12, en donde:

N = número total de VGP's calculados para la región de estudio

$\Delta_i = 90^\circ - \text{latitud del } i\text{-ésimo VGP}$

Se calcularon los límites superior, Su , e inferior, Sl , de la desviación angular estándar, con un nivel de confianza del 95%, empleando el método descrito por *Cox* [1969]. Finalmente, se comparó la dispersión angular de los VGP's, Sb , con la dispersión esperada para el Modelo G, $S_{\text{modelo G}}$, calculada por medio de la raíz cuadrada de la ecuación 1.3 (varianza angular de los VGP's para el Modelo G, en la latitud media de la región estudiada).

¹ En estadística, un valor atípico es una observación que es significativamente diferente del resto de los datos de la colección, o un elemento que parece implicar un patrón que es inconsistente con la parte principal de la evidencia de datos.

2.8 Correlación magnetoestratigráfica

Como marco de referencia para relacionar la polaridad magnética encontrada en cada sitio, tras el análisis paleomagnético, con los cronos y subcronos de polaridad magnética, se empleó la escala de tiempo de polaridad geomagnética (GPTS) de *Gee y Kent* [2009]. Se asignó una edad radiométrica o relativa, con su respectiva incertidumbre, a cada sitio tras una rigurosa revisión bibliográfica. Finalmente, se hizo la correlación de toda la información disponible para constreñir la incertidumbre de la edad relativa según la polaridad de cada sitio. Sitios con edad radiométrica reportada, cuya polaridad magnética encontrada en este estudio tuvo relación de correspondencia recíproca con la reportada en la GPTS, no fueron incluidos en el resultado final.

2.9 Software utilizado

Para realizar el PCA, el cálculo de la dirección media (para cada sitio y las regiones de estudio), el análisis magnético de ciclos de histéresis, la elaboración de gráficas, otros procedimientos matemáticos y estadísticos, se utilizó el programa PmagPy 2.73 (<http://magician.ucsd.edu/Software/PmagPy/>) desarrollado por *Tauxe* [2011]. También se utilizó la hoja de cálculo de la suite ofimática OpenOffice.org.

3. Configuración tectónica de las zonas de estudio

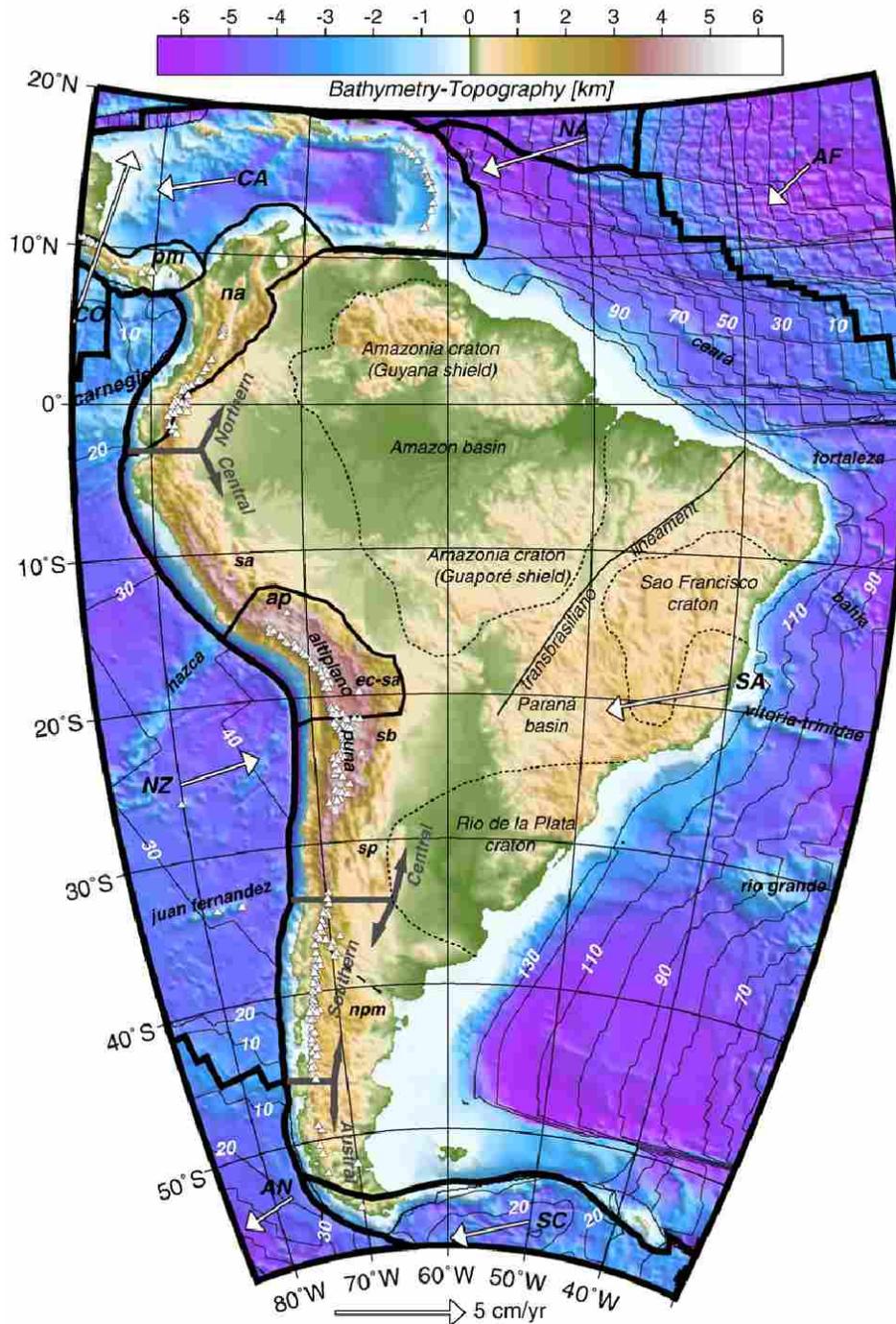
3.1 Marco geológico continental: Sur América

El continente Suramericano es un mosaico de provincias morfotectónicas que abarcan un amplio rango de rasgos geológicos (Figura 3-1). La región más antigua del continente se ubica hacia el oriente y está formado por cratones (Amazónico, San Francisco y Río de la Plata) separados por cinturones como el lineamiento Transbrasileño. Además se localizan cuencas intracontinentales como la Amazónica y Paraná. (Apartados tomados del artículo de *Tassara et al.* [2007]).

Los márgenes norte y sur de la placa Suramericana son zonas de acomodamiento transformante con movimiento absoluto hacia el occidente dextro y sinestro-lateral con respecto a las placas Scotia y Caribe respectivamente. El margen occidental del continente ha sido tectónicamente activo al menos los últimos 500 Ma [*Ramos, 1999*]; a partir del Jurásico éste ha sido dominado por la subducción hacia el Este de la litósfera oceánica del Pacífico. Luego de la apertura del océano Atlántico, la significativa aceleración hacia el occidente de Sur América inició la deformación compresiva a lo largo de su margen convergente, situación que continuó durante el Cenozoico hasta formar los Andes [*Ramos, 1999*]. La construcción de los Andes modernos se inicia en el Oligoceno Superior tras la división de la placa oceánica Farallón en las placas Cocos y Nazca.

En la Figura 3-1, el margen Andino se observa dividido en cuatro segmentos mayores según la latitud: Norte (al norte de 3° S), Central (3°– 33° S), Sur (33°– 46° S) y Austral (al sur de 46° S). Basado en datos topográficos, sísmicos y geodésicos, *Bird* [2003] propone la existencia de algunas placas pequeñas (Panamá, Norandina y Altiplano), que se mueven más o menos como bloques rígidos con respecto a la placa Suramericana.

Figura 3-1: Configuración tectónica de Sur América.



Las líneas negras gruesas y delgadas son las fronteras de placas tectónicas grandes (SA, Suramericana; CA, Caribe; NA, Norteamericana; AF, África; SC, Scotia; AN, Antártica; NZ, Nazca; CO, Cocos) y pequeñas (pm, Panamá; na, Norandina; ap, Altiplano). Las flechas blancas representan vectores de movimiento de las placas. Los triángulos blancos son volcanes activos. Las flechas grises divergentes muestran las fronteras y nombres de los segmentos andinos. Las líneas punteadas marcan la extensión de los cratones. La línea oblicua de guiones al sur de los Andes marca el límite norte del terreno Patagónico. Sobre los océanos, las líneas delgadas con números blancos marcan isócronas de litosfera oceánica y los nombres representan las principales crestas oceánicas. Figura tomada de [Tassara et al., 2007].

Los límites de los segmentos andinos se correlacionan aproximadamente con la subducción de crestas oceánicas (Carnegie, Nazca, Juan Fernández) que controlan parcialmente la forma de la losa subducida y por consiguiente la localización de arcos volcánicos activos [Jordan *et al.*, 1983]. Los segmentos que subducen con inclinación superior a 25° favorecen la fusión de la cuña astenosférica que alimenta las zonas volcánicas realizadas en la Figura 3-1. Los intervalos sin volcanismo tienen edad inferior a 10 Ma, se asocian con segmentos de losas sub-horizontales que subducen a 100–150 km de profundidad limitando la formación de magma. También se presenta volcanismo activo a lo largo de las zonas de subducción que bordean el bloque Panamá por el sur y la placa Caribe en el oriente.

3.2 Marco geológico regional: NVZ

La esquina noroeste de Suramérica esta localizada dentro de una zona muy compleja de convergencia entre las placas mayores de Suramérica, Nazca y Caribe (Figura 3-1), la primera de carácter continental y las dos últimas de carácter oceánico [Pennington, 1981; Kellogg y Vega, 1995]. Además, interactúan otras dos placas menores o bloques: el bloque Norandino, que esta siendo comprimido desde el este por la placa Suramericana y desde el oeste por la placa Nazca [Ego *et al.*, 1999; Freymueller *et al.*, 1993; Pennington, 1981]; y el bloque Panamá (o Chocó), cuya acreción inició desde mediados del Mioceno sobre el flanco noroccidental de la Cordillera Occidental de Colombia [Duque-Caro, 1990]. La colisión del bloque Panamá con Suramérica desprendió el bloque Norandino del continente e inició la orogenia andina colombiana [James, 1985; Kellogg *et al.*, 1985]. La zona de falla de Romeral es uno de los principales elementos estructurales de Colombia; marca el límite entre dos dominios litológicos, corteza continental del Cretácico hacia el este [Barrero, 1979; Pérez, 1980], y corteza oceánica más joven hacia el oeste [Case *et al.*, 1971; Meissner *et al.*, 1976].

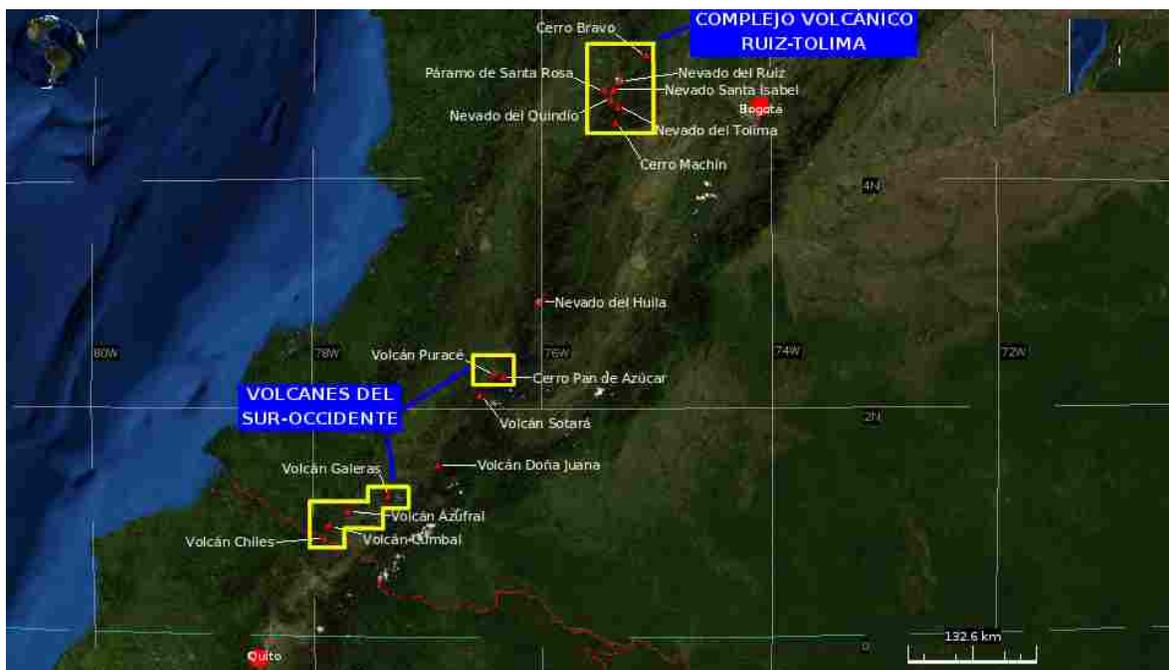
Colombia presenta un arco volcánico activo asociado a la subducción de la placa Nazca, que se desliza por debajo del bloque Norandino, que hace parte de la denominada Zona Volcánica Norte de los Andes (NVZ en adelante). El arco volcánico esta segmentado en varios cinturones norte-sur a lo largo de las Cordilleras Central y Occidental [Taboada *et al.*, 1998; Stern, 2004]. Parece existir una relación directa entre ángulos de subducción mayores a 25° y las zonas donde existe actividad volcánica [Stern, 2004].

Son 15 los volcanes terrestres que han estado activos durante el Holoceno en Colombia (base de datos del *The Smithsonian's Global Volcanism Program*²); todos están relacionados con los procesos desarrollados en las márgenes convergentes activas entre placas continentales y oceánicas. Dichos volcanes se encuentran divididos en tres grupos separados de norte a sur (ver Figura 3-2):

2 <http://www.volcano.si.edu/world/region.cfm?rnum=1501>

- Segmento norte o complejo volcánico Ruiz-Tolima: Volcán Romeral, Volcán Cerro Bravo, Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Nevado de Santa Isabel, Volcán Nevado del Tolima, Volcán Cerro Machin.
- Segmento central: Volcán Nevado del Huila, Volcán Puracé, Volcán Sotará.
- Segmento sur: Petacas, Complejo Volcánico Doña Juana, Complejo Volcánico Galeras, Azufral, Complejo Volcánico de Cumbal, Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro de Mayasquer.

Figura 3-2: Mapa de localización de las regiones volcánicas estudiadas.



Los rectángulos de color amarillo representan las zonas donde se realizó el muestreo paleomagnético. Modificada a partir de imagen obtenida en el programa Nasa World Wind versión 1.4.

Los segmentos norte y central están ubicados sobre la cordillera Central, la separación entre ambos segmentos es superior a 150 km. El segmento sur se ubica luego de la depresión Cauca-Patía e incluye algunos volcanes sobre la cordillera Occidental. Como se observa en la Figura 3-1, la placa de Nazca tiene un rango de edad entre 10-20 Ma; se desplaza al este subduciendo la placa Suramericana, al frente de la costa pacífica colombiana, a una velocidad de 6.7 cm/año [Freymueller et al., 1993]. El cinturón volcánico en el segmento norte se encuentra a una distancia superior a 380 km al oriente de la fosa oceánica y unos 140-160 km por encima de la losa subducida; a medida que nos desplazamos hacia el sur ambas distancias disminuyen variando el volcanismo desde un cinturón lineal simple a un cinturón amplio en el Ecuador [Stern, 2004].

3.3 Marco geológico local: complejo volcánico del centro-occidente de Colombia (o Ruiz-Tolima)

El Complejo Volcánico Ruiz-Tolima está ubicado sobre el bloque Norandino justo en el extremo norte del cinturón de volcanes Andinos NVZ. Comprende un arco de volcanes y una extensa secuencia de flujos de lava andesíticos y dacíticos cubiertos con flujos piroclásticos andesíticos, que forman la cresta de la Cordillera Central de los Andes Colombianos [Herd, 1974], en un área que se extiende desde latitud 4°35'N a 5°15'N y longitud 75°O a 75°35'O (Figura 3-2). El alineamiento de los volcanes indica que el vulcanismo en el complejo Ruiz-Tolima ha sido controlado por un sistema mayor de fallas dirigido NNE-SSO a lo largo de la cima de la cordillera, que se desarrolló a lo largo de la falla de Palestina [Herd, 1974]. En particular el Volcán Nevado del Ruiz ha sido guiado por los ejes tectónicos conformados por la falla NNE de Palestina [Feininger, 1970] y la falla NO Villamaría-Termaleles, fallas que controlan la localización de cráteres y domos [Thouret *et al.*, 1990]. De sur a norte, el complejo está conformado por los siguientes volcanes (algunos con actividad durante el Holoceno): Cerro Machín, Volcán Nevado del Tolima, Paramillo del Quindío, Paramillo de Santa Rosa, Volcán Nevado de Santa Isabel, Volcán Paramillo del Cisne, Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Cerro Bravo y Volcán Romeral; además, se destacan una serie de domos volcánicos alineados en dirección del Volcán Nevado del Ruiz paralelos al trazo de la falla Villamaría-Termaleles [Naranjo y Ríos, 1989] y varios conos parásitos. Desde el inicio de actividad hacia finales del Mioceno hasta los centros activos actuales, el vulcanismo del Complejo Volcánico Ruiz-Tolima ha sido predominantemente calco-alcalino y variado [Vatin-Pérignon *et al.*, 1990; Marriner y Millward, 1984].

El Volcán Nevado del Ruiz ha sido dividido estratigráficamente en tres etapas [Schaefer, 1995]. La primera corresponde a las lavas pre-Ruiz, que son basaltos andesíticos altamente erosionados sobre los que se levanta el actual cono volcánico y con edades mayores a 1 Ma; la segunda etapa, llamada cono primitivo del Ruiz, consiste de andesitas y dacitas, forman el cono sobre el cual se formó el edificio actual, también incluye depósitos de ignimbritas localizados en valles que rodean el Volcán Nevado del Ruiz, abarca un rango de tiempo entre 1 Ma a 89 ka; la tercera etapa se denomina post ignimbritas del Ruiz, se caracteriza por flujos de lavas y domos desde aberturas múltiples, y pequeñas erupciones plinianas, comprende desde hace 89 Ka hasta la actualidad.

El relieve característico del complejo volcánico es bastante escarpado; la mayoría de los flujos de lava yacen sepultados por los productos de la actividad piroclástica de los volcanes de la zona y por la típica vegetación exuberante de las selvas tropicales andinas de alta montaña.

3.4 Marco geológico local: complejos volcánicos del suroccidente colombiano

El sector suroccidental de Colombia, sobre la región Andina, presenta un paisaje que es dominado por las Cordilleras Occidental y Central, la depresión Cauca-Patía y el altiplano Nariñense. La Cordillera Occidental está constituida por rocas volcánicas y sedimentarias de edad Cretácica de los Grupos Diabásico y Dagua, respectivamente. El Grupo Diabásico [Nelson, 1962] está conformado por rocas basálticas y diabásicas masivas y con estructuras almohadilladas, con microgabros relacionados e intercalaciones tobáceas y de sedimentitas silíceas. El Grupo Dagua [Barrero, 1979] está constituido por sedimentitas marinas con intercalaciones de vulcanitas básicas, afectadas por metamorfismo dinámico y localmente por eventos térmicos relacionados a la intrusión de plutones epizonales del Cenozoico.

En el Altiplano Nariñense, los Grupos Diabásico y Dagua se encuentran cubiertos localmente de manera inconforme por potentes depósitos volcánicos de ignimbritas y flujos de lavas andesíticas, a su vez suprayacidos por depósitos de tipo explosivo como flujos piroclásticos, caídas de ceniza y oleadas piroclásticas producidos desde el Plioceno hasta la actualidad. Los rasgos estructurales principales corresponden las fallas Cali - Patía, que ha sido relacionada con los focos volcánicos del Volcán Azufra, Complejo Volcánico de Cumbal y Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro de Mayasquer, falla río Guáitara que controla en parte el cauce del río y que está relacionada con las fallas del borde occidental de la Cordillera Central como la Falla Silvia - Pijao. Cruzando el altiplano en sentido NE se distingue también la Falla Guachucal como una estructura activa que limita los depósitos de vulcanismo antiguo al oriente, de los más recientes al occidente (apartado levemente modificado del original tomado de *Velandia et al.* [2008]).

El Altiplano Nariñense está relacionado con la actividad volcánica que se inició en el Terciario Superior (Zancleano), la cual comienza con erupción de lava andesítica (lavas del Guáitara) y pasa a una actividad explosiva (ignimbritas de Imués) y se generan depósitos piroclásticos que recubren las rocas más antiguas de la Cordillera Occidental que constituyen el basamento del volcán Azufra y oscurecen las evidencias de las glaciaciones que afectaron la región. Según *Parra y Velásquez* [2002], posterior al Mioceno se reconocen como los principales focos volcánicos pliocénicos de tipo andesítico los siguientes volcanes: Guáitara, Macas, Cerro Negro del Encino, Cumbal Antiguo y Pajablanca. Para el Pleistoceno Inferior la actividad volcánica continua reflejada en los edificios andesíticos de: Canguil, Crespo-Nasate, Granizo y Colorado. A finales del Pleistoceno se desarrollaron los edificios de Cerro Negro de Mayasquer, Chiles y Cumbal Moderno, los cuales se consideran volcanes activos.

El basamento del Complejo Volcánico Galeras (CVG en adelante) también se correlaciona con los Grupos Diabásico [Nelson, 1962], Dagua [Barrero (1979)] y Quebrada Grande [Botero, 1963] [Botero, 1963]. Se compone de metasedimentos y diabase del Cretácico, que han sido afectados por un grado variable de plegamiento y fallamiento. Esas rocas afloran al noroeste del CVG, especialmente a lo largo de los ríos Guáitara y Chacaguaico. Se considera que el vulcanismo en el complejo volcánico del Galeras ha producido al menos seis etapas diferenciadas, además de la construcción de un cono de ceniza en la esquina suroccidental del complejo [Calvache, 1995].

Más hacia el norte, el departamento del Cauca, la caldera de Paletará [Torres *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2011] ha sido ligada a la génesis de la Formación Coconucos junto con otros centros eruptivos del valle de Paletará [Monsalve, 2000]; muy posiblemente también sea la fuente lavas, mantos ignimbríticos y otros depósitos de edad Plioceno-Holoceno sobre el flanco occidental de la cordillera Central que conforman la Formación Popayán en el departamento de Cauca [Torres, 1997]. Al interior de la caldera se encuentra la Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC en adelante) [Monsalve y Pulgarín, 1999], que marca el límite entre los departamentos de Cauca y Huila, y correspondería al vulcanismo resurgente de la caldera de Paletará [Torres *et al.*, 1999]. La CVLC esta conformada por 15 centros eruptivos que muestran evidencias de actividad en el Holoceno; sus extremos sureste y noreste son los volcanes Pan de Azúcar y Puracé, respectivamente. El volcán Puracé es un estratovolcán activo, cuyo registro geológico más reciente, muestra predominio de actividad explosiva [Pulgarín *et al.*, 1994]. El Puracé actual se desarrolló sobre un edificio anterior denominado pre-Puracé, el cual se construyó en el extremo SE de la caldera de Chagartón [Monsalve y Pulgarín, 1993].

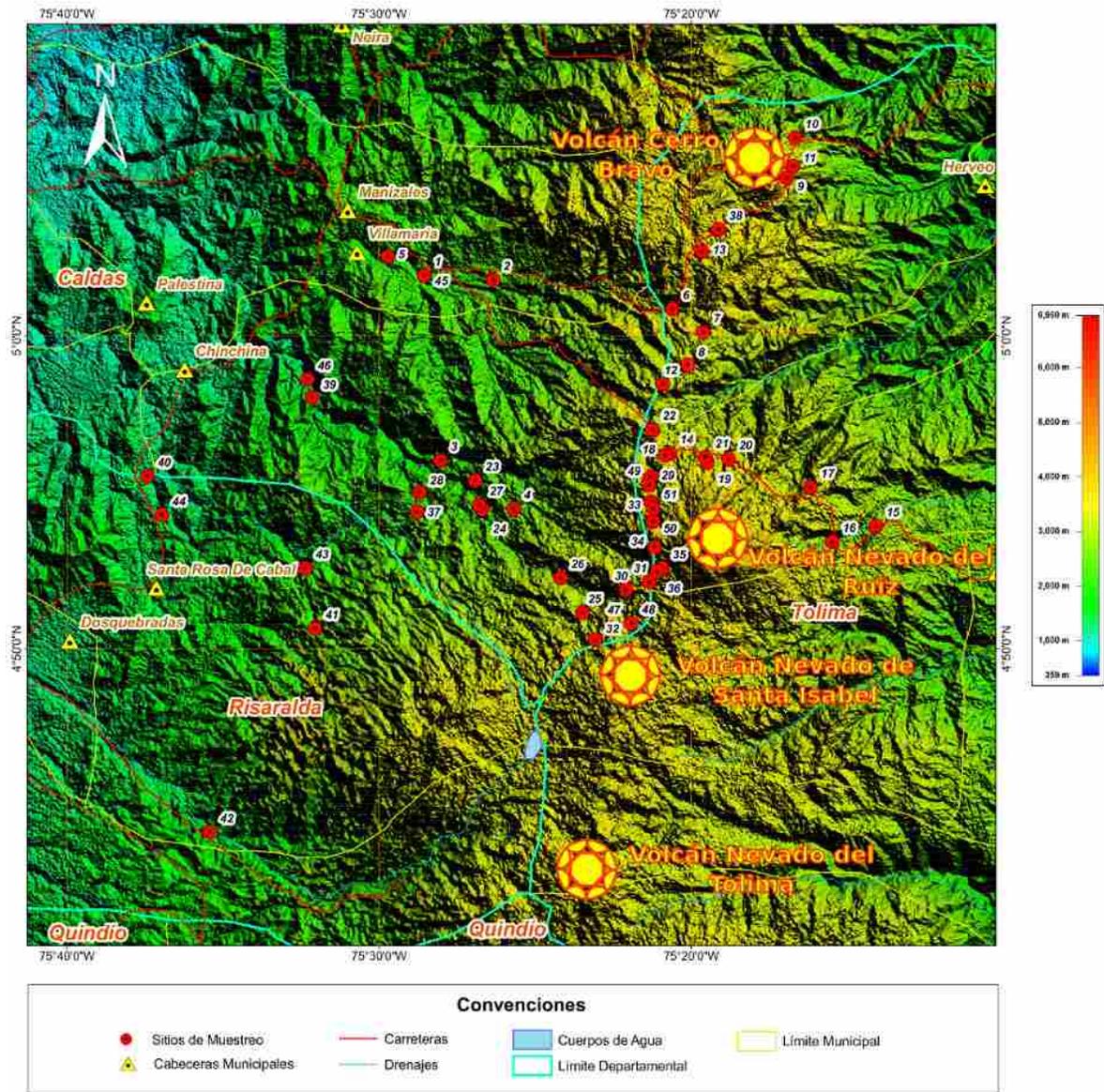
4. Resultados paleomagnéticos

4.1 Complejo volcánico del centro-occidente de Colombia

Se muestrearon 52 sitios (Figura 4-1) durante 34 días de campo, trabajo realizado por temporadas desde marzo de 2007 a febrero de 2009. Todos los sitios muestreados están ubicados en los departamentos de Caldas, Tolima y Risaralda; variaron en un rango de altitud desde 1510 hasta 4640 m.s.n.m. Cada sitio se asocia a una lava o domo relacionados con los volcanes Cerro Bravo, Nevado del Ruiz, Paramillo del Cisne, Nevado Santa Isabel y Paramillo de Santa Rosa. La descripción detallada de cada sitio muestreado se encuentra en la Tabla 4-1.

El número total de núcleos extraídos, rotulados y desmagnetizados, mediante la técnica de desmagnetización progresiva por campo alterno, fue de 527. Del total de especímenes desmagnetizados, 40 fueron procesados en laboratorio de paleomagnetismo y magnetismo ambiental de la Universidad de La Florida por Victoria Mejía Bernal aplicando el tratamiento C (Tabla 2-1), 347 por Kainian Huang aplicando el tratamiento B (Tabla 2-1), y 140 por el autor aplicando el tratamiento A (Tabla 2-1). En total se emplearon alrededor de tres meses de trabajo en el laboratorio para obtener el conjunto de datos a procesar de esta región de estudio.

Figura 4-1: Mapa con sitios de muestreo en el complejo volcánico del centro-occidente.



4.1.1 NRM y magnetismo de rocas

La mayoría de los especímenes tienen polarización magnética normal, y el conjunto de datos analizados tiene una dispersión baja en la NRM inicial (Figura 4-2a). La dispersión baja de los datos es confirmada al observar la distribución del estimador del parámetro de precisión, k , de la dirección media de la NRM inicial de cada uno de los sitios (Figura 4-2b).

Tabla 4-1: Información de los sitios muestreados en el complejo volcánico del centro-occidente.

ID	Nombre	Fuente volcánica	Secuencia	Comentarios del sitio ^a	Lat., N	Long., E	Altitud	Ref. ^b
RT01	Lavas de Lusitania			[L] Barrio Lusitania (Manizales). Andesita.	5.03	-75.48	2020	5
RT02	Cerro Tesorito	Domo Tesorito		[D] Zona Industrial (Manizales). Basaltos columnares empaquetados.	5.03	-75.44	2368	4, 5
RT03	Lavas de Laguna Baja	Volcán Nevado del Ruiz	Post-ignimbritas del Ruiz	[L] Nereidas (Villamaría).	4.93	-75.47	2335	1
RT04	Lavas de Playa Larga	Volcán Nevado del Ruiz	Post-ignimbritas del Ruiz	[L] Nereidas (Villamaría). Andesita de dos piroxenos.	4.91	-75.43	2795	1
RT05	Cerro Sancancio	Domo Sancancio		[D] Manizales. Andesitas basálticas columnares.	5.04	-75.50	1938	4, 5
RT06	Peñas Blancas			[L] Vía Manizales – Bogotá, sector La Esperanza. Basaltos.	5.01	-75.34	3421	
RT07	Cerro Santana	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera (suite baja en K)	[D] Vía La Esperanza – Brisas.	5.00	-75.33	3488	3
RT08	Alto de la Laguna	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera (suite baja en K)	[D, L en bloques] Vía La Esperanza – Brisas.	4.98	-75.34	3860	3, 4
RT09	Cerro Bravo	Volcán Cerro Bravo	Volcán Cerro Bravo antiguo	[L] Vía Manizales – Bogotá, enseguida de la virgen de Cerro Bravo.	5.08	-75.28	3367	2
RT10	Cerro Bravo	Volcán Cerro Bravo	Flujos de lava orientales	[L] Vía Manizales – Bogotá, descendiendo a Padua, cerca a La Libia.	5.11	-75.28	3069	2
RT11	Cerro Bravo	Volcán Cerro Bravo	Flujos de lava orientales	[L] Vía Manizales – Bogotá, descendiendo a Padua.	5.09	-75.28	3287	2
RT12	El Arbolito	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[D] Vía La Esperanza – Brisas.	4.97	-75.35	4073	4
RT13	Alto Frailejón	Volcán Nevado del Ruiz		[L] Vía Manizales – Bogotá, páramo de Letras.	5.04	-75.33	3784	
RT14	Cabecera del río Gualí	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera	[L] Vía Brisas – Murillo, lengüeta de lava reciente.	4.94	-75.34	4060	3
RT15	Rosarito	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L en bloques] Vía Brisas – Murillo. Andesita.	4.90	-75.23	3497	4
RT16	Río Lagunillas	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L] Vía Brisas – Murillo.	4.89	-75.26	3560	3
RT17	Laguna La Llorona	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L] Vía Brisas – Murillo.	4.92	-75.27	4031	3
RT18	Cabecera del río Gualí	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L] Vía Brisas – Murillo. Suprayacido por tefras.	4.94	-75.35	4068	3
RT19	Quebrada Seca	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera	[L] Vía Brisas – Murillo, lengüeta de lavas recientes.	4.93	-75.32	4127	3
RT20	Alto de Nieto	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L] Vía Brisas – Murillo.	4.93	-75.31	4140	3
RT21	Quebrada Lisa	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo (suite baja en K)	[L] Vía Brisas – Murillo.	4.94	-75.33	4111	3
RT22	Cerro Gualí	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas pre-Ruiz	[L] Vía La Esperanza – Brisas. Basalto andesítico.	4.95	-75.35	4077	3
RT23	Lava en bloques de Playa Larga	Volcán Nevado del Ruiz	Post-ignimbritas del Ruiz	[L] Nereidas (Villamaría). Andesita de dos piroxenos.	4.92	-75.45	2613	1
RT24	Colada de lava El Plan	Volcán Nevado Santa Isabel	Post-ignimbritas del Ruiz	[L] Nereidas (Villamaría).	4.91	-75.44	2579	1
RT25	El Recodo	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas pre-Ruiz	[L] Nereidas (Villamaría). Andesita.	4.85	-75.39	3827	3
RT26	La Pica	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L] Nereidas (Villamaría). Andesita	4.87	-75.40	3465	4
RT27	Hacienda La Quinta	Volcán Nevado del Ruiz	Post-ignimbritas del Ruiz	[P] Nereidas (Villamaría). Toba cristalina de composición andesítica.	4.91	-75.45	2629	1, 3
RT28	Hacienda Conventos	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas pre-Ruiz	[L] Vía Villamaría - La Telaraña. Andesita.	4.92	-75.48	2452	3

Tabla 4-1: (Continuación)

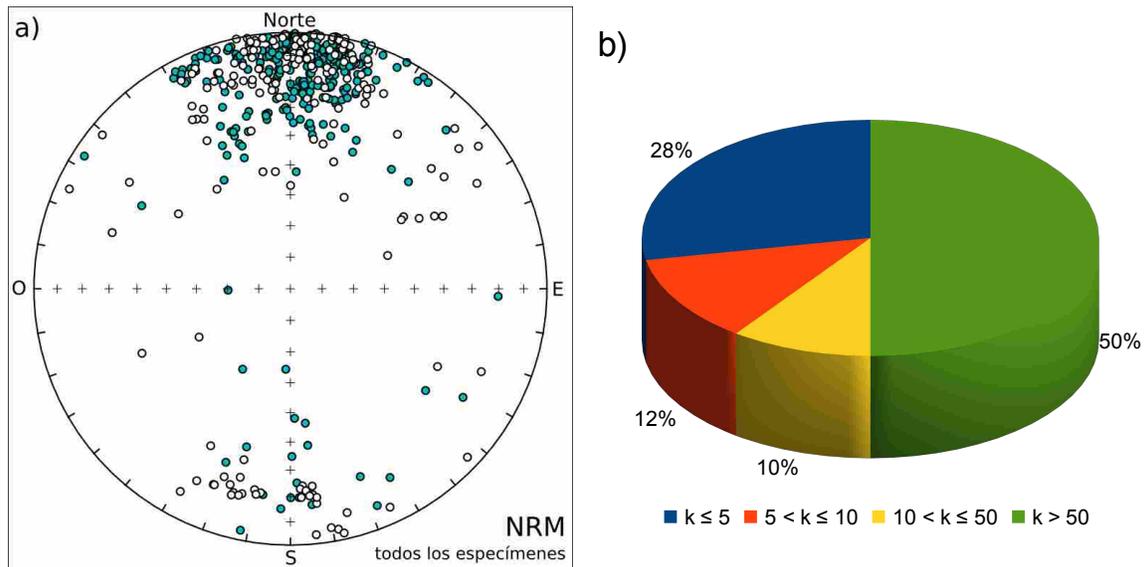
ID	Nombre	Fuente volcánica	Secuencia	Comentarios del sitio ^a	Lat., N	Long., E	Altitud	Ref. ^b
RT29	Chalet Suizo	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera	[L] Vía Brisas - La Olleta, lengüeta de lavas recientes	4.93	-75.35	4247	3
RT30	El Cisne	Volcán El Cisne	Lavas cono primitivo	[L] Vía La Olleta - El Cisne.	4.86	-75.37	4219	3
RT31	Quebrada Alfombrales	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera	[L] Vía La Olleta - El Cisne.	4.87	-75.36	4300	3
RT32	Sendero Conejeras	Volcán Nevado Santa Isabel	Lavas cono primitivo	[L] Vía El Cisne - Potosí.	4.84	-75.38	4155	3
RT33	Valle de las tumbas	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L] Vía Brisas - La Olleta.	4.91	-75.35	4428	3
RT34	La Olleta	Volcán Nevado del Ruiz	Post-ignimbritas del Ruiz	[L almohadillada] Vía La Olleta - El Cisne.	4.89	-75.35	4637	3
RT35	Cabecera Quebrada Nereidas	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera	[L] Vía La Olleta - El Cisne. Subyace a sitio 36.	4.88	-75.35	4514	3
RT36	Cabecera Quebrada Nereidas	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera	[L] Vía La Olleta - El Cisne. Suprayace a sitio 35.	4.87	-75.35	4480	3
RT37	Balastera en La Zulia	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas pre-Ruiz	[L] Vía La Telaraña - Potosí.	4.91	-75.48	2837	3
RT38	Alto de Letras	Volcán Nevado del Ruiz		[L] Vía Manzales-Bogotá. Basaltos.	5.06	-75.32	3401	
RT39	El Destierro	Volcán Nevado del Ruiz	Post-ignimbritas del Ruiz	[P] Vía río Claro - El Destierro (Villamaría).	4.97	-75.54	1774	1, 3
RT40	El Jazmín	Volcán Nevado Santa Isabel	Lavas río Campo Alegre	[L] Vía Chinchiná - Santa Rosa de Cabal. Andesita basáltica.	4.93	-75.62	1514	6
RT41	Termales de San Vicente	Páramo de Santa Rosa		[L] Vía Santa Rosa de Cabal - Guacas.	4.84	-75.53	2600	
RT42	La Suiza			Vía Pereira - El Cedral.	4.74	-75.59	1831	
RT43	Potreros	Páramo de Santa Rosa		[L] Vía Santa Rosa de Cabal - Termales de San Vicente. Andesita.	4.88	-75.54	2284	4
RT44	Guacas	Volcán Nevado Santa Isabel	Lavas río Campo Alegre	[L] Vía Santa Rosa de Cabal - Guacas. Andesita basáltica.	4.90	-75.62	1632	6
RT45	Lavas de Lusitania			[L dique] Barrio Lusitania (Manizales).	5.03	-75.48	2026	5
RT46	Río Claro			Puente sobre río Claro, vía Villamaría - Chinchiná.	4.98	-75.54	1526	
RT47	Hotel El Cisne	Volcán Nevado Santa Isabel	Lavas de Santa Isabel	[L] Vía El Cisne - Potosí. Subyace a sitio 48.	4.85	-75.37	4184	3
RT48	Hotel El Cisne	Volcán Nevado Santa Isabel	Lavas de Santa Isabel	[L] Vía El Cisne - Potosí. Suprayace a sitio 47.	4.85	-75.37	4207	3
RT49	Chalet Suizo	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas cono primitivo	[L] Vía Brisas - La Olleta. Estriado y meteorizado.	4.92	-75.36	4302	3
RT50	La Olleta	Volcán Nevado del Ruiz	Post-ignimbritas del Ruiz	[L] Vía La Olleta - El Cisne.	4.90	-75.35	4553	3
RT51	Valle de las tumbas	Volcán Nevado del Ruiz	Lavas y domos postcaldera	[L] Vía Brisas - La Olleta.	4.91	-75.35	4489	3
RTSM11	Cerro Bravo	Stock Manzales		Vía Manzales - Bogotá. Intrusivo.	5.08	-75.28	3400	

Las columnas indican, de izquierda a derecha: identificación del sitio (ID); nombre asignado al sitio; fuente volcánica; secuencia; comentarios acerca del sitio; coordenadas del sitio en latitud norte y longitud este; altitud en metros sobre el nivel del mar; referencia(s) del sitio en otro(s) estudio(s).

^a Comentarios del sitio: [D] domo; [L] emplazamiento de lava; [P] emplazamiento de flujo piroclástico.

^b Referencias: 1, *Grand y Handszer* [1989]; 2, *Lescinsky* [1990]; 3, *Schaefer* [1995]; 4, *Thouret et al.* [1990]; 5, *Naranjo y Ríos* [1989]; 6, *Naranjo* [2005].

Figura 4-2: Proyección de áreas iguales de todos los especímenes del complejo volcánico del centro-occidente.



A la izquierda (Figura 4-2a) la NRM inicial de todos los especímenes; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. A la derecha (Figura 4-2b), distribución del estimador del parámetro de precisión, k , de la dirección media de la NRM inicial de cada uno de los sitios.

Del conjunto total de sitios se seleccionaron cinco sitios de interés en la región centro-occidente. Para realizar la selección del sitio, se tuvo en cuenta alguna característica de interés subjetivo por parte del autor, por ejemplo: sitios ubicados dentro del perímetro urbano de Manizales; sitios con polaridad magnética inversa. De cada sitio se seleccionó una muestra para obtener información magnética adicional. En la Tabla 4-2 se presentan los resultados de los parámetros magnéticos calculados.

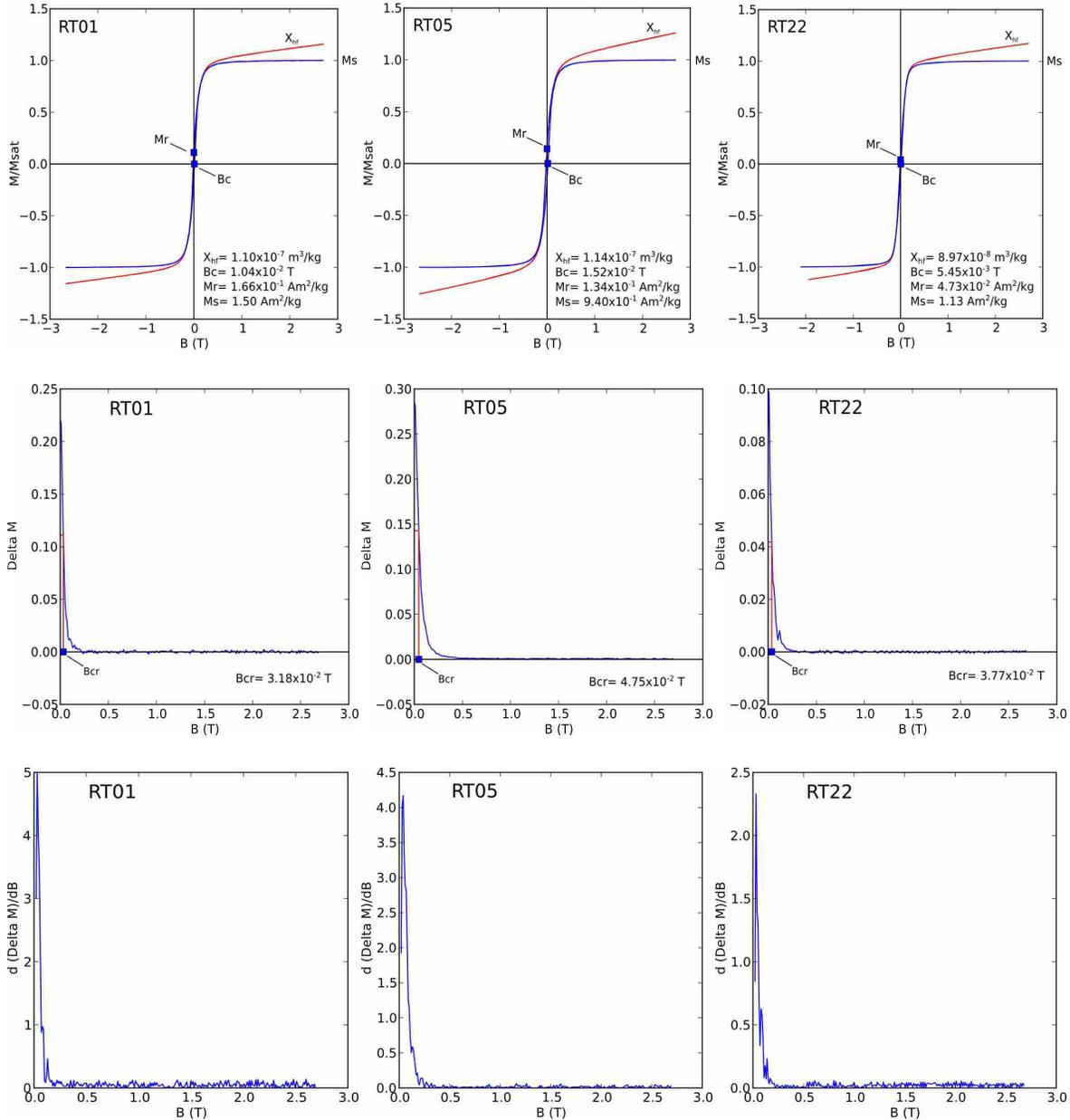
Tabla 4-2: Parámetros obtenidos de la curva de histéresis de algunos sitios.

Sitio	χ_{hf} [m ³ /kg]	Bc [mT]	Mr [Am ² /kg]	Ms [Am ² /kg]	Bcr [mT]	$\frac{Mr}{Ms}$	$\frac{Bcr}{Bc}$	Interés
RT01	1.10×10^{-7}	10,4	1.66×10^{-1}	1,5	31,8	0,11	3,06	Ubicada en Manizales. Polaridad normal.
RT02	9.86×10^{-8}	6,1	7.20×10^{-2}	1.5	60,7	0,05	9,95	Ubicada en Manizales. Polaridad normal.
RT05	1.14×10^{-7}	15,2	1.34×10^{-1}	0.94	47,5	0,14	3,13	Ubicada en Manizales. Polaridad inversa.
RT10	1.17×10^{-7}	7,45	9.66×10^{-2}	1,42	40,6	0,07	5,42	Polaridad inversa.
RT22	8.97×10^{-8}	5,45	4.73×10^{-2}	1,13	37,7	0,04	6,92	Alta meteorización. Polaridad inversa.

Donde: χ_{hf} , susceptibilidad de campo alto; Bc , coercitividad magnética; Mr , magnetización remanente; Ms magnetización de saturación; Bcr , coercitividad magnética de remanencia.

La Figura 4-3 muestra información importante que se puede obtener a partir de las curvas de histéresis. En términos generales, el comportamiento fue similar para todos los sitios analizados, razón por la que únicamente se presentan gráficas de tres sitios.

Figura 4-3: Comportamiento de las curvas de histéresis.



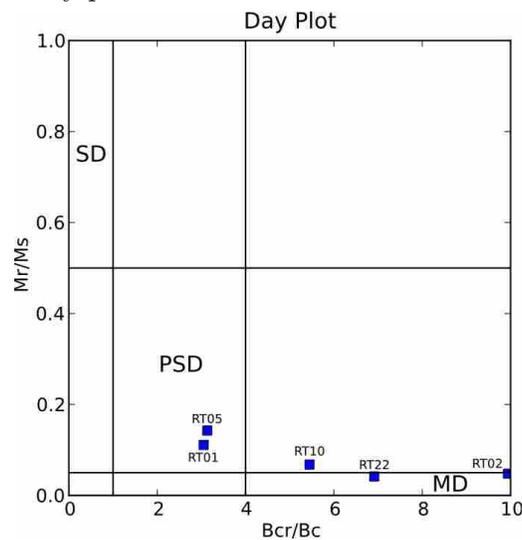
Primera fila: curvas de histéresis; la curva azul es el ciclo de histéresis luego de haber sustraído la contribución paramagnética y/o diamagnética presente en la curva roja inicial. Segunda fila: curva ΔM (obtenida al sustraer el lazo ascendente del descendente en el ciclo de histéresis), usada para estimar la coercitividad de remanencia B_{cr} . Tercera fila: primera derivada de la curva de ΔM con respecto a la inducción magnética.

Las curvas son estrechas y sin constricción central, lo que indica la presencia de una sola fase natural magnética, con valores de coercitividad, B_c , semejantes entre los sitios según

el reporte dado en la Tabla 4-2. Los ciclos de histéresis son estrechos debido a que tienen una baja relación M_r/M_s y representativos de minerales ferromagnéticos blandos. La presencia de una sola fase magnética se confirma al observar un pico de gran amplitud al inicio del espectro presentado en las gráficas de la tercera fila (Figura 4-3); ese pico se alcanza con un valor bajo de inducción magnética ($B_c < 20 \text{ mT}$), lo que confirma la baja coercitividad del mineral magnético.

Los resultados obtenidos a partir del diagrama de Day (Figura 4-4), muestran que los minerales magnéticos de las muestras analizadas se encuentran dentro de las celdas que caracterizan los estados magnéticos pseudo-mono dominio (PSD) y multidominio (MD), indicando un mayor tamaño de grano si se les compara con minerales magnéticos con granos monodominio (SD).

Figura 4-4: Diagrama de Day para sitios analizados.



Las curvas de histéresis y el diagrama de Day, sugieren que el mineral magnético predominante en las muestras analizadas es titanomagnetita, con cristales que se encuentran en el rango de tamaño de grano caracterizado por los estados magnéticos PSD y MD.

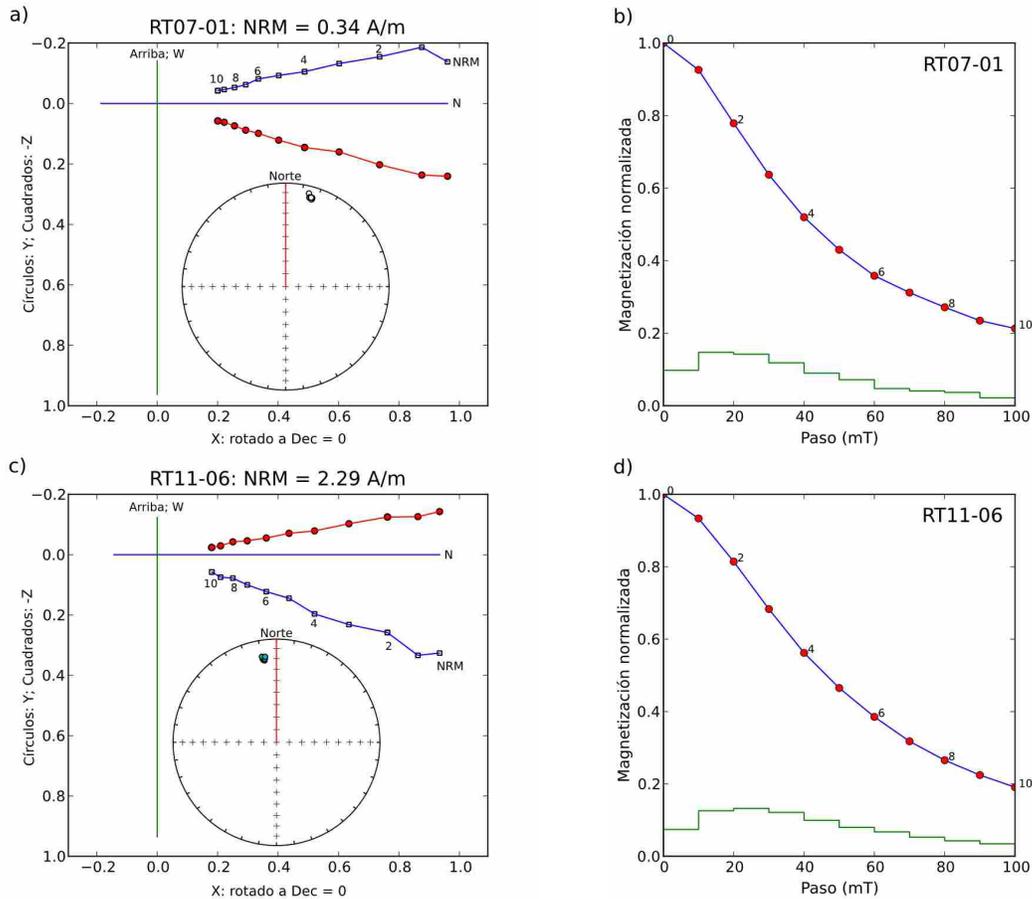
4.1.2 Desmagnetización

Según el tipo de comportamiento durante la desmagnetización de los especímenes, se han clasificado los sitios en cuatro tipos: *tipo i*, *ii*, *iii*, *iv*.

Los sitios *tipo i* (37 sitios, un 74% del total de sitios), desde el punto de vista paleomagnético, están conformados en su mayoría por especímenes con una NRM compuesta de una única componente estable (Figura 4-5a y 4-5c) que no pudo ser

eliminada totalmente en la desmagnetización por campo alterno; el campo alterno con mayor efecto destructor estuvo comprendido en el rango de 30 a 100 mT (Figura 4-5b y 4-5d). La NRM de los especímenes de este tipo de sitio tiene una dispersión inicial baja, confirmando que su valor es próximo a la dirección real de la ChRM. Se sugiere que la remanencia magnética está asociada a la presencia portadores magnéticos tipo titanomagnetitas de coercitividad moderada a alta, porque no alcanzan a desmagnetizarse, con pobre contenido de Titanio.

Figura 4-5: Gráficas representativas de la desmagnetización del primer grupo de sitios.

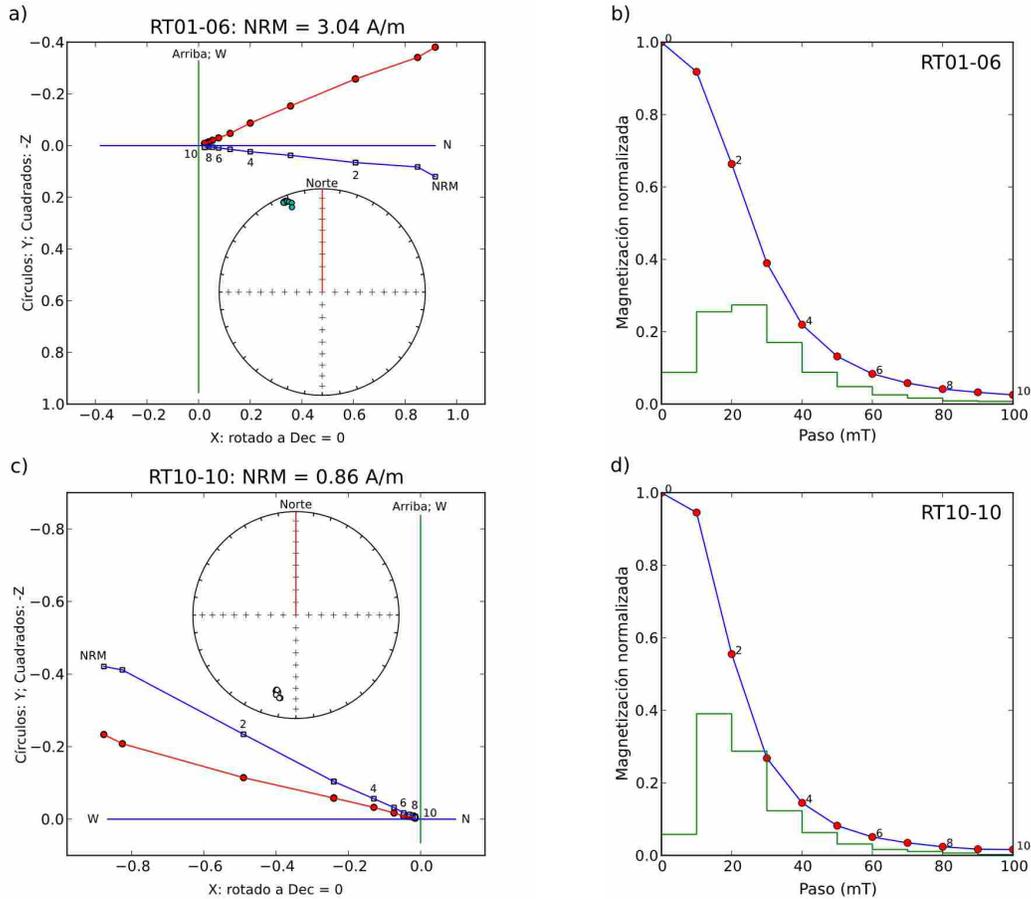


En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos; los círculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinación magnética (proyección horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinación magnética arriba o abajo de la horizontal (proyección vertical). Dentro, proyección de áreas iguales; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gráficas de decaimiento de la curva de intensidad magnética normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetización aplicado.

Los sitios *tipo ii* (8 sitios, un 16% del total de sitios), desde el punto de vista paleomagnético, están conformados en su mayoría por especímenes que presentaron un comportamiento simple. La NRM estaba compuesta de una única componente estable

(Figura 4-6a y 4-6c) que se eliminó con facilidad y casi en su totalidad por el proceso de desmagnetización por campo alterno, con campos destructores de 10 a 30 mT (Figura 4-6b y 4-6d). La dispersión inicial de la NRM de los especímenes de cada sitio fue muy baja, siendo su valor casi igual a la dirección de la ChRM (comparando Figura 4-9d con 4-9e). Se sugiere que la remanencia magnética está asociada a la presencia de portadores magnéticos de media coercitividad tipo titanomagnetitas con contenido medio de Titanio.

Figura 4-6: Gráficas representativas de la desmagnetización del segundo grupo de sitios.

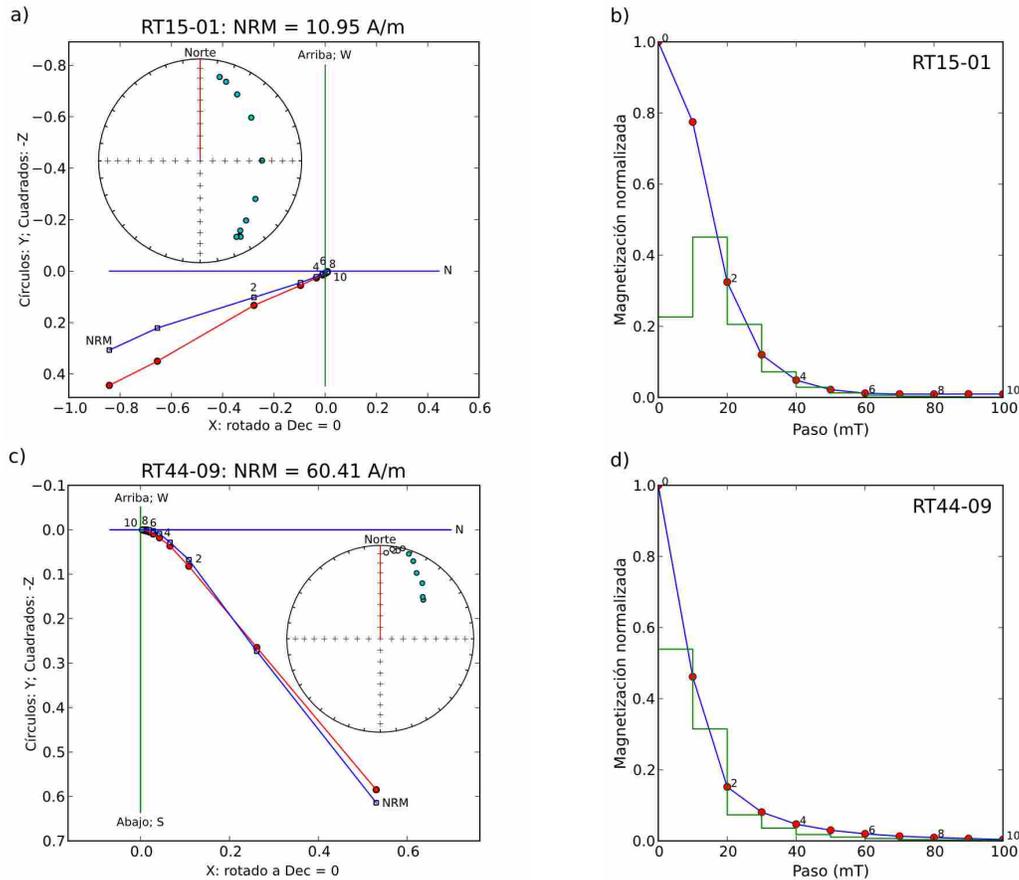


En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos; los círculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinación magnética (proyección horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinación magnética arriba o abajo de la horizontal (proyección vertical). Dentro, proyección de áreas iguales; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gráficas de decaimiento de la curva de intensidad magnética normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetización aplicado.

Los sitios *tipo iii* (3 sitios, un 6% del total de sitios) presentan especímenes con un comportamiento anómalo en la desmagnetización. Se caracterizan por valores elevados de intensidad de la NRM inicial y alta dispersión (Figura 4-10d), baja coercitividad (Figura 4-7b y 4-7d) y presencia de dos componentes magnéticas con un algún grado de solapamiento

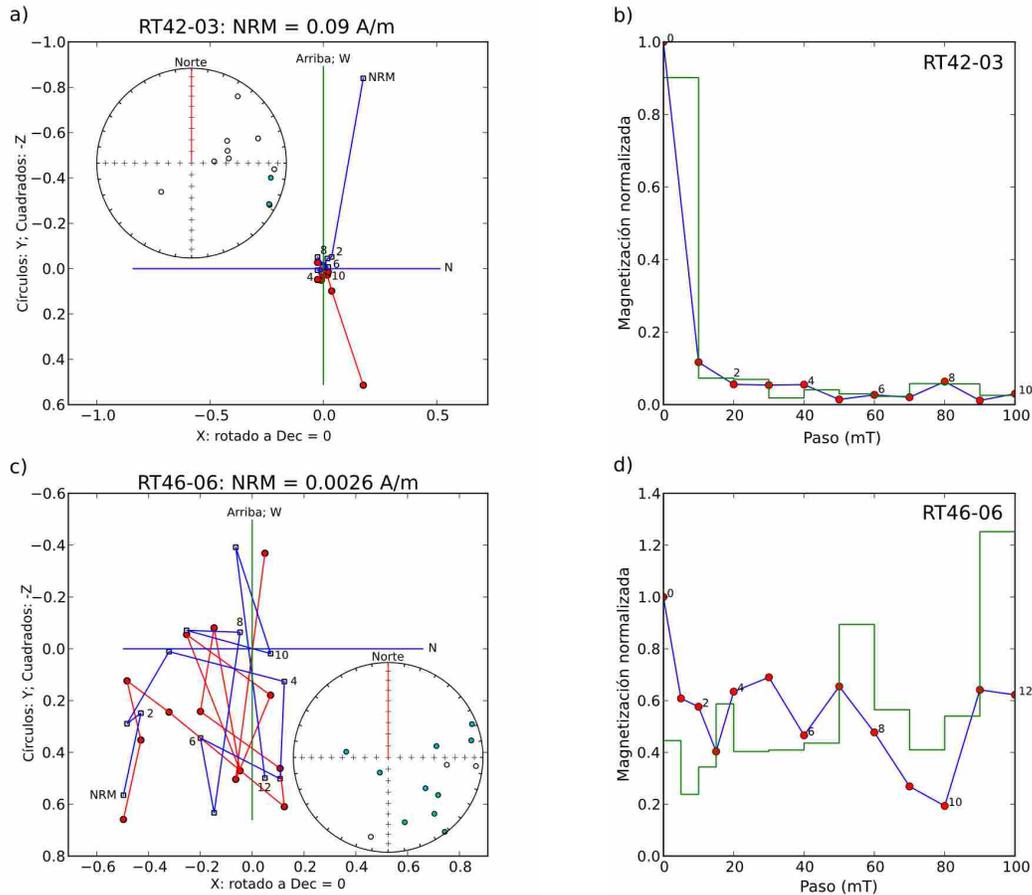
(Figura 4-7a y 4-7c). Estos sitios fueron impactados por rayos, los que a su paso a través de la roca indujeron una componente de magnetización tipo IRM de baja coercitividad, que se superpone a la componente característica ChRM de origen primario (termorremante o TRM) de mayor coercitividad.

Figura 4-7: Gráficas representativas de la desmagnetización del tercer grupo de sitios.



En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos; los círculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinación magnética (proyección horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinación magnética arriba o abajo de la horizontal (proyección vertical). Dentro, proyección de áreas iguales; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gráficas de decaimiento de la curva de intensidad magnética normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetización aplicado.

Los sitios *tipo iv* (2 sitios, un 4% del total de sitios), están conformados por especímenes que presentaron un comportamiento aleatorio en la desmagnetización. La intensidad inicial de la NRM es muy baja y su dispersión direccional muy alta. A medida que se desarrolló el tratamiento de desmagnetización no se observó alguna componente estable de magnetización (Figura 4-8a y 4-8c), no se agruparon las direcciones y por tanto no se pudo obtener una dirección media del sitio. Estos sitios fueron excluidos del análisis paleomagnéticos.

Figura 4-8: Gráficas representativas de la desmagnetización del cuarto grupo de sitios.

En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos; los círculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinación magnética (proyección horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinación magnética arriba o abajo de la horizontal (proyección vertical). Dentro, proyección de áreas iguales; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gráficas de decaimiento de la curva de intensidad magnética normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetización aplicado.

4.1.3 Dirección paleomagnética por sitio y región, polo paleomagnético

El resumen de los resultados paleomagnéticos para todos los sitios investigados esta contenido en la Tabla 4-3. Los datos presentados en la tabla confirman que la mayoría de sitios tienen polaridad normal; sólo tres sitios tienen polaridad inversa.

Tabla 4-3: Estadísticas paleomagnéticas para cada sitio muestreado.

ID	SITIO		N	n	nl	np	P	DIRECCIÓN MEDIA				VGP		EDAD		
	Lat., N	Long., E						D	I	α_5	k	Lat., N	Long., E	Edad (Ma)	2 σ	Ref. ^c
RT01	5.03	-75.48	20	19	19	0	N	346.0	6.6	3.7	84	75.9	188.0	< 0.038	± 0.02	5
RT02 ^b	5.03	-75.44	16	9	7	2	T	354.5	-47.5	3.9	176	55.9	113.2	1.20	± 0.20	4, 5
RT03	4.93	-75.47	11	10	10	0	N	6.0	7.0	3.5	194	83.9	27.7	0.04 – 0.09		1
RT04	4.91	-75.43	10	8	8	0	N	5.2	5.7	4.7	142	84.4	35.9	0.04 – 0.09		1
RT05	5.04	-75.50	12	8	8	0	R	175.4	-22.3	1.9	875	-82.0	70.0	1.20	± 0.08	4, 5
RT06	5.01	-75.34	14	13	13	0	N	0.3	1.9	1.7	581	85.9	100.4			
RT07	5.00	-75.33	11	8	8	0	N	20.3	-15.1	1.6	1130	66.1	46.6	< 0.089		3
RT08	4.98	-75.34	15	11	11	0	N	7.2	22.6	5.1	81	80.2	330.6	< 0.089		3, 4
RT09	5.08	-75.28	11	9	9	0	N	360.0	1.9	3.7	193	85.9	104.7	< 0.1		2
RT10	5.11	-75.28	13	12	12	0	R	194.0	-19.2	2.3	373	-75.3	174.9			2
RT11	5.09	-75.28	12	8	8	0	N	358.8	18.0	4.5	153	85.7	268.7	< 0.1		2
RT12	4.97	-75.35	10	9	7	2	R	180.1	-4.3	3.8	187	-87.2	282.6	0.76 – 0.97		4
RT13	5.04	-75.33	11	9	9	0	N	357.4	30.7	2.8	341	78.2	272.4			
RT14	4.94	-75.34	14	11	11	0	N	350.7	7.4	2.8	265	80.6	187.5	< 0.089		3
RT15	4.90	-75.23	12	10	7	3	N	0.9	4.4	2.0	595	87.2	86.3	0.16	± 0.07	4
RT16	4.89	-75.26	10	8	8	0	N	355.9	3.3	1.8	950	84.8	156.5	0.4 – 0.9		3
RT17 ^a	4.92	-75.27	10	8	8	0		357.5	-2.3	6.3	79			0.4 – 0.9		3
RT18 ^a	4.94	-75.35	11	6	6	0		347.6	-18.0	6.0	126			0.4 – 0.9		3
RT19	4.93	-75.32	11	10	10	0	N	14.9	5.6	4.2	134	75.0	22.3	< 0.089		3
RT20	4.93	-75.31	10	9	9	0	N	352.8	-14.0	2.4	466	76.0	135.6	0.4 – 0.9		3
RT21	4.94	-75.33	9	9	9	0	N	14.1	7.4	2.2	573	75.9	19.1	< 0.089		3
RT22 ^a	4.95	-75.35	9	6	6	0		177.9	21.8	5.9	128			0.9 – 1.8		3
RT23	4.92	-75.45	12	11	11	0	N	9.9	4.5	2.5	333	79.8	29.3	0.04 – 0.09		1
RT24	4.91	-75.44	9	8	8	0	N	11.3	10.7	2.4	521	78.7	11.6	0.04 – 0.09		1
RT25	4.85	-75.39	11	11	11	0	N	335.7	5.8	1.8	643	65.7	190.9	0.9 – 1.8		3
RT26	4.87	-75.40	10	10	10	0	N	13.6	22.2	2.4	392	75.0	347.4	0.20	± 0.15	4
RT27 ^a	4.91	-75.45	5	5	5	0		357.4	-7.9	7.0	119			0.09	± 0.01	1, 3
RT28	4.92	-75.48	8	7	7	0	N	5.2	7.7	2.6	555	84.7	25.8	0.9 – 1.8		3
RT29	4.93	-75.35	9	8	6	2	N	5.4	-26.2	3.0	367	70.5	88.8	< 0.089		3
RT30	4.86	-75.37	10	9	9	0	N	14.6	22.0	1.8	829	74.1	349.3	0.4 – 0.9		3
RT31	4.87	-75.36	10	8	7	1	N	12.8	-5.7	4.3	173	75.1	45.5	< 0.089		3
RT32	4.84	-75.38	10	10	10	0	N	6.2	24.5	1.9	617	79.9	321.6	0.4 – 0.9		3
RT33	4.91	-75.35	9	8	7	1	N	5.7	5.1	5.2	116	83.8	36.9	0.40	± 0.10	3
RT34	4.89	-75.35	6	5	5	0	N	353.7	-4.2	4.1	349	80.6	146.8	< 0.089		3
RT35	4.88	-75.35	12	11	11	0	N	8.4	7.2	1.9	576	81.5	22.9	< 0.089		3
RT36	4.87	-75.35	10	9	9	0	N	10.9	1.0	2.8	340	78.3	36.2	< 0.089		3
RT37 ^a	4.91	-75.48	9	8	8	0		329.2	-24.3	7.3	59			0.9 – 1.8		3
RT38	5.06	-75.32	11	10	10	0	N	7.7	-2.8	2.4	416	80.0	54.5			
RT40	4.93	-75.62	12	12	12	0	N	6.3	-16.0	2.8	247	75.5	78.7			6
RT41 ^a	4.84	-75.53	4	3	3	0		355.4	12.1	9.7	164					
RT43	4.88	-75.54	13	11	11	0	N	339.4	38.2	4.5	105	64.0	236.1			4
RT44	4.90	-75.62	10	8	7	1	N	2.3	-14.2	3.2	315	77.7	93.6			6
RT47	4.85	-75.37	10	10	10	0	N	12.9	13.6	2.0	601	77.0	4.9	0.4 – 0.9		3
RT48	4.85	-75.37	10	10	10	0	N	11.2	15.1	2.3	453	78.5	359.8	0.4 – 0.9		3
RT49	4.92	-75.36	11	11	8	3	N	2.8	3.3	2.6	316	85.7	64.0	0.089 – 0.4		3
RT50	4.90	-75.35	10	10	10	0	N	6.4	5.0	1.9	662	83.2	35.0	< 0.089		3
RT51	4.91	-75.35	10	10	10	0	N	0.2	-4.1	2.0	611	83.0	103.0	< 0.089		3
RTSM11 ^a	5.08	-75.28	4	4	3	1		1.8	25.5	7.1	190					

Las columnas indican, de izquierda a derecha: identificación del sitio (ID); coordenadas del sitio en latitud norte y longitud este; número total de especímenes desmagnetizados por cada sitio (N); número total de especímenes incluidos en las estadísticas de cada sitio (n); número total de líneas de mejor ajuste (nl) y ...

Tabla 4-3: (Continuación)

número de planos de mejor ajuste (np) para los especímenes incluidos en la media del sitio; polaridad magnética del sitio (P) indicada por las letras N (normal), R (inversa) y T (transicional); declinación (D) e inclinación (I) magnética para cada sitio calculadas a partir de la estadística de *Fisher* [1953] o por el análisis de círculos máximos de remagnetización [McFadden y McElhinny, 1988], donde α_{95} es el radio del cono de 95% de confianza alrededor de la dirección media calculada, y k es el parámetro de concentración; coordenadas de los VGP's en latitud norte y longitud este; edad del sitio, algunos incluyen una incertidumbre en la edad de 2σ ; referencia de donde fue tomada la edad.

Los sitios RT42 y RT46 fueron omitidos de la tabla porque no se obtuvieron resultados satisfactorios a partir del análisis de componentes principales. El sitio RT39 fue omitido por sólo tener un espécimen analizado. El sitio RT45 fue fusionado con el sitio RT01 por ser considerado parte del mismo evento volcánico.

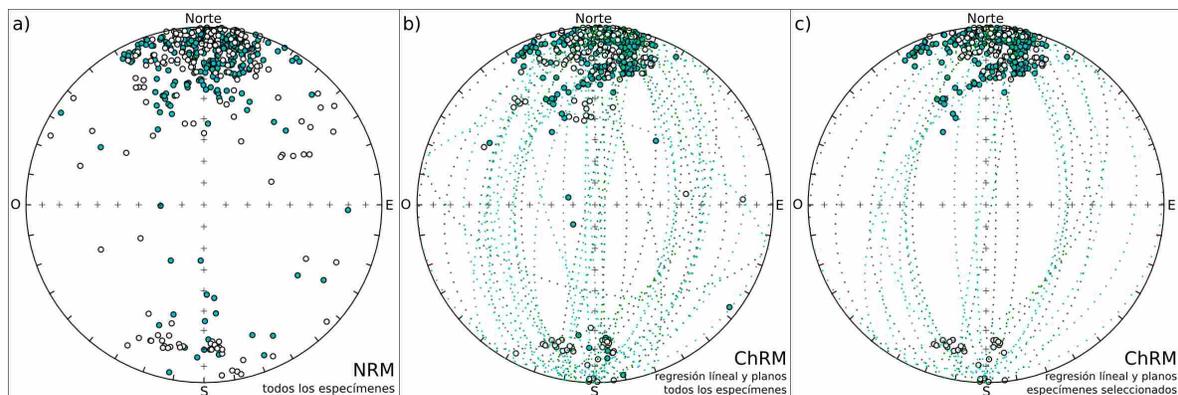
^a Sitios rechazados para el cálculo de la dirección media final por tener $\alpha_{95} > 5.49^\circ$.

^b Sitios rechazados para el cálculo de la dirección media final al ser considerados de polaridad transicional según el criterio de corte de *Vandamme* [1994].

^c Referencias: 1, *Grand y Handszer* [1989]; 2, *Lescinsky* [1990]; 3, *Schaefer* [1995]; 4, *Thouret et al.* [1990]; 5, *Naranjo y Ríos* [1989]; 6, *Naranjo* [2005].

En la Figura 4-9, observando de izquierda a derecha, se aprecia el resumen gráfico del efecto que tienen la desmagnetización, el cálculo de las direcciones de la ChRM (según la línea o el plano de mejor ajuste) y la selección de especímenes, al cumplir los lineamientos establecidos en los criterios de calidad planteados en la metodología (ítem 2.6).

Figura 4-9: Resumen gráfico del procesamiento de todos los especímenes.

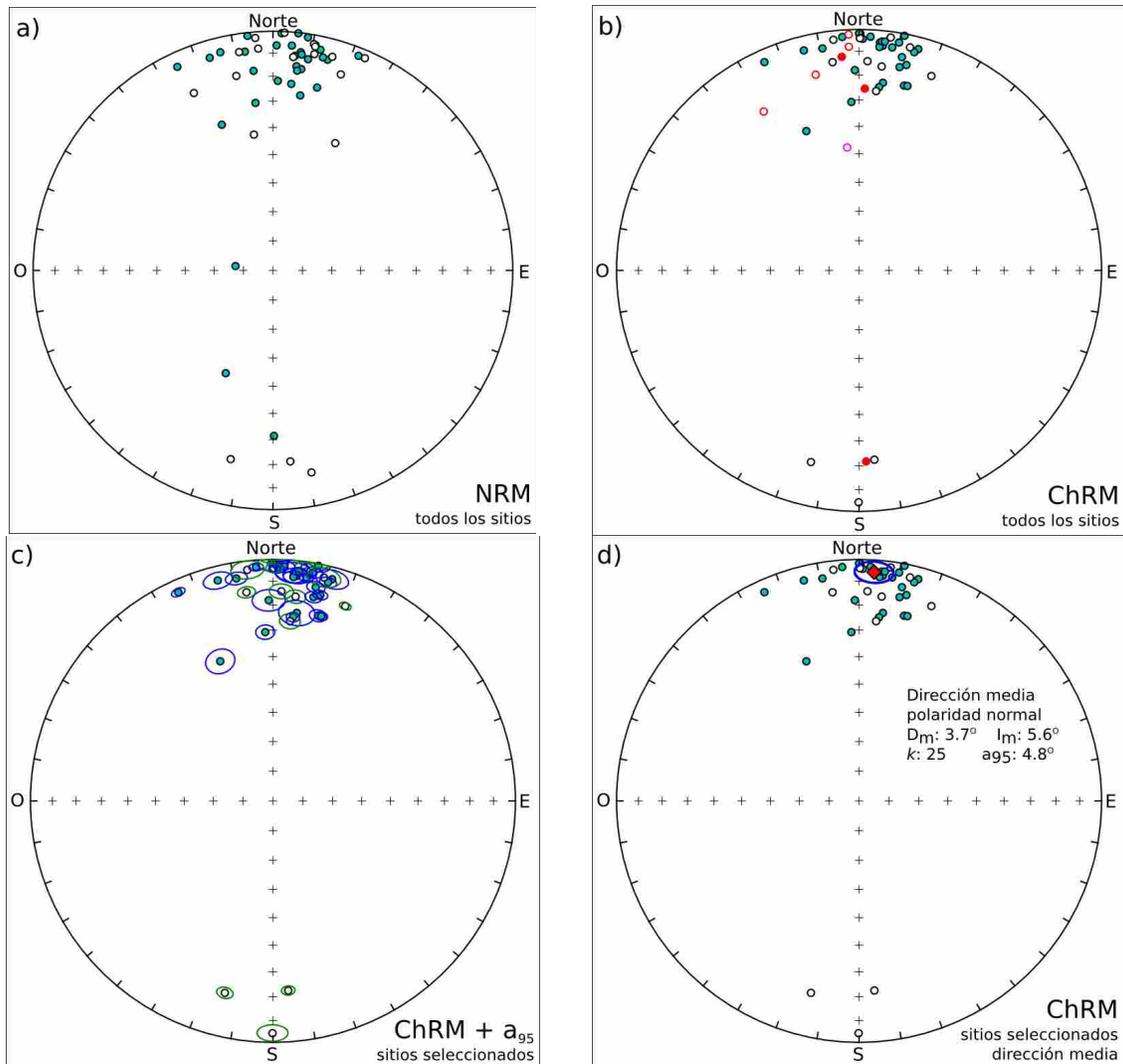


Proyección de áreas iguales de: **4-9a**, direcciones de la NRM inicial de todos los especímenes; **4-9b**, direcciones de la ChRM de todos los especímenes, aislada mediante la línea o el plano de mejor ajuste; **4-9c**, direcciones de la ChRM de los especímenes seleccionados por tener $MAD < 5.5^\circ$, de cada sitio se excluyeron especímenes con direcciones atípicas. Los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. Las líneas punteadas representan el plano de mejor ajuste.

De los 52 sitios muestreados, 40 pasaron todos los criterio de selección y fueron empleados en el cálculo de la dirección paleomagnética media. Los 12 sitios restantes fueron rechazados: dos fueron omitidos por tener especímenes con direcciones de desmagnetización completamente aleatorias (sitios *tipo iv*), que dieron resultados insatisfactorios luego del

PCA; siete sitios tienen un cono de confianza $\alpha_{95} > 5.49^\circ$; un sitio fue omitido por tener $n < 5$; un sitio fue catalogado como transicional luego de aplicar el criterio de corte de [Vandamme, 1994]; dos sitios se fusionaron por ser considerados parte del mismo evento volcánico. La dirección media calculada para cada sitio, con su cono de confianza al 95% y la distribución según su polaridad magnética se observa en la Figura 4-10c; además, se presentan los sitios rechazados según los criterios de calidad (Figura 4-10b).

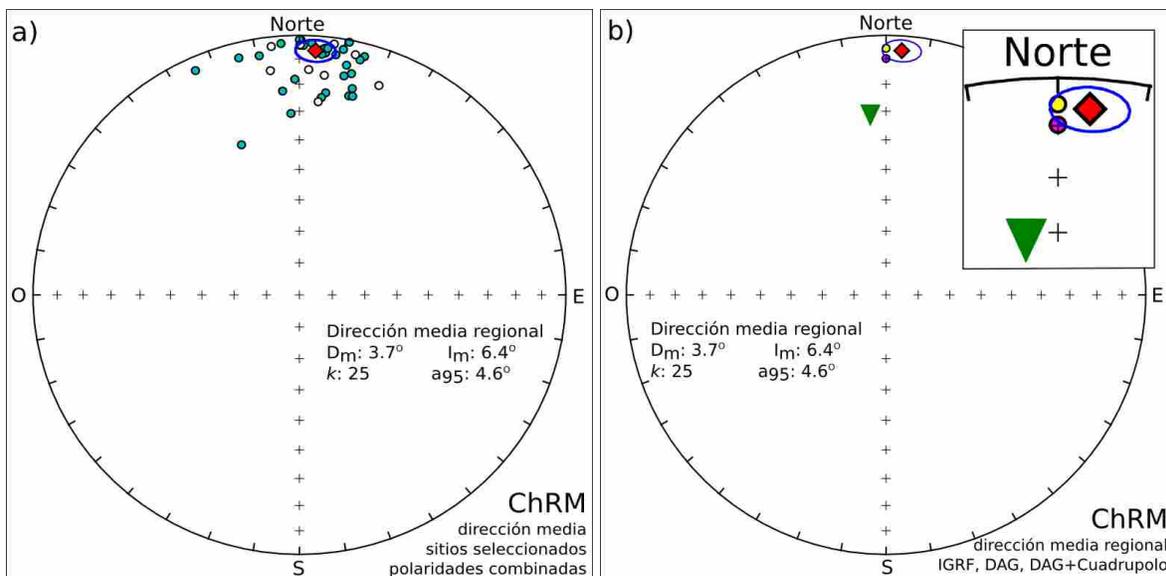
Figura 4-10: Resumen gráfico del procesamiento de todos los sitios.



Proyección de áreas iguales. **4-10a**, dirección de la NRM inicial calculada para cada uno de los sitios. **4-10b**, direcciones de la ChRM de cada uno de los sitios, determinadas utilizando estadística fisheriana o análisis de círculos máximos de remagnetización; los círculos rojos son sitios rechazados por tener conos de confianza $\alpha_{95} > 5.49^\circ$; el círculo magenta es un sitio rechazado por el criterio de corte de Vandamme. **4-10c**, direcciones de la ChRM de los sitios seleccionados con sus conos del 95% de confianza (elipse azul o verde, según si el vector magnético apunta hacia abajo o hacia arriba respectivamente). **4-10d**, direcciones de la ChRM de los sitios y dirección media regional para polaridad normal (diamante rojo) con su cono al 95% de confianza (elipse azul), calculada con estadística fisheriana. Cada sitio corresponde a un vector magnético que apunta hacia abajo o hacia arriba, representado por un círculo sombreado (color cian) o no sombreado respectivamente.

La dirección paleomagnética media para el complejo volcánico del centro-occidente de Colombia, fue calculada para sitios con polaridad normal (Figura 4-10d) y todos los sitios (Figura 4-11) mediante el uso de la estadística vectorial fisheriana; se comprobó antes que los datos correspondiesen a una distribución fisheriana. No se realizó el cálculo de la dirección paleomagnética media para sitios con polaridad inversa, el conjunto de datos esta conformado sólo por tres sitios siendo un número insuficiente para calcular adecuadamente la media. La Tabla 4-4 resume la dirección media regional y su correspondiente polo paleomagnético, calculados para todos los sitios y entre grupos de sitios según su polaridad magnética. La representación gráfica de los VGP's calculados para los 40 sitios se puede observar en la Figura 4-12a y el polo paleomagnético regional en la Figura 4-12b.

Figura 4-11: Dirección paleomagnética media calculada, región centro-occidente.

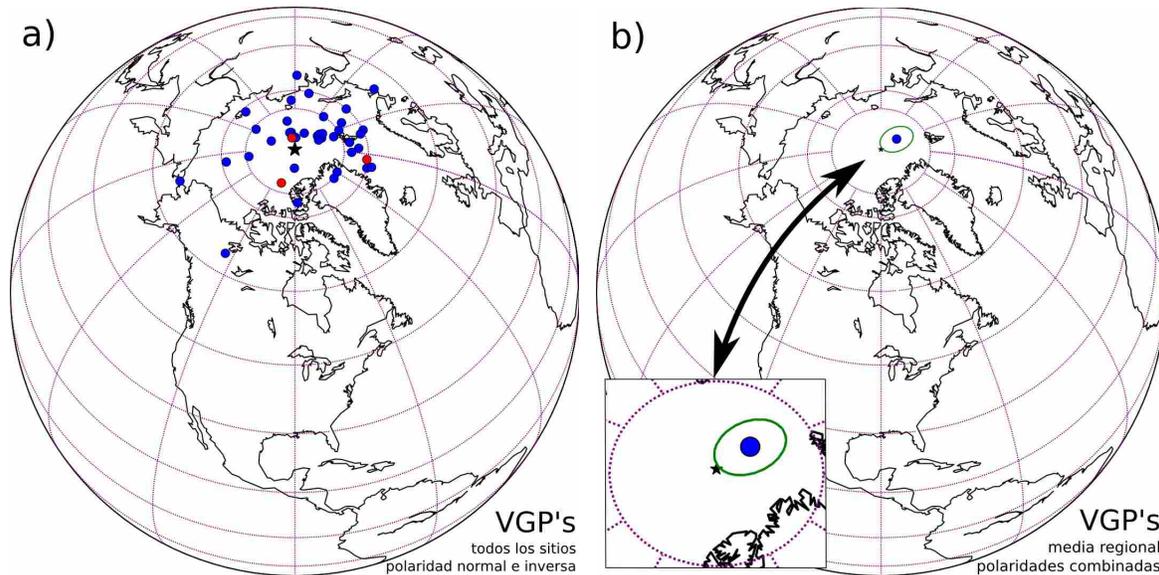


Proyección de áreas iguales. **4-11a**, direcciones de la ChRM de los sitios y dirección media regional (diamante rojo) para todos los sitios (combinación de sitios con polaridad normal con la antípoda de sitios con polaridad inversa) con su cono al 95% de confianza (elipse azul); cada sitio corresponde a un vector magnético que apunta hacia abajo o hacia arriba, representado por un círculo sombreado (color cian) o no sombreado respectivamente. **4-11b**, comparación de la dirección media regional (diamante rojo) y su cono al 95% de confianza (elipse azul) con la dirección esperada del GAD (círculo magenta), con la dirección esperada del GAD más 5% de cuadrupolo axial geocéntrico (círculo amarillo), y con el IGRF calculado para el año 2008 en la región de estudio (triángulo hacia abajo de color verde).

Tabla 4-4: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para el complejo volcánico del centro-occidente de Colombia.

DESCRIPCIÓN				DIRECCIÓN MEDIA					COINCIDENCIA			VGP					
SITIOS	Lat., N	Long., E	n	Fisher?	D	I	α_{95}	k	GAD	GAD+5%Cuad.	Fisher?	Lat., N	Long., E	α_{95}	k	Eta	Zeta
Polaridad Normal	4.93	-75.38	37	SI	3.7	5.6	4.8	25	NO	SI	NO	85.8	42.7	---	---	3.9	2.7
Polaridad Inversa	5.04	-75.37	3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Todos	4.94	-75.38	40	SI	3.7	6.4	4.6	25	NO	SI	NO	86.0	38.2	---	---	3.7	2.6

Las columnas indican, de izquierda a derecha: agrupamiento de sitios según su polaridad magnética y combinación de todos; coordenada media para cada grupo en latitud norte y longitud este; número total de sitios incluidos en las estadísticas de cada grupo (n). Conjunto de datos direccionales con distribución fisheriana o no (Fisher?); declinación (D) e inclinación (I) magnética para cada grupo calculadas a partir de la estadística de *Fisher* [1953], donde α_{95} es el radio del cono de 95% de confianza alrededor de la dirección media calculada, y k es el parámetro de concentración. Coincidencia con el GAD indica que dentro del límite de confianza del 95% (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD; coincidencia con el GAD + 5% de componente cuadrupolar indica que dentro del límite del 95% de confianza (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD + 5% de componente cuadrupolar. Conjunto de datos de polos geomagnéticos virtuales con distribución fisheriana o no (Fisher?); coordenadas de los VGP's en latitud norte y longitud este calculadas para cada grupo a partir de la estadística de *Fisher* [1953] incluyendo los parámetros α_{95} y k o a partir del método del *bootstrap* paramétrico [*Tauxe et al.*, 1991] con cuantificación de elipse de confianza con semiejes Eta y Zeta.

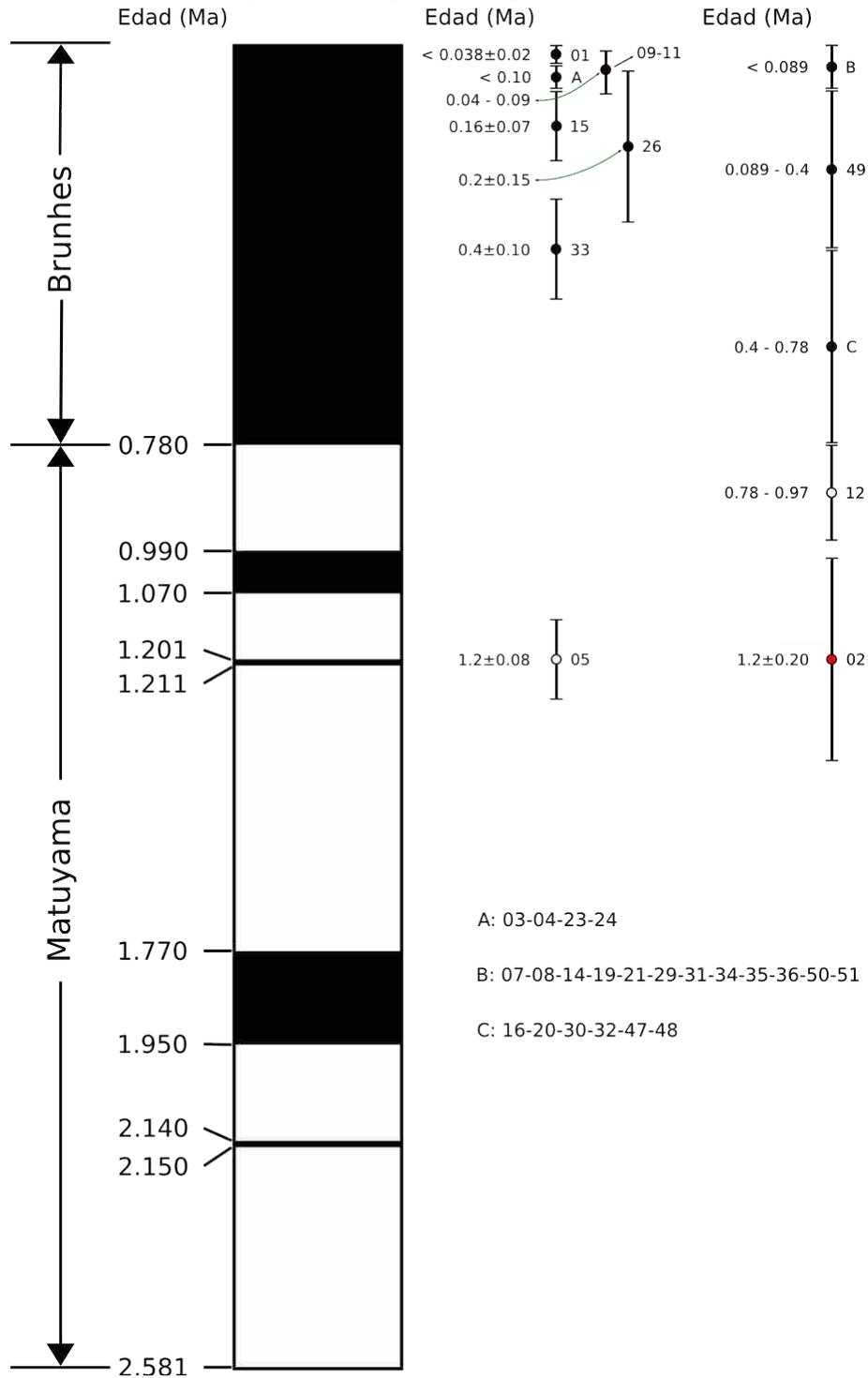
Figura 4-12: Polos virtuales geomagnéticos (VGP's), región centro-occidente.

4-12a, VGP's de los 40 sitios seleccionados luego de aplicar los criterios de selección. **4-12b**, polo paleomagnético regional, calculado para todos los sitios (sitios con polaridad normal más la antípoda de los sitios con polaridad inversa), con su elipse de confianza (en verde). Los círculos azules y rojos representan sitios con polaridad normal y polaridad inversa respectivamente. La estrella negra representa el polo magnético norte para un campo geomagnético tipo GAD, coincidente con el polo norte geográfico.

4.1.4 Correlación magnetoestratigráfica

El resultado de la correlación entre las polaridades encontradas para cada sitio, la edad absoluta o relativa reportada en la literatura consultada y la escala de tiempo de polaridad magnética (GPTS) se presenta en la Figura 4-13.

Figura 4-13: Correlación magnetoestratigráfica, región centro-occidente.



Derecha: escala de tiempo de polaridad geomagnética (GPTS) de Gee y Kent [2009]; crones y subcrone de polaridad magnética normal (inversa) en negro (blanco). Izquierda: los círculos con sombreado negro (blanco) son sitios con polaridad magnética normal (inversa), los círculos con sombreado rojo son sitios con polaridad transicional. Al frente de cada círculo se encuentra la edad radiométrica reportada en literatura o el rango de edad relativa estimada en este y otros estudios. Las barras que acompañan a cada círculo corresponden a la incertidumbre asignada a la edad.

4.2 Complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia

Se muestrearon 40 sitios cada uno correspondiente a un flujo de lava, un flujo piroclástico, o un domo asociado con los volcanes Puracé, Galeras, Cumbal, Chiles y antiguos edificios volcánicos de la región sur-occidental del país (Figuras 4-14 y 4-15), en un trabajo de campo que se realizó durante 22 días, en agosto de 2008. Del total de sitios muestreados, 13 sitios se ubican en el departamento del Cauca, y los 27 restantes en el departamento de Nariño. Los sitios muestreados variaron en un rango de altitud desde 1652 hasta 4214 m.s.n.m; la descripción detallada de cada uno de los sitios muestreados se puede observar en la Tabla 4-5.

Figura 4-14: Mapa con sitios de muestreo en el departamento del Cauca.

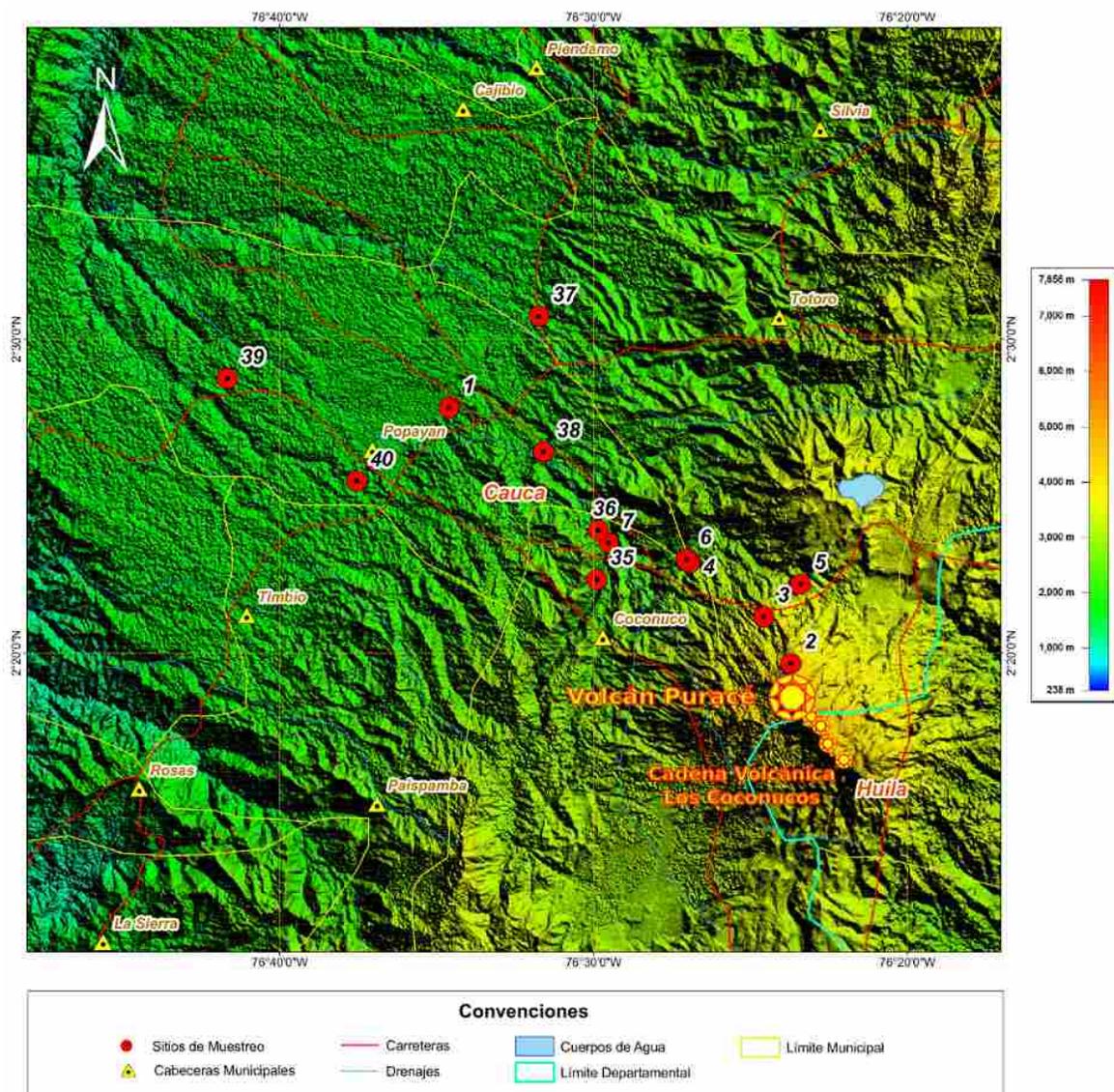
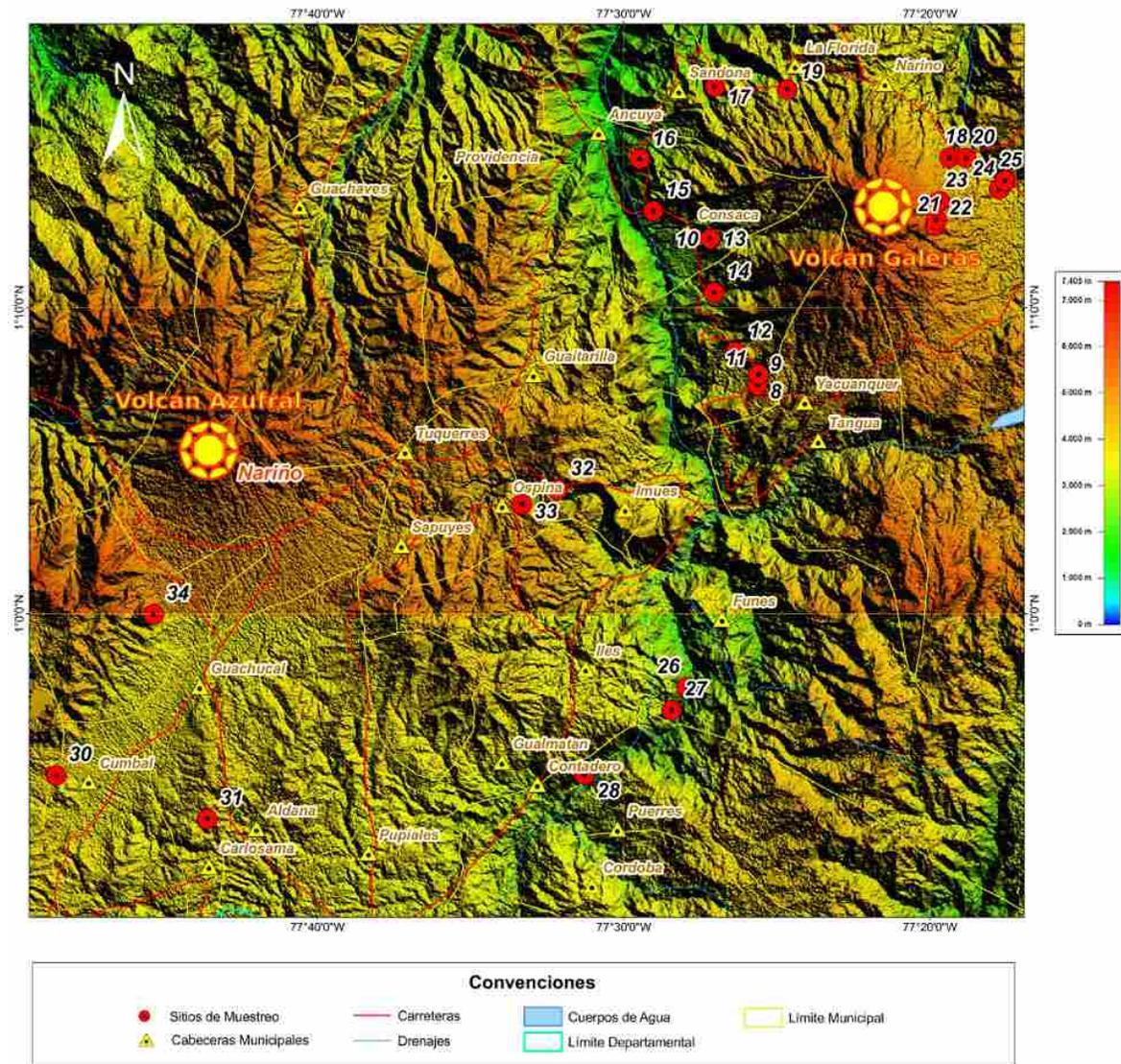


Figura 4-15: Mapa con sitios de muestreo en el volcán Galeras y altiplano Nariñense.



Un total de 408 núcleos fueron extraídos, rotulados y desmagnetizados mediante la técnica de desmagnetización progresiva por campo alterno, aplicando el tratamiento A (Tabla 2-1). Algunos especímenes tuvieron que ser sometidos a desmagnetización térmica, debido a la poca efectividad del tratamiento por campo alterno, siguiendo los pasos del tratamiento referido en la Tabla 2-2. Todo el conjunto de especímenes desmagnetizados fue procesado por el autor, en el laboratorio de paleomagnetismo y magnetismo ambiental de la Universidad de La Florida. En total se emplearon alrededor de dos meses de trabajo en el laboratorio para obtener el conjunto de datos a procesar.

Tabla 4-5: Información de los sitios muestreados en los complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia

ID	Nombre	Fuente volcánica	Secuencia	Comentarios del sitio ^a	Lat., N	Long., E	Altitud	Ref. ^b
SW01	Club campestre	Caldera de Paletará?	Julumito	[P] Ignimbrita de la Formación Popayán. Área urbana de Popayán.	2.46	-76.58	1769	1
SW02	Volcán Puracé	Volcán Puracé		[L] Ascenso a la cima del volcán.	2.33	-76.40	4214	2
SW03	Mina EmiCauca	Volcán Puracé		[L] Mina de azufre del volcán Puracé.	2.35	-76.41	3600	2
SW04	Municipio de Puracé	Volcán Puracé		[L] Vía Puracé – P.N.N. Puracé. Cerca a gobernación del cabildo indígena.	2.38	-76.45	2723	
SW05	El Azufral	Volcán Puracé		[P] Vía Puracé – Parque Nacional Natural Puracé.	2.37	-76.39	3301	
SW06	Cascada San Antonio	Volcán Puracé		[L] Municipio de Puracé, cerca a la escuela de varones.	2.38	-76.45	2685	2
SW07	Cantera	Volcán Puracé		[L] Cantera en la vía Popayán – Puracé, jurisdicción del resguardo indígena.	2.39	-76.49	2251	
SW08		Volcán Galeras	Coba Negra	[L] Dique. Circunvalar del Galeras (Yacuanquer – Consacá).	1.12	-77.43	2410	4
SW09		Volcán Galeras	Coba Negra	[P] Circunvalar del Galeras (Yacuanquer – Consacá).	1.12	-77.43	2410	4
SW10	Puente Río Azufral	Volcán Galeras		[L] Lava con líticos. Circunvalar del Galeras (Bomboná – Consacá).	1.20	-77.45	1686	
SW11		Volcán Galeras	Coba Negra	[L] Circunvalar del Galeras (Yacuanquer – Consacá).	1.13	-77.43	2420	4
SW12	Cono de escoria	Volcán Galeras	La Guaca	[L] Circunvalar del Galeras (Yacuanquer – Consacá).	1.14	-77.44	2271	4
SW13	Puente Río Azufral	Volcán Galeras	Pamba?	[L] Circunvalar del Galeras (Bomboná – Consacá).	1.20	-77.45	1686	4
SW14	Cariaco	Volcán Galeras	Pamba	[L] Circunvalar del Galeras (Yacuanquer – Bomboná).	1.18	-77.45	1707	4
SW15	Vereda El Juncal	Volcán Galeras	Pamba	[L] Circunvalar del Galeras (Consacá – Sandoná). Cantera.	1.22	-77.48	1652	4
SW16	Cruce hacia Ancuya	Volcán Galeras	Pamba	[L] Circunvalar del Galeras (Consacá – Sandoná). Cantera.	1.25	-77.49	1684	4
SW17	Santa Rosa	Volcán Galeras	Coba Negra	[L] Circunvalar del Galeras (Sandoná – La Florida).	1.29	-77.45	2000	4
SW18	Villa María	Volcán Galeras	Urcunina	[L] Circunvalar del Galeras (Genoy – Pasto).	1.25	-77.32	2538	4
SW19	Pachindo	Volcán Galeras	Genoy	[L] Circunvalar del Galeras (Sandoná - La Florida).	1.29	-77.41	2290	4
SW20		Volcán Galeras	Genoy	[L] Circunvalar del Galeras (Genoy – Pasto).	1.25	-77.31	2605	4
SW21		Volcán Galeras	Genoy	[L] Vía Pasto – Cima del volcán Galeras.	1.21	-77.33	3299	4
SW22		Volcán Galeras	Urcunina	[L] Vía Pasto – Cima del volcán Galeras.	1.21	-77.33	3261	4
SW23		Volcán Galeras	Urcunina	[L] Vía Pasto – Cima del volcán Galeras.	1.22	-77.33	3142	4
SW24	Universidad de Nariño	Volcán Galeras	Genoy	[L] Circunvalar del Galeras (Genoy - Pasto). Saliendo de Pasto. Cantera.	1.23	-77.30	2528	4
SW25		Volcán Morasurco		[L] Lavas no diferenciadas. Vía Pasto – Popayán (saliendo de Pasto).	1.24	-77.29	2555	5
SW26			Río Guáitara	[L] Andesita. Vía Pasto – Ipiales. Antes de la quebrada La Humeadora.	0.96	-77.47	2111	6

Tabla 4-5: (Continuación)

ID	Nombre	Fuente volcánica	Secuencia	Comentarios del sitio ^a	Lat., N	Long., E	Altitud	Ref. ^b
SW27	Puente Qda. La Humeadora		Río Guáitara	[L] Andesita. Vía Pasto – Ipiales. Luego de la quebrada La Humeadora.	0.95	-77.47	2224	6
SW28			Río Guáitara	[L] Andesita. Vía Pasto – Ipiales.	0.91	-77.52	2304	6
SW29		Volcán Chiles		[L] Vía de ascenso hacia el volcán Chiles.	0.85	-77.92	3878	
SW30	Cantera Machines	Volcán Cumbal	Cumbal antiguo	[L] Andesita. Oeste de la cabera municipal de Cumbal.	0.91	-77.81	3219	6
SW31			Macas	[L] Andesita. Cerca al municipio de Cumbal.	0.89	-77.73	3130	
SW32			Chirristes	[L] Andesita. Vía Pedregal – Túquerres.	1.07	-77.54	2720	6
SW33	Cantera de Ospina	Volcán Paja Blanca		[L] Andesita. Vía Túquerres – Cumbal.	1.06	-77.56	2926	6
SW34	Domo de Colimba	Domos de Colimba		[D] Cantera.	1.00	-77.76	3275	6
SW35				Vía Popayán – Coconucos.	2.37	-76.50	2236	
SW36				Vía Popayán – Puracé.	2.40	-76.50	2251	
SW37	Puente Río Palacé	Caldera de Paletará?	Julumito	[L] Ignimbrita de la Formación Popayán. Vía Popayán – Totoró.	2.51	-76.53	1854	1
SW38	Cantera Los Pinos	Caldera de Paletará?	Julumito?	[P] Ignimbrita de la Formación Popayán. Popayán. Empresa Conexpe S.A.	2.44	-76.53	2067	1
SW39		Caldera de Paletará?	Julumito	[P] Ignimbrita de la Formación Popayán. Vía Popayán – El Tambo.	2.48	-76.69	1706	1
SW40	Puente Río Hondo	Caldera de Paletará?	Julumito	[P] Ignimbrita de la Formación Popayán. Vía Popayán – Pasto.	2.42	-76.63	1712	1

Las columnas indican, de izquierda a derecha: identificación del sitio (ID); nombre asignado al sitio; fuente volcánica; secuencia; comentarios acerca del sitio; coordenadas del sitio en latitud norte y longitud este; altitud en metros sobre el nivel del mar; referencia(s) del sitio en otro(s) estudio(s).

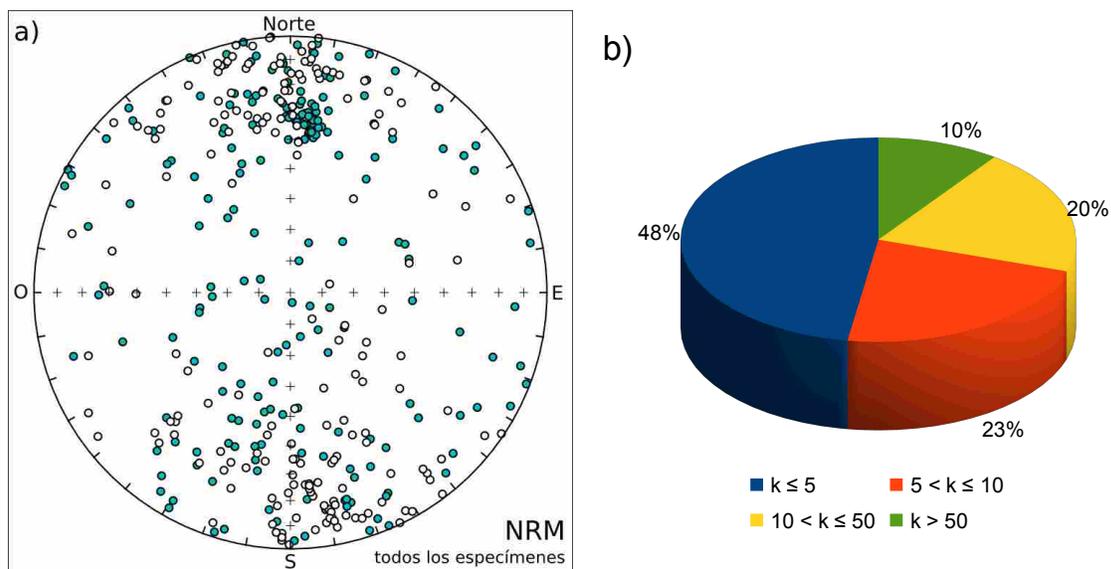
^a Comentarios del sitio: [D] domo; [L] emplazamiento de lava; [P] emplazamiento de flujo piroclástico.

^b Referencias: 1, *Torres* [1997]; 2, *Monsalve* [1991]; 3, edad de la excursión magnética Mono Lake tomada de *Laj y Channell* [2009]; 4, *Calvache V.* [1995]; 5, *Duque T. et al.* [2009]; 6, *Pinilla et al.* [2008].

4.2.1 NRM y magnetismo de rocas

De la Figura 4-16a se puede inferir la presencia de ambos tipos de polaridad magnética (normal e inversa) en los especímenes, a pesar de ser observada una dispersión media de la NRM inicial del conjunto de todos los datos analizados, aspecto que se confirma observando la distribución del estimador del parámetro de precisión, k , de la dirección media de la NRM inicial de cada uno de los sitios (Figura 4-16b).

Figura 4-16: Proyección de áreas iguales de todos los especímenes de los complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia.



A la izquierda (Figura 4-16a) la NRM inicial de todos los especímenes; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. A la derecha (Figura 4-16b), distribución del estimador del parámetro de precisión, k , de las direcciones de la NRM inicial de cada uno de los sitios.

Los valores de los parámetros magnéticos obtenidos a partir de la curva de histéresis, medida a temperatura ambiente, se presentan en la Tabla 4-6. Las muestras seleccionadas corresponden a cinco sitios que tuvieron un interés particular para la investigación: cuatro sitios fueron seleccionados al haber sido sometidos a desmagnetización térmica por presentar alta coercitividad, el quinto debido a la coloración rojiza de los núcleos. Los parámetros fueron calculados del ciclo de histéresis sin la contribución paramagnética y/o diamagnética (curva azul en la primera fila de la Figura 4-17).

Tabla 4-6: Parámetros obtenidos de la curva de histéresis de algunos sitios.

Sitio	χ_{hf}	Bc	Mr	Ms	Bcr	$\frac{Mr}{Ms}$	$\frac{Bcr}{Bc}$	Interés
	[m ³ /kg]	[mT]	[Am ² /kg]	[Am ² /kg]	[mT]			
SW01	4.89x10 ⁻⁸	70	5.74x10 ⁻²	1.72x10 ⁻¹	216	0,33	3,09	Desmagnetización térmica
SW10	1.31x10 ⁻⁷	56,5	1.24x10 ⁻²	4.34x10 ⁻²	385	0,29	6,81	Desmagnetización térmica
SW13	7.88x10 ⁻⁸	7,19	3.70x10 ⁻²	1,18	85	0,03	11,82	Desmagnetización térmica
SW29	1.06x10 ⁻⁷	5,13	1.08x10 ⁻¹	2,33	49,9	0,05	9,73	Lava de color rojizo
SW33	5.51x10 ⁻⁸	112	1.89x10 ⁻²	4.04x10 ⁻²	281	0,47	2,51	Desmagnetización térmica

Donde: χ_{hf} , susceptibilidad de campo alto; Bc , coercitividad magnética; Mr , magnetización remanente; Ms magnetización de saturación; Bcr , coercitividad magnética de remanencia.

La Figura 4-17 muestra información importante que se puede obtener a partir de las curvas de histéresis. Sólo las curvas de histéresis de los sitios SW13 y SW29 tuvieron similar comportamiento (Figura 4-17c), por lo que sólo se muestra las figuras para el sitio SW29; son: estrechas, sin constricción central, y valor bajo de coercitividad ($Bc < 10\text{ mT}$).

Figura 4-17: Comportamiento de las curvas de histéresis.

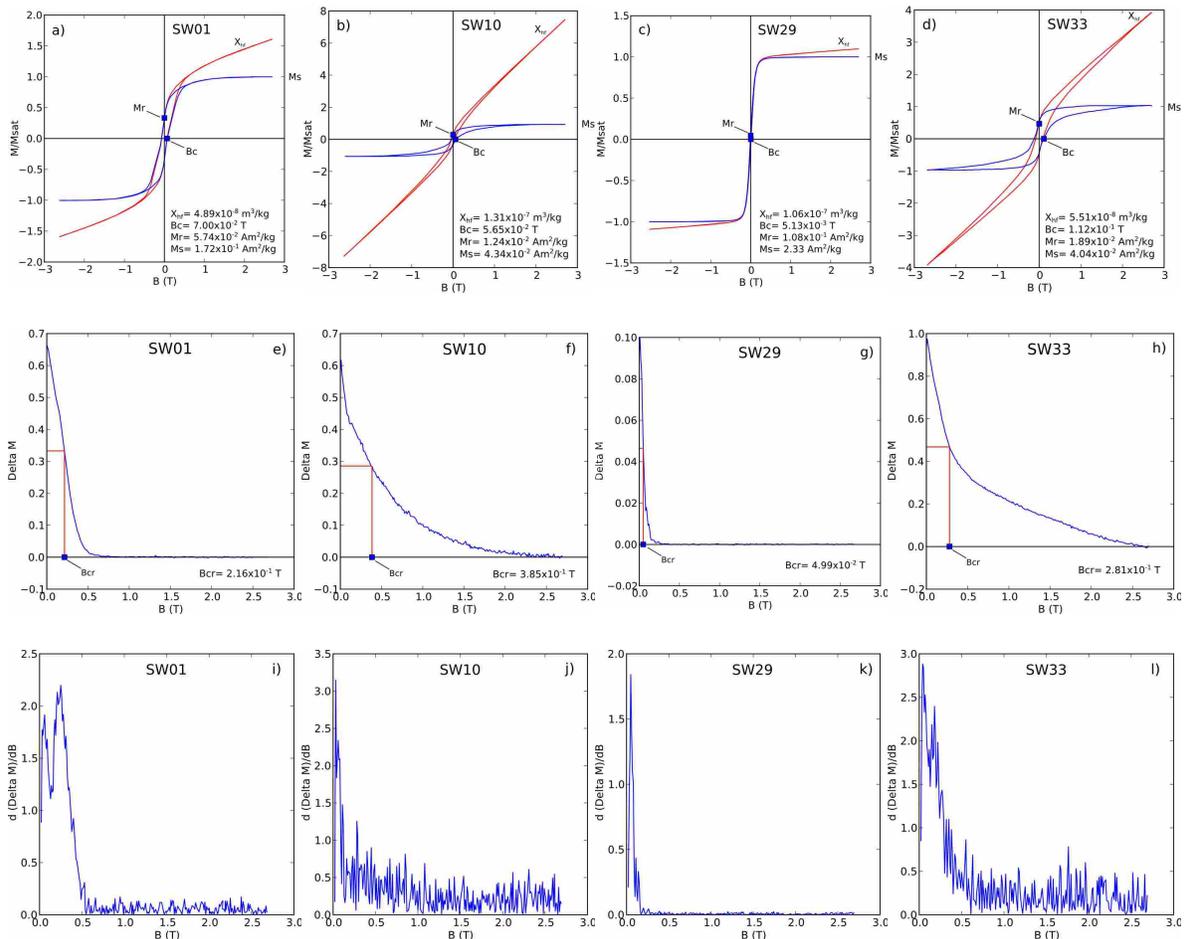
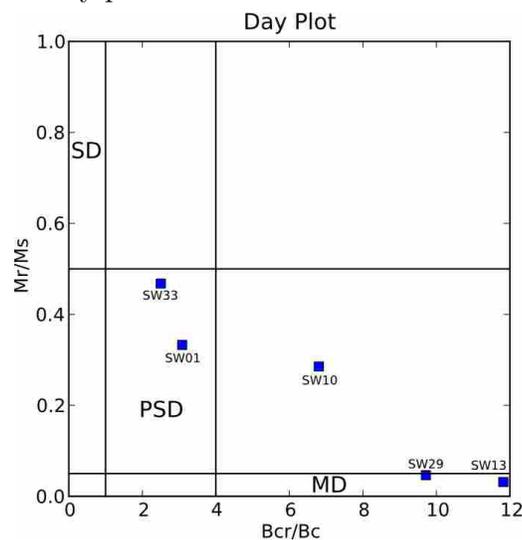


Figura 4-18: (Continuación)

Primera fila: curvas de histéresis; la curva azul es el ciclo de histéresis luego de haber sustraído la contribución paramagnética y/o diamagnética presente en la curva roja inicial. Segunda fila: curva ΔM (obtenida al sustraer el lazo ascendente del descendente en el ciclo de histéresis), usada para estimar la coercitividad de remanencia B_{cr} . Tercera fila: primera derivada de la curva de ΔM con respecto a la inducción magnética.

Los ciclos de histéresis a-b-d (Figura 4-17) presentan constricción central, las curvas no son estrechas y los valores de coercitividad medios a altos ($B_c > 50 \text{ mT}$). Este tipo de ciclos distorsionados, sugiere la presencia de dos fases magnéticas, posiblemente mezcla de magnetita y hematita, situación que es confirmada al observar dos picos máximos en los espectros de las gráficas i-j-l (Figura 4-17), un pico con coercitividad menor a 70 mT y otro con coercitividad mayor a 100 mT en términos generales.

El diagrama de Day (Figura 4-18) muestra que los minerales magnéticos de los sitios SW01 y SW33 se encuentran dentro de las celdas que caracterizan los estados magnéticos pseudo-monodominio (PSD), las muestras SW13 y SW29 en estado multidominio (MD), y la muestra SW10 indica un estado intermedio MD-SP (multidominio-superparamagnético). Se infiere un menor tamaño de grano magnético en la muestra SW33 con probable existencia de granos monodominio (SD), hipótesis que se puede apoyar en la alta coercitividad, B_c , presentada en esta muestra como se observa en la Tabla 4-6. Del diagrama de Day, también se puede concluir que las muestras SW13 y SW29 presentan un mayor tamaño de grano de minerales magnéticos y por ende su estado multi-dominio (MD). Los datos aportados por el análisis de las curvas de histéresis y del diagrama de Day, sugieren que los minerales magnéticos presentes en todas las muestras analizadas podrían ser titanomagnetitas y hematitas (excepto en la muestra SW29). El tamaño de grano y los estados magnéticos varían según la muestra.

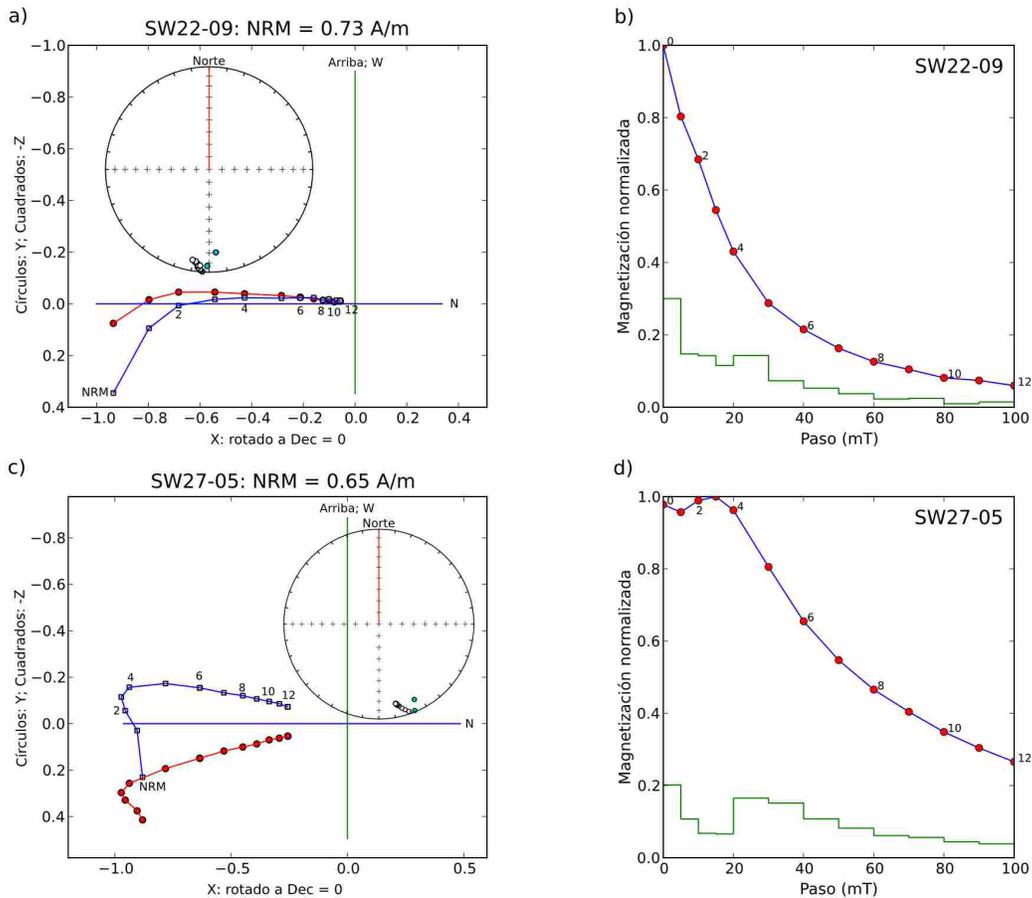
Figura 4-18: Diagrama de Day para sitios analizados.

4.2.2 Desmagnetización

Según el tipo de comportamiento durante la desmagnetización de los especímenes, se han clasificado los sitios en cuatro tipos: *tipo i*, *ii*, *iii*, *iv*.

En los sitios *tipo i* (18 sitios, un 45% del total de sitios) predominan especímenes con una NRM inicial con dispersión media, con dos componentes magnéticas (Figuras 4-19a y 4-19c), una débil (VRM) y otra fuerte (TRM). La componente viscosa fue eliminada con facilidad por campos alternos muy bajos (5-15 mT); la componente característica termorremanente, obtenida luego de eliminar la viscosa, tuvo un comportamiento direccional simple y estable, fue retirada casi en su totalidad con un campo alterno moderado (20-80 mT; Figuras 4-19b y 4-19d), sugiriendo que el portador de la magnetización sea posiblemente una titanomagnetita con bajo contenido de Titanio y de baja coercitividad.

Figura 4-19: Gráficas representativas de la desmagnetización del primer grupo de sitios.

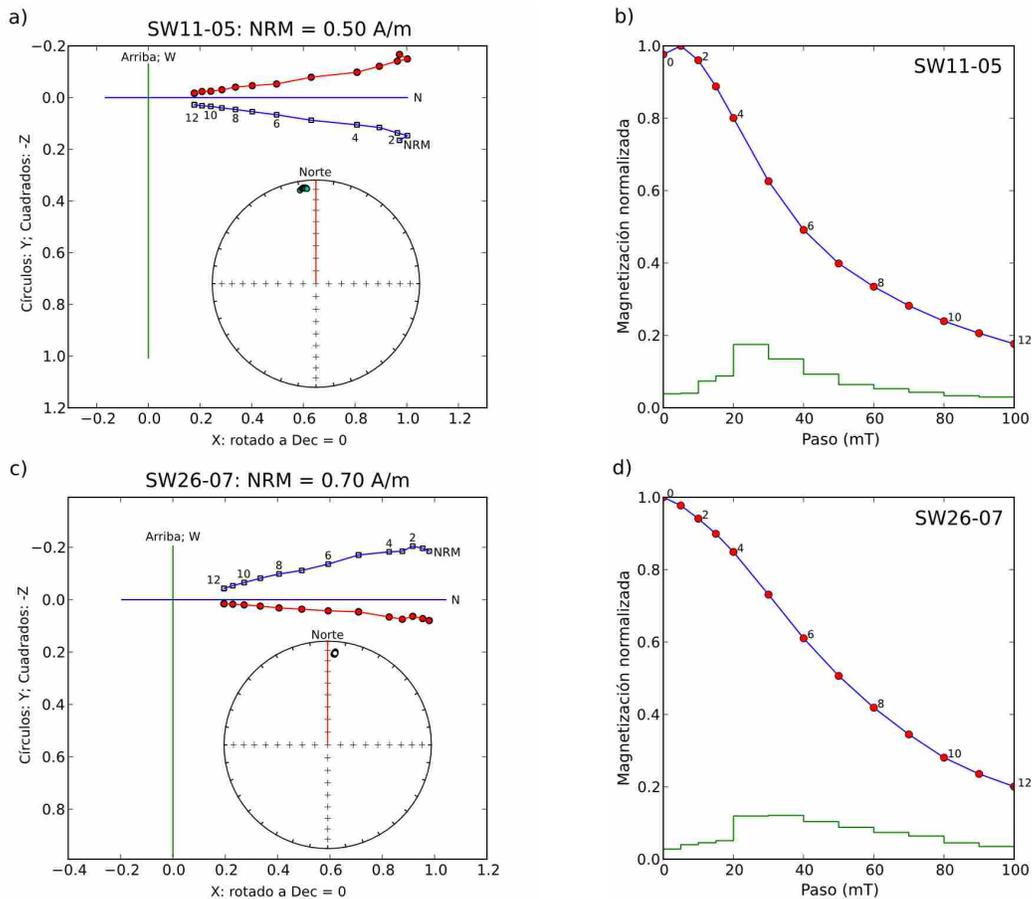


En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos; los círculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinación magnética (proyección horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinación magnética arriba o abajo de la horizontal (proyección vertical). Dentro, proyección de áreas iguales; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados

Figura 4-19: (Continuación)

por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gráficas de decaimiento de la curva de intensidad magnética normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetización aplicado.

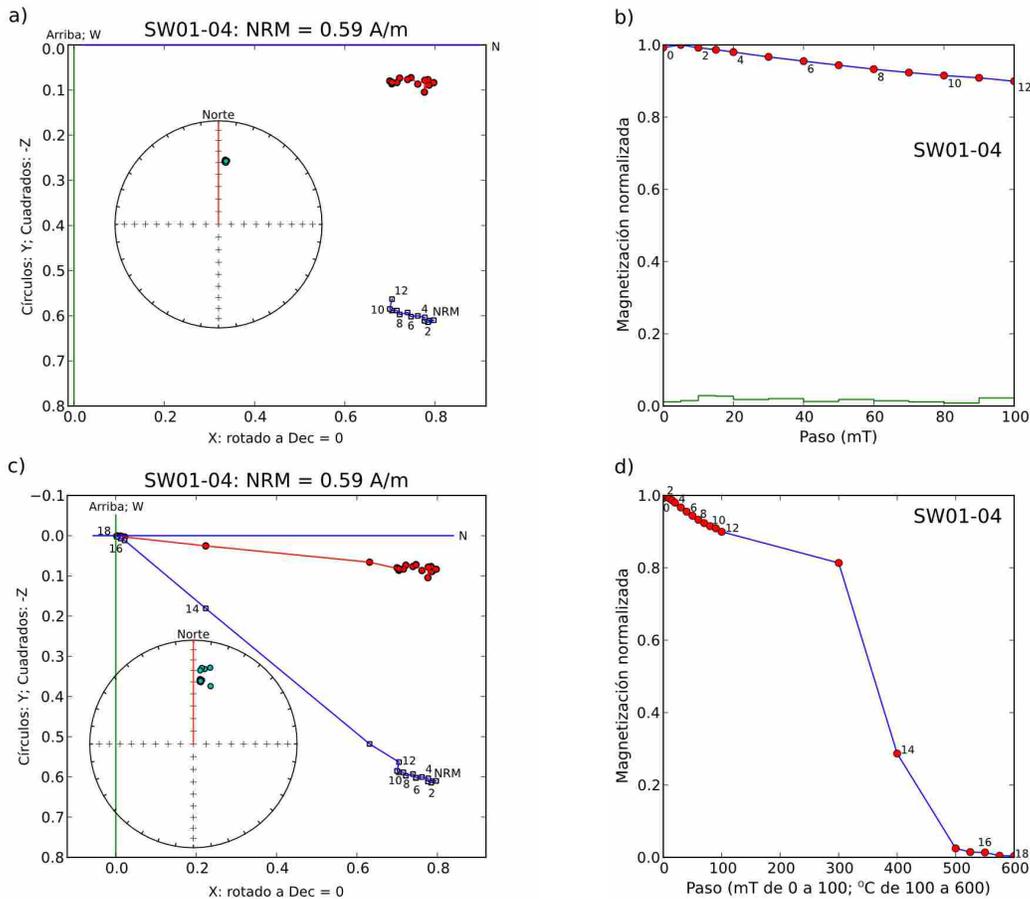
Los sitios *tipo ii* (14 sitios, un 35% del total de sitios), están conformados por especímenes que presentaron un comportamiento simple al ser desmagnetizados. La NRM estaba constituida por una única componente estable (Figura 4-20a y 4-20c) que se eliminó con facilidad y casi en su totalidad por el proceso de desmagnetización por campo alterno, con campos de 5 a 80 mT (Figura 4-20b y 4-20d). Se sugiere que la remanencia magnética está asociada a la presencia de portadores magnéticos de media coercitividad tipo titanomagnetitas con contenido medio de Titanio.

Figura 4-20: Gráficas representativas de la desmagnetización del segundo grupo de sitios.

En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos; los círculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinación magnética (proyección horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinación magnética arriba o abajo de la horizontal (proyección vertical). Dentro, proyección de áreas iguales; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gráficas de decaimiento de la curva de intensidad magnética normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetización aplicado.

Los sitios *tipo iii* (4 sitios, un 10% del total de sitios), presentaron un comportamiento caracterizado por una aún más alta coercitividad debido a su fuerte resistencia a la desmagnetización por la técnica de campo alterno (Figura 4-21a-b); el tratamiento aplicado a lo sumo removi6 el 20% de la NRM, a pesar que la magnetización inicial no es muy elevada. Por tal motivo, se decidió someter a los espec6menes de este tipo a un tratamiento adicional de desmagnetización térmica (Figura 4-21c-d), con el fin de aislar la componente característica ChRM. En unos espec6menes la NRM decay6 totalmente en un rango de temperaturas 600 a 675°C (temperatura de Curie de la hematita si Titanio), mientras que otro grupo tuvo un rango entre 475 y 575°C (temperatura de Curie de la magnetita), que respectivamente podr6an corresponder a los minerales tipo titanohematitas y titanomagnetitas como portadores de la magnetización.

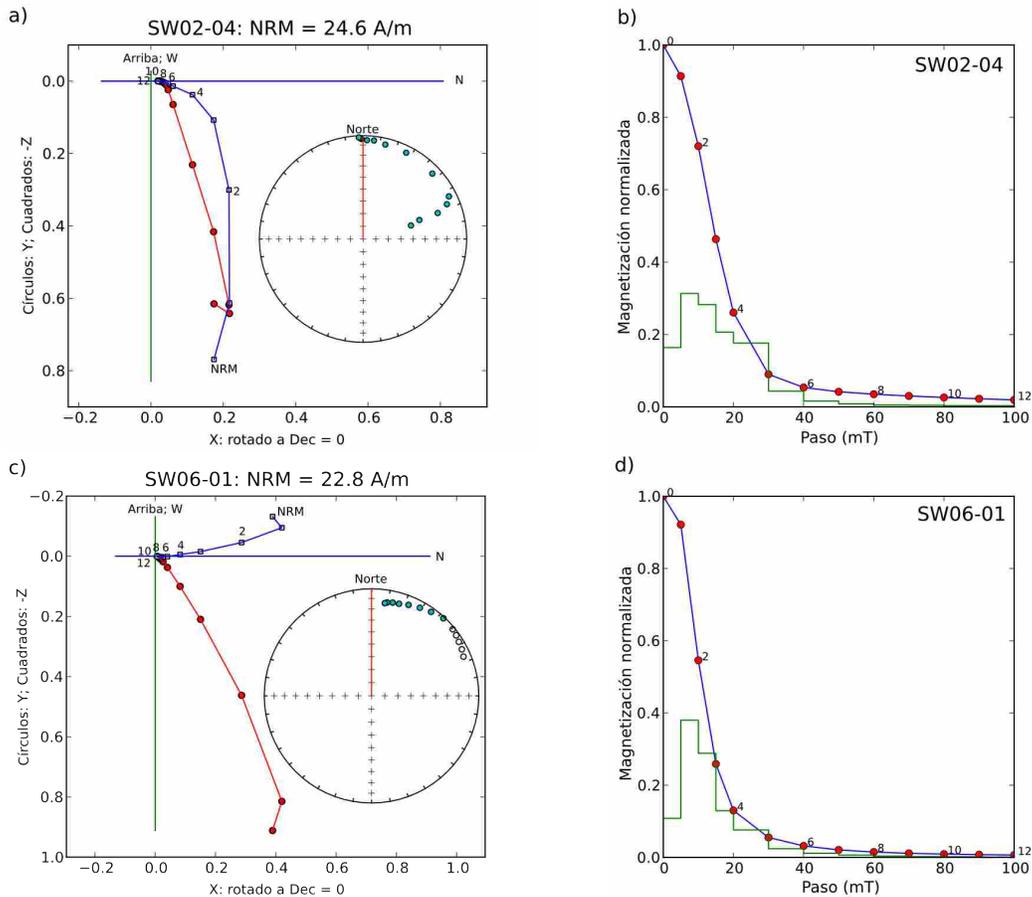
Figura 4-21: Gráficas representativas de la desmagnetización del tercer grupo de sitios.



En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de espec6menes representativos; los c6rculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinaci6n magn6tica (proyecci6n horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinaci6n magn6tica arriba o abajo de la horizontal (proyecci6n vertical). Dentro, proyecci6n de 6reas iguales; los vectores magn6ticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por c6rculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gr6ficas de decaimiento de la curva de intensidad magn6tica normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetizaci6n aplicado (s6lo campo alterno, 4-21b; campo alterno m6s térmica, 4-21d).

Los sitios *tipo iv* (4 sitios, un 10% del total de sitios) presentan especímenes con un comportamiento anómalo en la desmagnetización, caracterizados por una dispersión direccional media a alta de la NRM inicial, baja coercitividad (Figura 4-22b y 4-22d) y presencia de dos componentes magnéticas con un algún grado de solapamiento (Figura 4-22a y 4-22c). Estos sitios fueron impactados por rayos que indujeron una magnetización tipo IRM de baja coercitividad que se superpone a la componente característica ChRM de origen primario tipo TRM de mayor coercitividad.

Figura 4-22: Gráficas representativas de la desmagnetización del cuarto grupo de sitios.

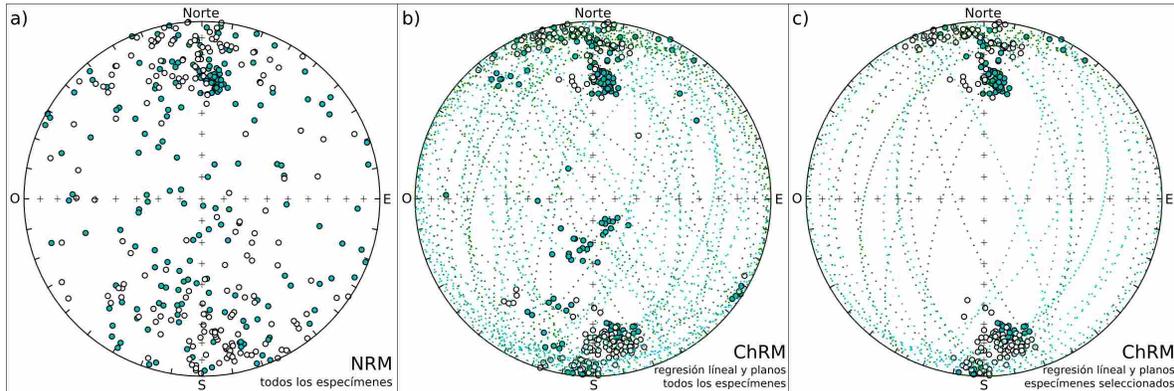


En la columna izquierda, diagramas de Zijderveld de especímenes representativos; los círculos sombreados de rojo indican el punto final del vector de declinación magnética (proyección horizontal) y los cuadrados abiertos en azul indican la inclinación magnética arriba o abajo de la horizontal (proyección vertical). Dentro, proyección de áreas iguales; los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. En la columna derecha, gráficas de decaimiento de la curva de intensidad magnética normalizada de la NRM versus tratamiento de desmagnetización aplicado.

4.2.3 Dirección paleomagnética por sitio y región, polo paleomagnético

La Figura 4-23, es un resumen gráfico de cada paso seguido en el procesamiento de los datos y del efecto de la desmagnetización, el cálculo de las direcciones de la ChRM y la selección de especímenes de acuerdo a los criterios de calidad (ítem 2.6). Se observa como la desmagnetización y el cálculo de las direcciones vectoriales de la ChRM (Figura 4-23b), han logrado reducir fuertemente la dispersión de las direcciones de la NRM inicial del conjunto de especímenes (Figura 4-23a), y de paso, agruparlas en dos sectores de acuerdo a su polaridad magnética. Con la selección de las direcciones de especímenes se llega a obtener un conjunto de datos idóneo para el posterior cálculo de las dirección vectorial media para cada sitio y para la región de estudio (Figura 4-23c).

Figura 4-23: Resumen gráfico del procesamiento de todos los especímenes.



Proyección de áreas iguales de: **4-23a**, direcciones de la NRM inicial de todos los especímenes; **4-23b**, direcciones de la ChRM de todos los especímenes, aislada mediante la línea o el plano de mejor ajuste; **4-23c**, direcciones de la ChRM de los especímenes seleccionados por tener $MAD < 5.5^\circ$, de cada sitio se excluyeron especímenes con direcciones atípicas. Los vectores magnéticos que apuntan hacia abajo y hacia arriba son representados por círculos sombreados (color cian) y no sombreados respectivamente. Las líneas punteadas representan el plano de mejor ajuste.

El resumen de los resultados paleomagnéticos para todos los sitios investigados en los complejos volcánicos del sur-occidente, una vez realizados todos los análisis de datos y aplicados los criterios de selección, esta contenido en la Tabla 4-7. Los datos presentados en la tabla demuestran que existe una distribución semejante entre sitios que tienen polaridad magnética normal y sitios que tienen polaridad magnética inversa. Gráficamente se observa dicha situación en las Figuras 4-24c y 4-26a; además, se presentan las direcciones de los sitios rechazados de acuerdo a los criterios de calidad de datos (Figura 4-24b).

Tabla 4-7: Estadísticas paleomagnéticas para cada sitio muestreado.

ID	SITIO			N	n	nl	np	P	DIRECCIÓN MEDIA				VGP		EDAD	
	Lat., N	Long., E	Subregión						D	I	α_5	k	Lat., N	Long., E	Edad (Ma)	Ref. ^d
SW01	2.46	-76.58	Cauca	10	10	10	0	N	9.1	37.6	1.3	1315	69.4	308.2	Plioceno	1
SW02	2.33	-76.40	Cauca	10	8	5	3	N	25.5	4.5	5.0	131	64.5	13.3	< 0.03	2
SW03	2.35	-76.41	Cauca	10	9	9	0	N	349.8	-2.8	3.6	208	79.1	173.5	< 0.03	2
SW04 ^b	2.38	-76.45	Cauca	12	12	8	4	N	324.4	17.8	3.6	148	54.0	205.8	0.033 ?	2, 3
SW05	2.37	-76.39	Cauca	10	10	10	0	R	171.6	-16.7	2.6	352	-79.6	50.3		
SW06	2.38	-76.45	Cauca	10	9	5	4	N	2.7	14.6	2.6	430	84.3	311.5	< 0.03	2
SW07	2.39	-76.49	Cauca	11	10	10	0	R	174.2	-20.3	4.1	139	-80.1	68.3		
SW08 ^a	1.12	-77.43	Nariño	11	11	10	1		189.2	-10.6	5.8	64			0.288 a 0.793	4
SW09 ^a	1.12	-77.43	Nariño	10	6	3	3		193.9	6.7	10.9	44			0.288 a 0.793	4
SW10 ^a	1.20	-77.45	Nariño	10	6	6	0		226.8	50.1	86.6	2				
SW11	1.13	-77.43	Nariño	10	10	8	2	N	355.8	6.5	2.1	534	85.3	219.6	0.288 a 0.793	4
SW12	1.14	-77.44	Nariño	10	10	9	1	N	2.6	-3.2	2.6	362	86.2	59.1	0.166 ± 0.034	4
SW13 ^b	1.20	-77.45	Nariño	11	10	10	0	T	146.8	75.9	2.7	332	-20.9	297.8	0.793 a 1.1	4
SW14 ^b	1.18	-77.45	Nariño	11	7	5	2	R	219.7	-28.1	3.2	386	-48.5	171.1	0.793 a 1.1	4
SW15 ^a	1.22	-77.48	Nariño	8	7	7	0		199.8	33.7	6.5	89			0.793 a 1.1	4
SW16 ^b	1.25	-77.49	Nariño	11	11	11	0	R	196.1	65.9	2.8	261	-38.6	268.8	0.793 a 1.1	4
SW17	1.29	-77.45	Nariño	11	10	9	1	N	2.9	20.4	4.2	132	80.3	299.7	0.288 a 0.793	4
SW18	1.25	-77.32	Nariño	10	8	6	2	R	183.7	2.9	2.0	790	-85.4	228.8	0.013 a 0.028	4
SW19 ^a	1.29	-77.41	Nariño	10	8	8	0		354.9	9.8	8.8	41			0.031 a 0.159	4
SW20	1.25	-77.31	Nariño	10	9	9	0	N	340.6	-3.2	4.0	165	70.4	184.4	0.031 a 0.159	4
SW21	1.21	-77.33	Nariño	10	10	10	0	N	10.6	-14.5	1.9	657	76.4	51.9	0.031 a 0.159	4
SW22	1.21	-77.33	Nariño	10	10	10	0	R	184.3	-6.9	2.8	292	-85.2	165.0	0.013 a 0.028	4
SW23	1.22	-77.33	Nariño	10	10	9	1	N	341.9	-7.5	2.3	433	71.2	177.2	0.013 a 0.028	4
SW24	1.23	-77.30	Nariño	10	10	10	0	R	165.7	21.7	2.0	590	-71.1	331.0	0.031 a 0.159	4
SW25	1.24	-77.29	Nariño	10	9	8	1	R	178.7	-4.4	2.5	432	-88.4	49.4	1.60 a 1.95	5
SW26	0.96	-77.47	Nariño	10	9	9	0	N	4.2	-14.0	1.8	832	80.9	75.1	4.2 a 4.6 ?	6
SW27	0.95	-77.47	Nariño	10	10	10	0	R	165.4	-16.0	2.2	504	-73.8	39.3	4.2 a 4.6 ?	6
SW28	0.91	-77.52	Nariño	12	12	12	0	N	355.6	-32.0	4.2	106	71.2	115.6	4.2 a 4.6 ?	6
SW29 ^{a,c}	0.85	-77.92	Nariño	10	4	2	2		340.9	-5.6	12.5	74				
SW30	0.91	-77.81	Nariño	10	10	10	0	N	354.4	-8.0	2.0	572	82.5	150.8	4.6 ?	6
SW31 ^b	0.89	-77.73	Nariño	10	8	7	1	T	122.4	1.0	3.1	335	-32.4	11.1		
SW32	1.07	-77.54	Nariño	10	10	10	0	R	170.5	26.7	2.5	370	-72.1	313.9	4.2 a 4.6 ?	6
SW33	1.06	-77.56	Nariño	11	11	11	0	R	178.7	-29.0	4.8	91	-75.5	97.4	< 4.6 ?	6
SW34	1.00	-77.76	Nariño	9	9	7	2	R	168.7	-13.1	3.6	217	-77.4	39.1	1.4 a 1.8	6
SW35 ^a	2.37	-76.50	Cauca	10	5	4	1		333.2	0.0	9.3	73				
SW36	2.40	-76.50	Cauca	10	6	6	0	R	174.6	-20.0	4.9	186	-80.4	69.6		
SW37	2.51	-76.53	Cauca	10	10	10	0	N	2.4	35.4	2.0	593	72.8	291.1	Plioceno	1
SW38	2.44	-76.53	Cauca	10	8	8	0	R	174.8	-17.7	4.3	169	-81.6	65.7	Pleistoceno?	1
SW39	2.48	-76.69	Cauca	10	10	10	0	N	7.2	33.9	1.8	740	72.4	306.5	Plioceno	1
SW40	2.42	-76.63	Cauca	8	8	8	0	N	3.7	29.4	1.9	845	76.2	298.5	Plioceno	1

Las columnas indican, de izquierda a derecha: identificación del sitio (ID); coordenadas del sitio en latitud norte y longitud este, subregión de estudio (Cauca o Nariño); número total de especímenes desmagnetizados por cada sitio (N); número total de especímenes incluidos en las estadísticas de cada sitio (n); número total de

Tabla 4-7: (Continuación)

líneas de mejor ajuste (nl) y número de planos de mejor ajuste (np) para los especímenes incluidos en la media del sitio; polaridad magnética del sitio (P) indicada por las letras N (normal), R (inversa) y T (transicional); declinación (D) e inclinación (I) magnética para cada sitio calculadas a partir de la estadística de *Fisher* [1953] o por el análisis de círculos máximos de remagnetización [McFadden y McElhinny, 1988], donde α_{95} es el radio del cono de 95% de confianza alrededor de la dirección media calculada, y k es el parámetro de concentración; coordenadas de los VGP's en latitud norte y longitud este; edad (o intervalo de edad) del sitio y referencia.

^a Sitios rechazados para el cálculo de la dirección media final por tener $\alpha_{95} > 5.49^\circ$.

^b Sitios rechazados para el cálculo de la dirección media final al ser considerados de polaridad transicional según el criterio de corte de *Vandamme* [1994].

^c Sitios rechazados para el cálculo de la dirección media final por tener $n < 5$.

^d Referencias: 1, *Torres* [1997]; 2, *Monsalve* [1991]; 3, edad de la excursión magnética Mono Lake tomada de *Laj y Channell* [2009]; 4, *Calvache* [1995]; 5, *Duque et al.* [2009]; 6, *Pinilla et al.* [2008].

De los 40 sitios muestreados, 28 pasaron los criterios de selección y fueron tenidos en cuenta para el cálculo de la dirección paleomagnética media; 12 sitios fueron rechazados por diferentes motivos: siete sitios tienen un cono de confianza $\alpha_{95} > 5.49^\circ$; cinco sitios fueron catalogados como transicionales luego de aplicar el criterio de corte de *Vandamme*.

La dirección paleomagnética media regional fue calculada empleando el método de *bootstrap* paramétrico [*Tauxe et al.*, 1991] para sitios con polaridad normal y polaridad inversa (Figura 4-24d), y estadística fisheriana para todos los sitios (Figura 4-25a). La dirección media regional combinada fue comparada con la dirección esperada del GAD, y con el IGRF calculado para agosto del año 2008 (Figura 4-25b). La gráfica de los VGP's calculados para los 28 sitios se puede observar en la Figura 4-26a.

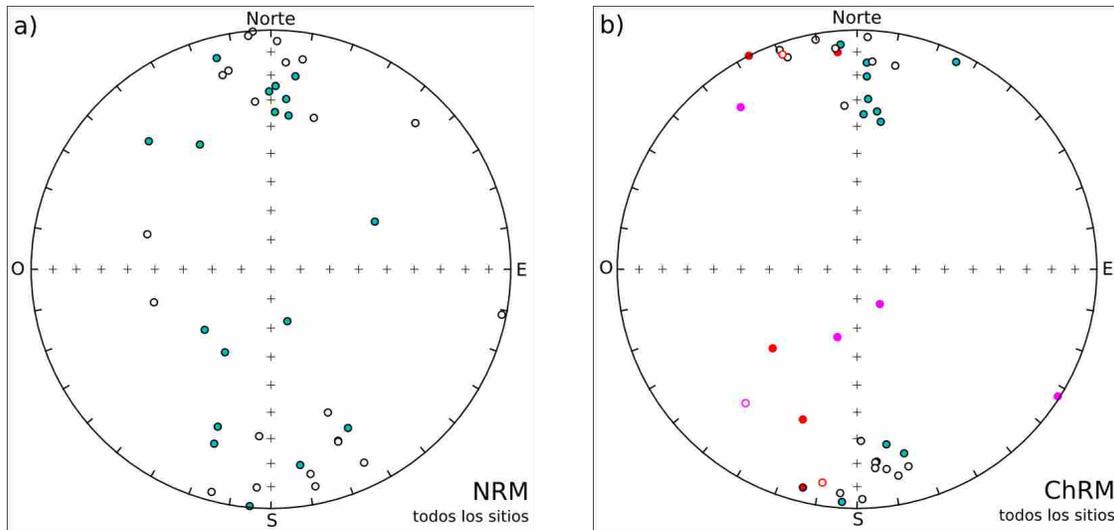
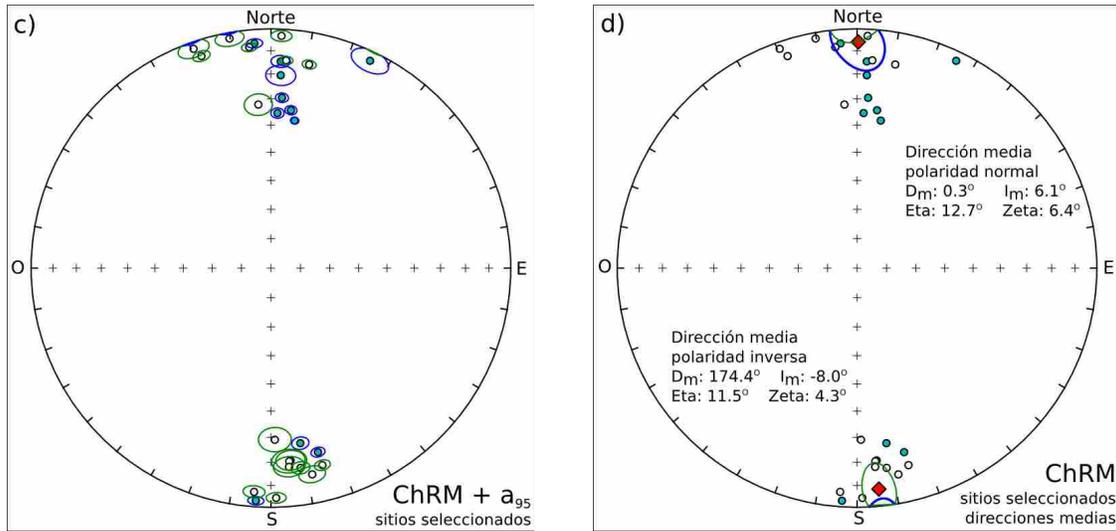
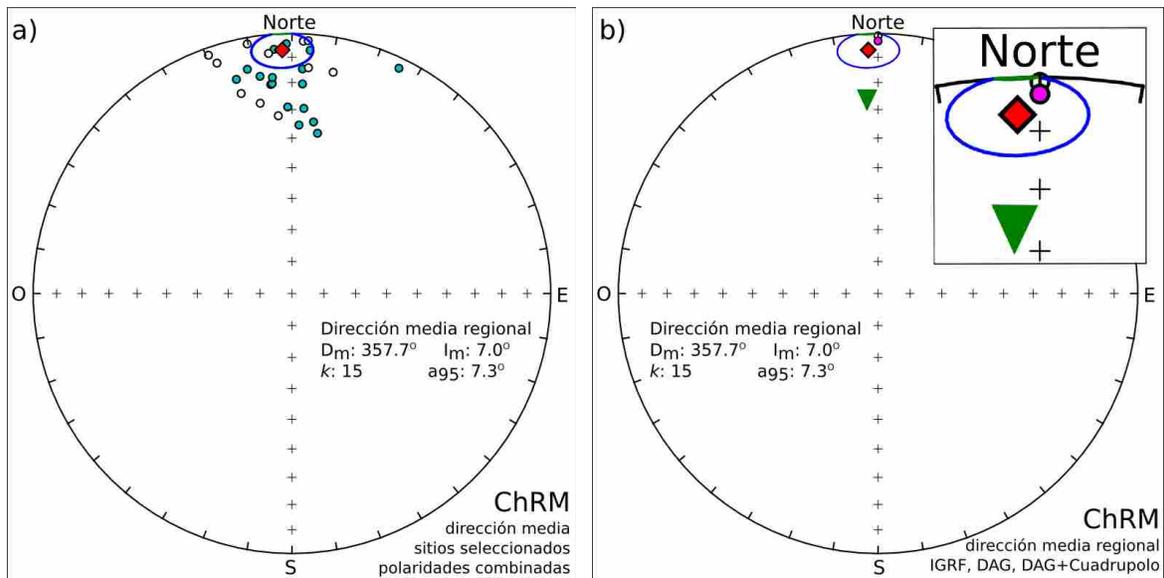
Figura 4-24: Resumen gráfico del procesamiento de todos los sitios.

Figura 4-24: (Continuación)



Proyección de áreas iguales. 4-24a, dirección de la NRM inicial calculada para todos los sitios. 4-24b, direcciones de la ChRM de todos los sitios, determinadas utilizando estadística fisheriana o análisis de círculos máximos de remagnetización; los círculos rojos corresponden a sitios rechazados por tener conos de confianza $\alpha_{95} > 5.49^\circ$; los círculos magenta corresponden a sitios rechazados por el criterio de corte de *Vandamme*. 4-24c, direcciones de la ChRM de los sitios seleccionados con sus conos del 95% de confianza (elipse azul o verde, según si el vector magnético apunta hacia abajo o hacia arriba respectivamente). 4-24d, direcciones de la ChRM de los sitios y dirección media regional para polaridad normal e inversa (diamantes en rojo) con su elipse de confianza (de color azul y verde), calculada con el método de bootstrap paramétrico. Cada sitio corresponde a un vector magnético que apunta hacia abajo o hacia arriba, representado por un círculo sombreado (color cian) o no sombreado respectivamente.

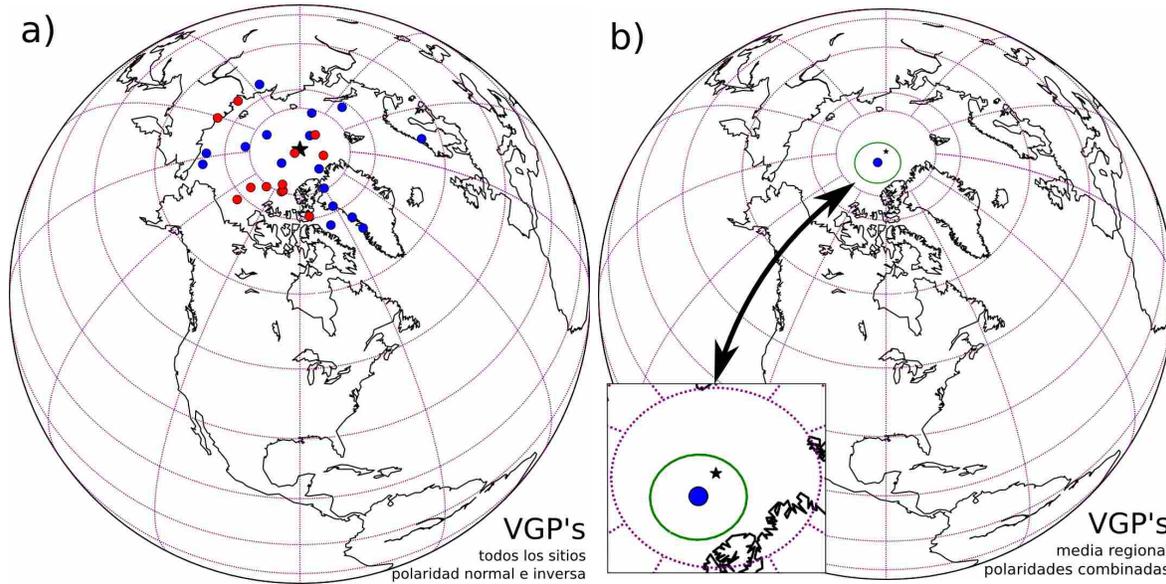
Figura 4-25: Dirección paleomagnética media calculada, región sur-occidente.



Proyección de áreas iguales. 4-25a, direcciones de la ChRM de los sitios y dirección media regional (diamante rojo) para todos los sitios (combinación de sitios con polaridad normal con la antípoda de sitios con polaridad inversa) con su cono al 95% de confianza (elipse azul); cada sitio corresponde a un vector magnético que apunta hacia abajo o hacia arriba, representado por un círculo sombreado (color cian) o no sombreado ...

Figura 4-25: (Continuación)

respectivamente. **4-25b**, comparación de la dirección media regional (diamante rojo) y su cono al 95% de confianza (elipse azul) con la dirección esperada del GAD (círculo magenta), con la dirección esperada del GAD más 5% de cuadrupolo axial geocéntrico (círculo sin sombreado), y con el IGRF calculado para el mes de agosto del año 2008 en la región de estudio (triángulo hacia abajo de color verde).

Figura 4-26: Polos virtuales geomagnéticos (VGP's) calculados para la región de estudio.

4-26a, VGP's de los 28 sitios seleccionados luego de aplicar los criterios de selección. **4-26b**, dirección media regional del VGP's para polaridad combinada (sitios con polaridad normal más la antípoda de los sitios con polaridad inversa) con su cono al 95% de confianza (elipse verde). Los círculos azules y rojos representan sitios con polaridad normal y polaridad inversa respectivamente. La estrella negra representa el polo magnético norte para un campo geomagnético tipo GAD, coincidente con el polo norte geográfico.

La Tabla 4-8 resume la dirección media regional y su correspondiente polo paleomagnético, calculados para todos los sitios y entre grupos de sitios según su polaridad magnética.

4.2.4 Correlación magnetoestratigráfica

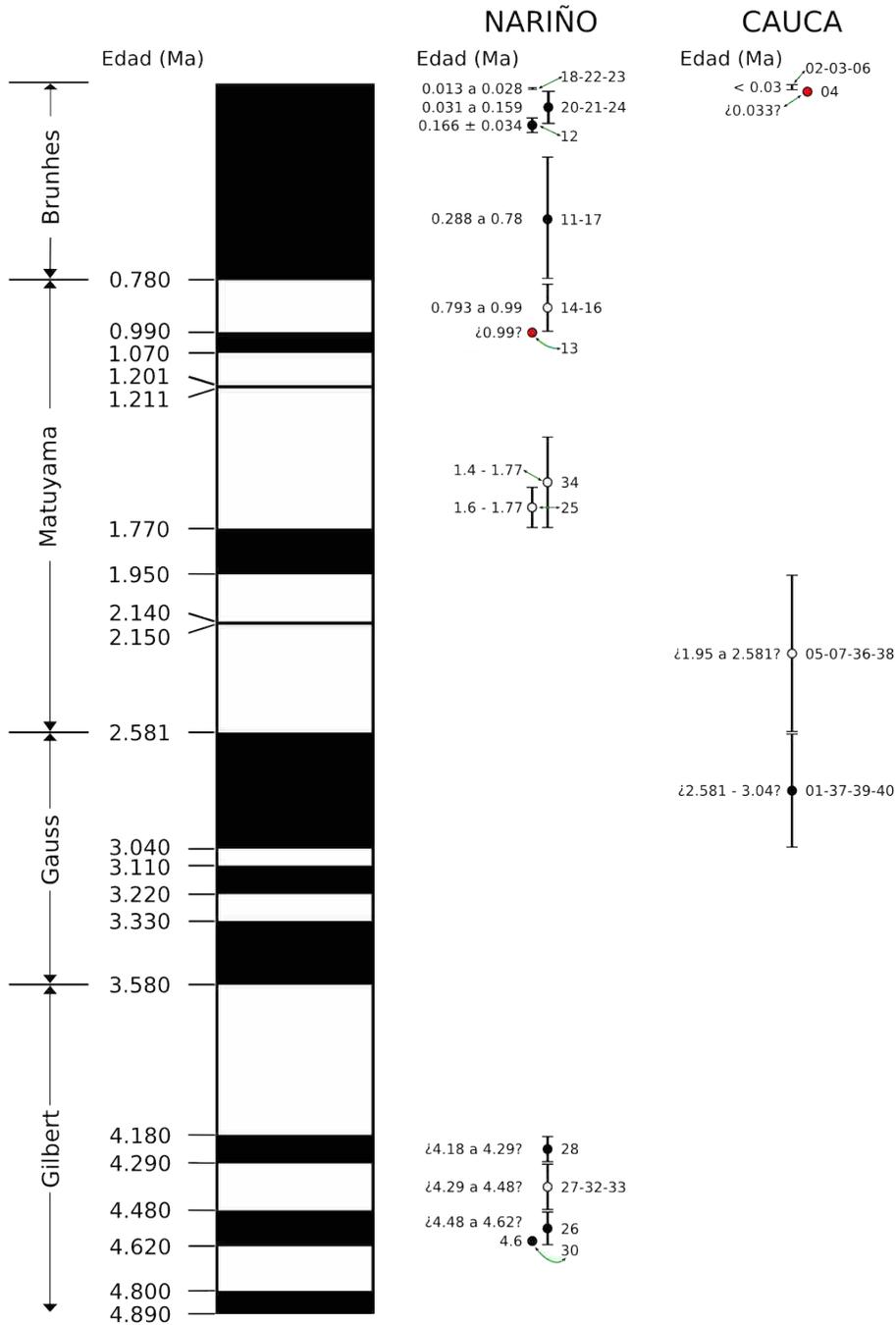
El resultado de la correlación entre las polaridades encontradas para cada sitio, la edad absoluta o relativa reportada en la literatura consultada y la escala de tiempo de polaridad magnética (GPTS) se presenta en la Figura 4-27.

Tabla 4-8: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para los complejos volcánicos de sur-occidente de Colombia.

DESCRIPCIÓN				DIRECCIÓN MEDIA							COINCIDENCIA			VGP			
SITIOS	Lat., N	Long., E	n	Fisher?	D	I	α_{95}	k	Eta	Zeta	GAD	GAD+5%Cuad.	Fisher?	Lat., N	Long., E	α_{95}	k
Polaridad Normal	1.48	-77.23	16	NO	0.3	6.1	---	---	12.7	6.4	SI	SI	SI	88.2	300.4	7.1	28
Polaridad Inversa	1.55	-77.12	12	NO	174.3	-8.0	---	---	11.5	4.3	NO	NO	SI	-83.8	36.2	5.8	57
Todos	1.63	-77.08	28	SI	357.7	7.0	7.3	15	---	---	SI	NO	SI	87.0	236.2	4.6	35

Las columnas indican, de izquierda a derecha: agrupamiento de sitios según su polaridad magnética y combinación de todos; coordenada media para cada grupo en latitud norte y longitud este; número total de sitios incluidos en las estadísticas de cada grupo (n). Conjunto de datos direccionales con distribución fisheriana o no (Fisher?); declinación (D) e inclinación (I) magnética para cada grupo calculadas a partir de la estadística de *Fisher* [1953] o a partir del método del *bootstrap* paramétrico [*Tauxe et al.*, 1991], donde α_{95} es el radio del cono de 95% de confianza alrededor de la dirección media calculada, k es el parámetro de concentración, Eta y Zeta son los semiejes de la elipse de confianza calculada por el método *bootstrap*. Coincidencia con el GAD indica que dentro del límite de confianza del 95% (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD; coincidencia con el GAD + 5% de componente cuadrupolar indica que dentro del límite del 95% de confianza (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD + 5% de componente cuadrupolar. Conjunto de datos de polos geomagnéticos virtuales con distribución fisheriana o no (Fisher?); coordenadas de los VGP's en latitud norte y longitud este calculadas para cada grupo a partir de la estadística de *Fisher* [1953] incluyendo los parámetros α_{95} y k .

Figura 4-27: Correlación magnetoestratigráfica, región sur-occidente.



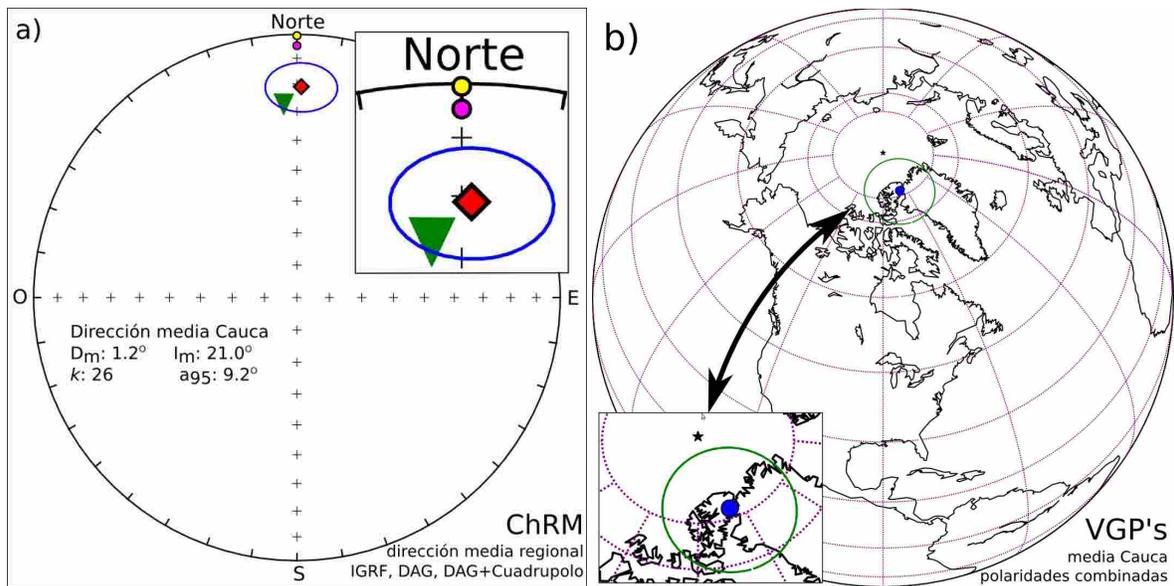
Derecha: escala de tiempo de polaridad geomagnética (GPTS) de Gee y Kent [2009]; cronos y subcronos de polaridad magnética normal (inversa) en negro (blanco). Izquierda: los círculos con sombreado negro (blanco) son sitios con polaridad magnética normal (inversa), los círculos con sombreado rojo son sitios con polaridad transicional. Al frente de cada círculo se encuentra la edad radiométrica reportada en literatura o el rango de edad relativa estimada en este y otros estudios. Las barras que acompañan a cada círculo corresponden a la incertidumbre asignada a la edad.

4.3 Complejos volcánicos del sur-occidente: Cauca y Nariño

4.3.1 Departamento del Cauca

La dirección media fue calculada para 11 sitios seleccionados según los criterios de calidad (Figura 4-27a), de un total de 13 sitios muestreados en el departamento del Cauca. En la Tabla 4-7 se observan los sitios seleccionados y rechazados para la subregión caucana. En la tabla 4-9 se presentan las direcciones promedio calculadas.

Figura 4-28: Dirección paleomagnética media calculada para la subregión Cauca.



4-28a, proyección de áreas iguales para la comparación de la dirección media regional (diamante rojo) y su cono al 95% de confianza (elipse azul), con la dirección esperada del GAD (círculo magenta), con la dirección esperada del GAD más 5% de cuadrupolo axial geocéntrico (círculo amarillo), y con el IGRF calculado para el año 2009 en la región de estudio (triángulo hacia abajo de color verde). **4-28b**, dirección media regional del VGP's para polaridad combinada (sitios con polaridad normal más la antípoda de los sitios con polaridad inversa) con su cono al 95% de confianza (elipse verde). La estrella negra representa el polo magnético norte para un campo geomagnético tipo GAD, coincidente con el polo norte geográfico.

Tabla 4-9: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para los complejos volcánicos de la subregión Cauca.

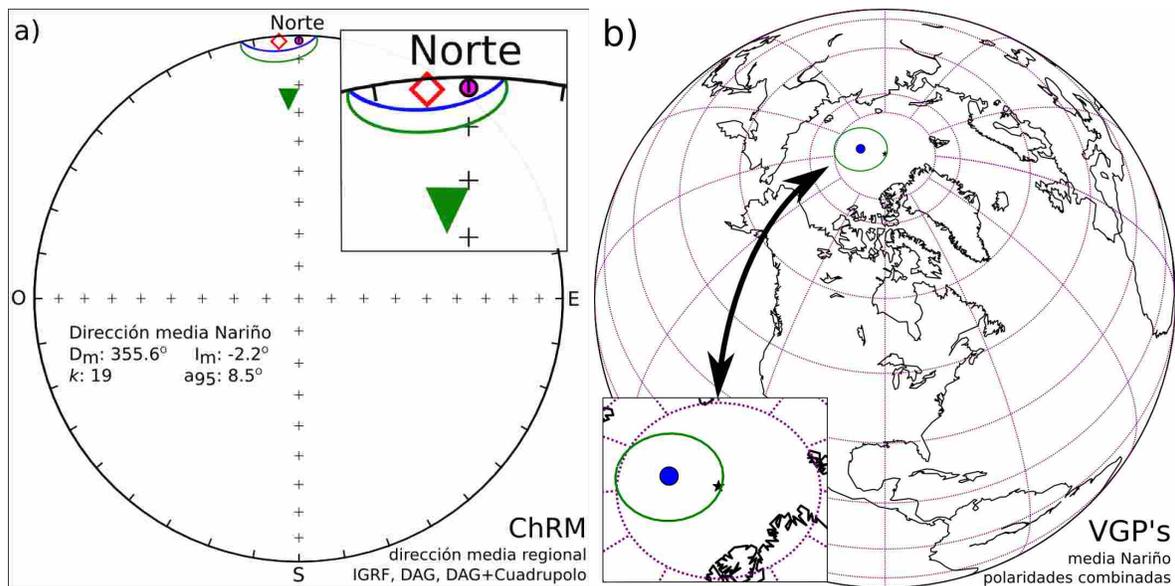
DESCRIPCIÓN				DIRECCIÓN MEDIA					COINCIDENCIA			VGP			
SITIOS	Lat., N	Long., E	n	Fisher?	D	I	α_{95}	k	GAD	GAD+5%Cuad.	Fisher?	Lat., N	Long., E	α_{95}	k
Polaridad Normal	2.47	-76.62	7	---	5.7	22.2	14.7	18	NO	NO	---	78.8	313.6	10.5	34
Polaridad Inversa	2.40	-76.48	4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Todos	2.41	-76.51	11	SI	1.2	21.0	9.2	26	NO	NO	SI	81.1	291.8	7.0	43

Las columnas indican, de izquierda a derecha: agrupamiento de sitios según su polaridad magnética y combinación de todos; coordenada media para cada grupo en latitud norte y longitud este; número total de sitios incluidos en las estadísticas de cada grupo (n). Conjunto de datos direccionales con distribución fisheriana o no (Fisher?); declinación (D) e inclinación (I) magnética para cada grupo calculadas a partir de la estadística de *Fisher* [1953], donde α_{95} es el radio del cono de 95% de confianza alrededor de la dirección media calculada, k es el parámetro de concentración. Coincidencia con el GAD indica que dentro del límite de confianza del 95% (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD; coincidencia con el GAD + 5% de componente cuadrupolar indica que dentro del límite del 95% de confianza (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD + 5% de componente cuadrupolar. Conjunto de datos de polos geomagnéticos virtuales con distribución fisheriana o no (Fisher?); coordenadas de los VGP's en latitud norte y longitud este calculadas para cada grupo a partir de la estadística de *Fisher* [1953] incluyendo los parámetros α_{95} y k .

4.3.2 Departamento de Nariño

La dirección media fue calculada para 17 sitios seleccionados según los criterios de calidad, de un total de 27 sitios muestreados en el departamento de Nariño. En la Tabla 4-7 se observan los sitios seleccionados y rechazados para la subregión nariñense. En la tabla 4-10 se presentan las direcciones promedio calculadas.

Figura 4-29: Dirección paleomagnética media calculada para la subregión Nariño.



4-29a, proyección de áreas iguales para la comparación de la dirección media regional (diamante blanco con borde rojo) y su cono al 95% de confianza (elipse azul y verde), con la dirección esperada del GAD (círculo magenta), con la dirección esperada del GAD más 5% de cuadrupolo axial geocéntrico (círculo blanco, no visible porque esta ubicado detrás del círculo magenta), y con el IGRF calculado para el mes de agosto del año 2008 en la región de estudio (triángulo hacia abajo de color verde). **4-29b**, dirección media regional del VGP para polaridad combinada (sitios con polaridad normal más la antípoda de los sitios con polaridad inversa) con su cono al 95% de confianza (elipse verde). La estrella negra representa el polo magnético norte para un campo geomagnético tipo GAD, coincidente con el polo norte geográfico.

Tabla 4-10: Promedio general de las estadísticas paleomagnéticas para los complejos volcánicos de la subregión Nariño.

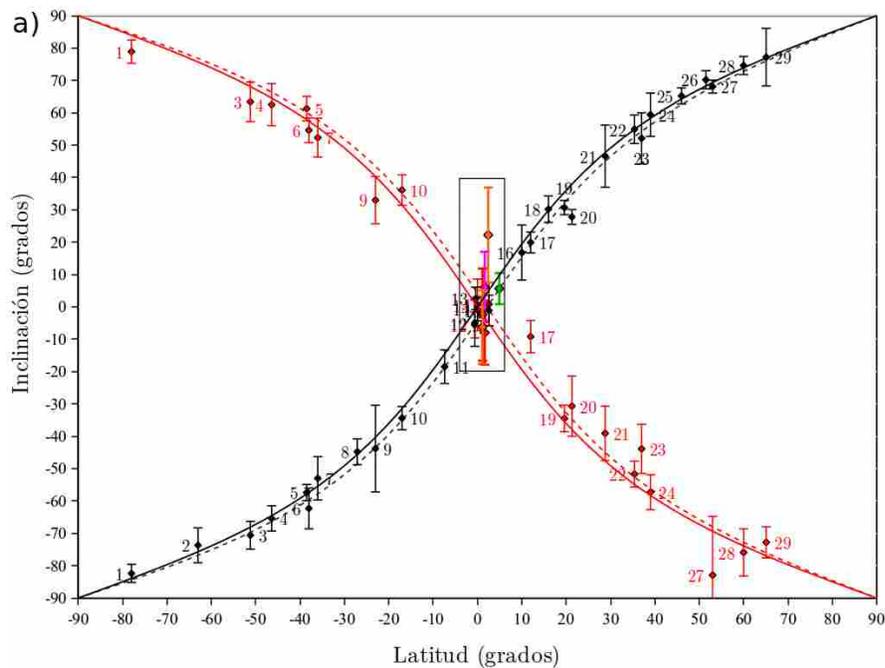
DESCRIPCIÓN				DIRECCIÓN MEDIA					COINCIDENCIA			VGP					
SITIOS	Lat., N	Long., E	n	Fisher?	D	I	α_{95}	k	GAD	GAD+5%Cuad.	Fisher?	Lat., N	Long., E	α_{95}	k	Eta	Zeta
Polaridad Normal	1.11	-77.46	9	---	356.4	-6.3	11.4	21	SI	SI	---	84.4	141.1	---	---	5.9	7.9
Polaridad Inversa	1.13	-77.45	8	---	174.6	-2.4	14.2	16	SI	SI	---	-84.5	12.8	---	---	5.9	8.5
Todos	1.12	-77.45	17	SI	355.6	-2.2	8.5	19	SI	SI	NO	85.0	165.1	---	---	5.3	5.0

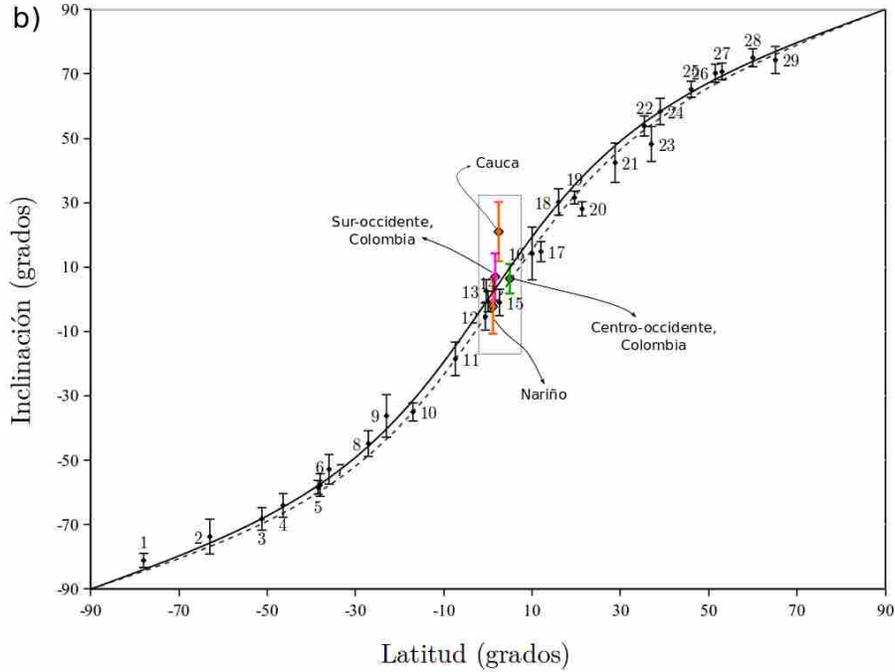
Las columnas indican, de izquierda a derecha: agrupamiento de sitios según su polaridad magnética y combinación de todos; coordenada media para cada grupo en latitud norte y longitud este; número total de sitios incluidos en las estadísticas de cada grupo (n). Conjunto de datos direccionales con distribución fisheriana o no (Fisher?); declinación (D) e inclinación (I) magnética para cada grupo calculadas a partir de la estadística de *Fisher* [1953], donde α_{95} es el radio del cono de 95% de confianza alrededor de la dirección media calculada, k es el parámetro de concentración. Coincidencia con el GAD indica que dentro del límite de confianza del 95% (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD; coincidencia con el GAD + 5% de componente cuadrupolar indica que dentro del límite del 95% de confianza (α_{95}) la dirección media calculada para cada grupo traslapa el GAD + 5% de componente cuadrupolar. Conjunto de datos de polos geomagnéticos virtuales con distribución fisheriana o no (Fisher?); coordenadas de los VGP's en latitud norte y longitud este calculadas para cada grupo a partir del método del *bootstrap* paramétrico [*Tauxe et al.*, 1991], donde Eta y Zeta son los semiejes de la elipse de confianza calculada por el método *bootstrap*.

4.4 Modelo de un campo tipo GAD más cuadrupolo

Con el fin de encontrar un modelo de campo geomagnético promediado en el tiempo que pudiese explicar mejor la dirección media encontrada, se modeló un campo potencial netamente zonal, conformado en un 95% por una componente de tipo axial dipolar (g_1^0) y el otro 5% por una componente de tipo axial cuadrupolar g_2^0 , como lo sugieren varios de los estudios reportados en el marco teórico. Con el modelo propuesto, GAD más 5% de cuadrupolo, se elaboró una curva de la variación de la inclinación esperada según la latitud y se comparó con la curva originada por un modelo tipo GAD (Figuras 4-30 y 4-31). Para comprobar cuál de los dos modelos se ajusta mejor a los resultados paleomagnéticos obtenidos para los últimos 5 Ma, se graficaron los resultados de la inclinación magnética obtenida en esta investigación (computando una latitud promedio entre los sitios muestreados), junto a los resultados presentados en otras 29 investigaciones realizadas en diferentes latitudes del planeta. La mayoría de los estudios están reportados en las investigaciones realizadas por [Opdyke y Mejia, 2004] y Opdyke et al. [2010], quienes recalcularon las direcciones medias y los polos virtuales geomagnéticos de la mayoría de las localidades, siguiendo los mismos criterios de calidad estipulados en este trabajo. En el Anexo A se encuentran todas las localidades empleadas.

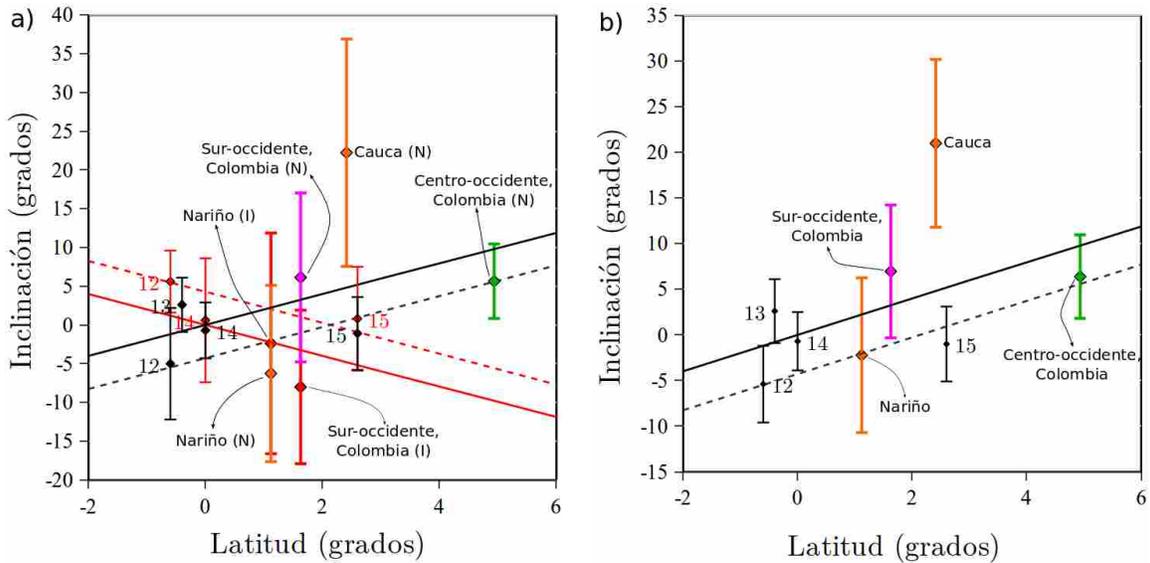
Figura 4-30: Variación de la inclinación magnética con respecto a la latitud.





Inclinación media obtenida de los estudios citados en el Anexo A (numerados de 1 a 29) y de los resultados obtenidos para las localidades estudiadas en este trabajo. La inclinación esperada para un modelo de campo geomagnético tipo GAD (GAD más 5% de cuadrupolo) esta representada por la línea continua (punteada). Las barras de error para cada localidad corresponden al cono de confianza (α_{95}). Latitud de signo positivo (negativo) es igual a latitud norte (sur). **4-30a**, datos de polaridad magnética normal (negro) e inversa (rojo) para cada localidad. **4-30b**, datos de polaridad magnética normal e inversa combinadas.

Figura 4-31: Variación de la inclinación magnética con respecto a la latitud. Ampliación de los recuadros señalados en la Figura 4-15.

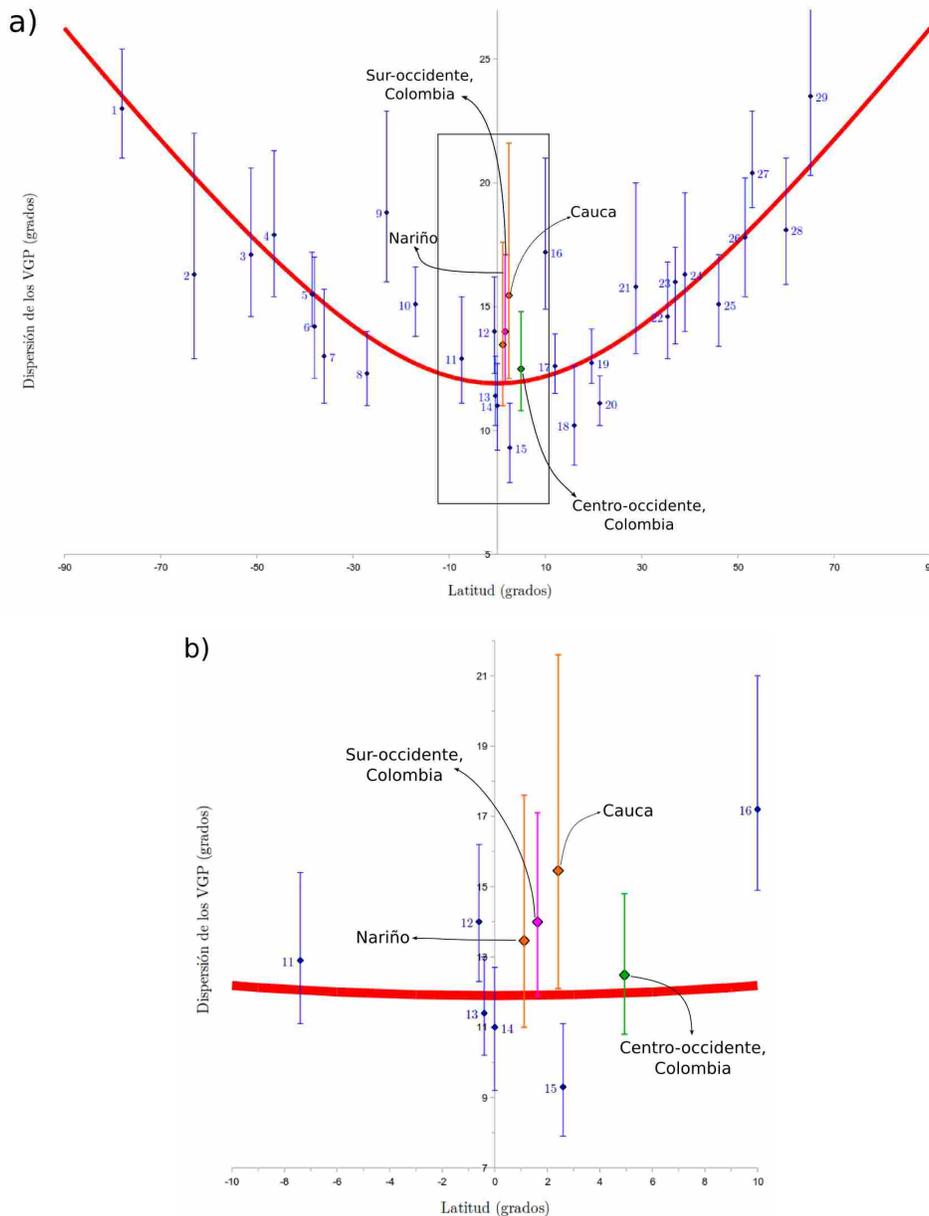


Inclinación media obtenida para las localidades estudiadas en este trabajo. **4-31a**, datos de polaridad magnética normal (negro), verde para centro-occidente, naranja para Nariño y Cauca, magenta para sur-occidente) e inversa (rojo) para cada localidad. **4-31b**, datos de polaridad magnética normal y antípoda de datos con polaridad inversa combinados (todos los sitios).

4.5 Variación paleosecular del campo geomagnético

La dispersión de los VGP's calculada para las regiones de estudiadas en Colombia, junto con las 29 localidades citadas en el Anexo A, se graficaron contra la latitud y fueron comparadas con el Modelo G (Figura 4-32).

Figura 4-32: Dispersión de los VGP's comparada con el Modelo G.



4-17a, dispersión de los VGP's de los estudios citados en el Anexo A (rombos azules numerados de 1 a 29) y de los resultados de este trabajo. **4-17b**, ampliación del recuadro señalado en 4-17a. La curva roja corresponde a la dispersión esperada de los VGP's de acuerdo al Modelo G [McFadden et al., 1988, 1991]. Las barras de error para cada localidad corresponden a los límites superior e inferior al 95% de confianza para la dispersión calculada en cada localidad.

5. Discusión

5.1 NRM, magnetismo de rocas y desmagnetización

La desmagnetización progresiva por campo alterno (CA) fue efectiva en la mayoría de especímenes de las dos regiones estudiadas.

Para el complejo volcánico del centro-occidente, el 40% de los sitios pertenecen a grupos caracterizados por tener un $k < 10$ (Figura 4-2b), significa que tienen un alto grado de dispersión si se tiene en cuenta que k tiende a cero cuando los datos se distribuyen más aleatoriamente; por otra parte, el 50% de los sitios tienen $k > 50$, lo que significa que en la mitad de los especímenes la dirección de la NRM inicial observada es próxima a la dirección media real de la ChRM. De acuerdo con lo anterior, se infiere que es baja la remagnetización secundaria o VRM; su presencia en algunos especímenes se atribuye a la pérdida de la magnetización inicial termorremanente en algunos de sus minerales magnéticos por completar su tiempo de relajación, para luego fijar una nueva dirección de magnetización. En otros especímenes, donde el valor de la NRM inicial es muy alto con respecto al valor medio del sitio, ha sido inducida una magnetización tipo IRM por el impacto de un rayo sobre la roca. En términos generales para la región centro-occidente, la NRM inicial del conjunto de todos los especímenes representa en buena medida la ChRM obtenida luego de la desmagnetización y análisis PCA. Además, en la mayoría de sitios analizados los portadores magnéticos son titanomagnetitas con bajo contenido de Titanio, de coercitividad media a alta, con un rango de tamaño de grano caracterizado por los estados magnéticos PSD y MD, con una única componente magnética y escasa remagnetización secundaria tipo VRM o IRM.

Para el complejo volcánico del sur-occidente, al analizar la distribución del estimador del parámetro de precisión, k , de la dirección media de la NRM inicial de todos los sitios, se confirma el grado medio en la dispersión (Figura 4-16b). El 71% de los sitios pertenecen al grupo caracterizado por tener $k < 10$ (casi la mitad de los especímenes tienen $k < 5$), clasificando su dispersión en un grado medio. Sólo el 10% de los sitios tienen $k > 50$, significa que para una minoría de especímenes la dirección de la NRM inicial observada es

próxima a la dirección media real de la ChRM. La remagnetización secundaria o VRM, se cataloga de media a alta, y está enmascarando la componente característica ChRM de muchos especímenes. Varios especímenes tienen un valor de la NRM inicial muy elevado; en ellos fue inducida una IRM por el impacto de un rayo. Para la región sur-occidente, la NRM inicial para la mayoría de los especímenes no representa la ChRM obtenida luego de la desmagnetización y análisis PCA; la mayoría de sitios tiene como portadores magnéticos a titanomagnetitas con bajo contenido de Titanio y de media a alta coercitividad; un grupo pequeño de sitios, tiene como portadores magnéticos a titanohematitas de alta coercitividad, resistentes al tratamiento de desmagnetización por campo alterno.

5.2 Direcciones, polos paleomagnéticos, implicaciones tectónicas

5.2.1 Región centro-occidente

El análisis de los resultados presentados en la Tabla 4-4, muestra que la dirección paleomagnética media de los 40 sitios seleccionados ($D = 3.7^\circ$; $I = 6.4^\circ$; $\alpha_{95} = 4.6^\circ$) no coincide con la dirección esperada en la región de estudio para un modelo simple tipo GAD ($D = 0^\circ$; $I = 9.8^\circ$), como se puede ver en la Figura 4-11b. Una situación similar se presenta con el polo paleomagnético, ($Lat., N = 86.0^\circ$; $Long., E = 38.2^\circ$), calculada con el método de *bootstrap* paramétrico [Tauxe et al., 1991], la cual no coincide con el polo geomagnético norte de un campo tipo GAD (Figura 4-12b). Se propone que la dirección paleomagnética media para la región se originó en un campo geomagnético dipolar con una pequeña componente cuadrupolar.

Al comparar la inclinación calculada en este estudio con el valor calculado de la inclinación ($I = 30.3^\circ$) del IGRF-10 para el año 2008 (Figura 4-11b), se observa que no coinciden, una observación similar es presentada por *Opdyke et al.* [2006] en un estudio realizado en el Ecuador. Una buena discusión que podría aportar al entendimiento de esta situación es la dada por *Opdyke y Mejia* [2004], quienes cuestionan qué tan bien representada el campo geomagnético actual al campo geomagnético del pasado, pregunta que puede ser respondida si se le compara con estudios del campo geomagnético promediado en el tiempo (TAF), para los cuales el campo geomagnético actual se presenta muy variable.

Se descartan rotaciones tectónicas en la región centro-occidente. A pesar que la dirección del polo paleomagnético no coincide con la polo del campo geomagnético tipo GAD (Figura 4-12b), la pequeña desviación de la dirección media regional con respecto al eje de rotación terrestre, se atribuye más al efecto que ocasiona la existencia de una componente axial cuadrupolar del campo geomagnético que a una posible rotación tectónica.

5.2.2 Región sur-occidente

La Tabla 4-8 resume las direcciones medias y el polo paleomagnético, calculados para todos los sitios y entre grupos de sitios según su polaridad magnética. La dirección media regional calculada ($D = 357.7^\circ$; $I = 7.0^\circ$; $\alpha_{95} = 7.3^\circ$) coincide con la dirección esperada para un modelo simple tipo GAD ($D = 0^\circ$; $I = 3.25^\circ$); ver Figura 4-25b. El polo paleomagnético ($Lat., N = 87.0^\circ$; $Long., E = 236.2^\circ$; $\alpha_{95} = 4.6^\circ$) también coincide con el polo de un campo geomagnético tipo GAD (Figura 4-26b).

Al igual que para la región centro-occidente, el valor calculado de la inclinación ($I = 25.2^\circ$) del IGRF-10 para el año 2008 se muestra estadísticamente diferente de la inclinación media calculada en este estudio (Figura 4-25b). Si la comparación se hace con respecto a la inclinación de los sitios (como los que se presentan en la Figura 4-25a), no se observa tal diferencia estadística con algunos de ellos.

5.2.3 Región sur-occidente: Cauca y Nariño

Con el fin de realizar un análisis más detallado de la región sur-occidental, se decidió dividir el total de datos en un par de conjuntos representativos de dos subregiones a saber: la primera, conformada por los sitios muestreados en los volcanes del departamento del Cauca, y la segunda, integrada por los sitios muestreados en volcanes del departamento de Nariño. Las siguientes consideraciones justifican la decisión tomada:

- Se esperaba detectar una desviación del polo paleomagnético y su cono de confianza con respecto al eje de rotación terrestre, desviación atribuible a la existencia de la componente axial cuadrupolar del campo geomagnético.
- Se esperaba un comportamiento unificado como región desde el punto de vista paleomagnético, pero tuvo más peso las diferencias existentes entre los complejos volcánicos de ambos departamentos: pertenecen a dos segmentos volcánicos diferentes separados geográficamente por la depresión Cauca-Patía, y están distanciados por lo menos un grado de latitud. Estas diferencias podrían estar afectando el cálculo de la dirección paleomagnética media regional y enmascarando algún efecto de la tectónica local.

5.2.3.1 Departamento del Cauca

La dirección paleomagnética media ($D = 1.2^\circ$; $I = 21.0^\circ$; $\alpha_{95} = 9.2^\circ$) fue calculada usando estadística fisheriana (Tabla 4-9). Al compararla con la dirección esperada del GAD ($D = 0^\circ$; $I = 4.82^\circ$) se aprecia que no existe coincidencia alguna (Figura 4-28a), por lo que se concluye que son direcciones estadísticamente diferentes. Lo mismo ocurre con el

polo paleomagnético, no coincide con el polo geomagnético norte de un campo tipo GAD (Figura 4-28b). Esta situación quizás tenga su origen en un algún evento tectónico local ocurrido en el pasado que incrementó el valor de la inclinación paleomagnética calculada en el Cauca.

Analizando con más detalle los sitios seleccionados de la región caucana presentados en la tabla 4-7, se pueden clasificar en tres de sitios según el valor de su inclinación:

- Un primer grupo conformado por cuatro sitios (SW1, SW37, SW39, SW40), caracterizados por inclinaciones positivas anómalamente altas ($I \geq 29^\circ$), de polaridad normal, localizados cerca de la ciudad de Popayán a una altitud media de 1760 m.s.n.m., y que corresponden a los emplazamientos de flujos piroclásticos más antiguos muestreados en la zona según las edades reportadas en la Tabla 4-7. Los cuatro sitios posiblemente fueron emplazados en el cron Gauss de polaridad normal (Figura 4-27).
- Un segundo grupo integrado por cuatro sitios (SW5, SW7, SW36, SW38), con inclinaciones negativas altas ($-16.5^\circ \leq I \leq -20.5^\circ$), de polaridad inversa, en un rango de altitud entre 2060 a 3300 m.s.n.m., que corresponden a dos lavas y dos emplazamientos de flujos piroclásticos. Los cuatro sitios posiblemente fueron emplazados en el cron Matuyama de polaridad inversa (Figura 4-27).
- Un tercer grupo de dos sitios (SW2, SW3), con inclinaciones bajas ($-3^\circ \leq I \leq 5^\circ$), de polaridad normal, de altitud superior a 3600 m.s.n.m., que corresponden a dos lavas. Estas son las lavas más jóvenes de las muestreadas en el Cauca (edades en Tabla 4-7), están en las inmediaciones del volcán Puracé, posiblemente fueron emplazadas en el cron Brunhes de polaridad normal (Figura 4-27).

Los dos primeros grupos son los que están jalonando hacia arriba el valor medio de la inclinación calculada. Posiblemente estos grupos de sitios estén afectados por algún evento de la tectónica local no conocido o no reportado en la literatura disponible en el tiempo que se realizó este trabajo. Se propone que la alta inclinación de estos dos grupos podría ser explicada en primera aproximación, por una de las siguientes hipótesis: un rápido desplazamiento del terreno en sentido norte-sur en los últimos 4 Ma, un cambio abrupto del basculamiento tectónico del terreno en ausencia de desplazamiento, o una combinación de las dos hipótesis anteriores.

5.2.3.2 Departamento de Nariño

La dirección paleomagnética media ($D = 355.6^\circ$; $I = -2.2^\circ$; $\alpha_{95} = 8.5^\circ$) fue calculada con estadística fisheriana. Al compararla con la dirección esperada del GAD ($D = 0^\circ$; $I = 2.24^\circ$) se aprecia que coinciden estadísticamente (Figura 4-29a). El polo

paleomagnético también coincide con el polo geomagnético norte de un campo tipo GAD (Figura 4-29b), por lo que se descartan rotaciones tectónicas.. En la tabla 4-10 se presentan las direcciones promedio.

5.3 Modelo de un campo tipo GAD más cuadrupolo

A partir de una simple inspección de la Figura 4-30, se ve que la inclinación media de los estudios citados tiene un ajuste cercano a la inclinación esperada para un campo geomagnético tipo GAD. Al realizar una revisión más detallada de la figura, se encuentra una ventana latitudinal entre -30° y 30° donde los datos de inclinación magnética de polaridad normal, inversa y combinada se ajustan mejor al modelo GAD más 5% de cuadrupolo. Fuera de la ventana mencionada, las inclinaciones con el modelo simple tipo GAD y el modelo tipo GAD más 5% de cuadrupolo son muy similares. Las dos situaciones corroboran que efectivamente una pequeña componente axial cuadrupolar esta contribuyendo al campo geomagnético total, y que dicha componente se esta detectando en estudios que fueron realizados en localidades ubicadas en latitudes ecuatoriales.

Analizando la dirección paleomagnética media calculada para la región centro-occidente de Colombia ($D = 3.7^\circ$; $I = 6.4^\circ$; $\alpha_{95} = 4.6^\circ$), las Figuras 4-31a y 4-31b demuestran que dicha dirección ajusta mejor con un modelo tipo GAD más 5% de cuadrupolo, tanto para sitios de polaridad normal como para todos los sitios (sitios con polaridad normal más antípoda de sitios con polaridad inversa). Como no se cálculo de la dirección paleomagnética media sitios de polaridad inversa (debido al pequeño número de sitios), no se puede aseverar algo acerca de su comportamiento con respecto a los modelos de campo geomagnético evaluados.

Para la región sur-occidente, las tres direcciones paleomagnéticas medias calculadas para la región (sur-occidente, Cauca y Nariño) graficadas en las Figuras 4-31a y 4-31b, revelan lo siguiente:

- Cuando se consideran todos los sitios, la dirección media de la región sur-occidente se ajusta a un modelo simple tipo GAD y no coincide con el modelo GAD más 5% de cuadrupolo (Figura 4-31b). Separando los sitios según su polaridad, la dirección media para polaridad normal e inversa también ajustan mejor al modelo tipo GAD (Figura 4-31a).
- Si se desglosan los sitios en las dos subregiones propuestas, la dirección media de la subregión Cauca no ajusta con los dos modelos propuestos, mientras que la dirección media de la subregión Nariño se ajusta mejor al modelo GAD más 5% de cuadrupolo (Figura 4-31b). Separando según la polaridad, la subregión Cauca no se ajusta con algunos de los dos modelos considerando la polaridad normal; en la subregión Nariño la

dirección media para polaridad normal ajusta mejor al modelo tipo GAD más 5% de cuadrupolo, mientras que la dirección media para polaridad inversa se ajusta mejor al modelo tipo GAD (Figura 4-31a).

- Dado el escaso número de sitios con polaridad inversa (cuatro) en la subregión Cauca, no se realizó el cálculo de la dirección paleomagnética media para ellos y por tanto no se comparó con los modelos propuestos.

5.4 Variación paleosecular del campo geomagnético

Los datos graficados en la Figura 4-32a muestran que el efecto de la variación secular aumenta con el incremento de la latitud; además, la distribución de la dispersión de las diferentes localidades en primera aproximación se ajusta al Modelo G, sin dejar de mencionar que existen localidades que estadísticamente difieren de dicho modelo (localidades 8, 9, 10, 15, 16, 18, 20, 27 y 29).

El valor calculado de la dispersión de los VGP's para la región centro-occidente de Colombia ($Sb = 12.5^\circ$; $Su = 14.8^\circ$, $Sl = 10.8^\circ$) ajusta muy bien con el valor de dispersión esperado para el Modelo G (12°) como se observa en la Figura 4-32b. También, se aprecia que el valor de la dispersión es mayor que el calculado en otras localidades de latitudes ecuatoriales tales como las islas Galápagos, el Monte Kenia y Loiyangalani en Kenia (localidades 13, 14 y 15 respectivamente), pero inferior si se le compara con los resultados obtenidos en Java, Ecuador y en las otras regiones de Colombia investigadas en este trabajo (localidades 11 y 12, Nariño, sur-occidente y Cauca) donde la dispersión es mayor; la dispersión en Costa Rica (localidad 16) se presenta anómalamente alta.

El valor calculado de la dispersión de los VGP's para la región sur-occidente de Colombia ($Sb = 14^\circ$; $Su = 17.1^\circ$, $Sl = 11.9^\circ$) ajusta estadísticamente con el valor de dispersión esperado para el Modelo G (11.9°) como se observa en la Figura 4-32b. Separando por subregiones, la dispersión para Cauca ($Sb = 15.5^\circ$; $Su = 21.6^\circ$, $Sl = 12.1^\circ$) es mayor aunque sigue ajustando estadísticamente con el valor de dispersión esperado para el Modelo G, mientras que la dispersión ($Sb = 13.5^\circ$; $Su = 17.6^\circ$, $Sl = 11.0^\circ$) calculada para Nariño es menor y la que mejor ajusta de las tres regiones con el valor de dispersión esperado para el Modelo G.

De nuevo, se aprecia que el valor calculado de la dispersión para las tres regiones es mayor que el calculado en otras localidades de latitudes ecuatoriales tales como las islas Galápagos, el Monte Kenia y Loiyangalani en Kenia, pero similar si se le compara con los resultados obtenidos en Ecuador (exceptuando la dispersión encontrada en el Cauca).

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Para las dos regiones de estudio, gran parte de la NRM inicial corresponde a magnetismo termorremanente (TRM). La dispersión de la NRM inicial es mayor en el conjunto de especímenes analizados de los complejos volcánicos del sur-occidente de Colombia que la obtenida en el complejo volcánico del centro-occidente, situación que es confirmada cuantitativamente al observar el comportamiento del estimador del parámetro de precisión, k , antes y después de la desmagnetización. Visto desde otra perspectiva, una mayor proporción de sitios del complejo volcánico del centro-occidente tienen una dirección de la NRM inicial más cercana a la dirección media de la ChRM aislada luego de la desmagnetización; en contraste, los sitios estudiados de los volcanes del sur-occidente presentaron en mayor proporción magnetizaciones secundarias tipo VRM e IRM, que enmascaraban la componente ChRM de muchos especímenes.

Para la mayoría de sitios analizados en la región centro-occidente, los portadores magnéticos son titanomagnetitas con bajo contenido de Titanio, con una única componente magnética de media a alta coercitividad y escasa presencia de remagnetización secundaria tipo VRM o IRM. Para la región sur-occidente, existe un grupo mayoritario de sitios que tiene como portadores magnéticos a las titanomagnetitas con bajo contenido de Titanio y de media a alta coercitividad; un segundo grupo de sitios, más pequeño, tiene como portadores magnéticos a titanohematitas de alta coercitividad, resistentes al tratamiento de desmagnetización por campo alterno.

Para ambas regiones, en general hubo coincidencia entre la polaridad magnética de las lavas, obtenida en el laboratorio, y la polaridad esperada de acuerdo a la escala de tiempo de polaridad magnética y las edades reportadas en la literatura. En la región centro-occidente la mayoría de sitios tienen polaridad magnética normal, mientras que en la región sur-occidente se observó una distribución cuasi-equitativa de sitios con una u otra polaridad. También se destaca el mayor número de sitios con polaridad transicional

detectados en la región sur-occidente (cinco sitios), en comparación con la región centro-occidente donde sólo se detectó uno.

La dirección paleomagnética media calculada para la región centro-occidente, se ajusta con un modelo tipo GAD más 5% de cuadrupolo axial. Para calcular la dirección media de la región sur-occidente, se tomó la decisión de dividir los sitios en las subregiones Cauca y Nariño. Se comprobó que para la subregión Cauca, la dirección paleomagnética media no coincide con alguno de los dos modelos de campo geomagnético propuestos; la inclinación calculada para los sitios más antiguos podría estar afectada por la tectónica local. La dirección paleomagnética media calculada de la subregión Nariño ajusta con ambos modelos. Se revela la presencia de una pequeña componente axial cuadrupolar, que hace parte del campo magnético total, persistente en el tiempo y detectable en latitud ecuatorial.

La dispersión calculada de los VGP's para la región Centro-Occidente y la subregión Nariño se ajusta estadísticamente a la dispersión predicha por el Modelo G [McFadden *et al.*, 1988, 1991; McElhinny y McFadden, 1997] para las regiones de estudio, este hecho implica que la variación paleosecular del campo geomagnético fue bien promediada gracias a que fue adecuadamente muestreada en el tiempo y en el espacio. La dispersión más alta y sin ajuste estadístico con el Modelo G se presentó en la subregión Cauca, hecho que esta ligado a la tectónica local que afectó las direcciones de los sitios.

6.2 Recomendaciones

Ampliar el estudio paleomagnético realizado en los complejos volcánicos del departamento del Cauca, con un nuevo muestreo que ajuste por lo menos a 50 sitios en total, que permita revelar con mayor precisión el origen de las inclinaciones magnéticas anómalamente altas detectadas en este estudio. Cada sitio nuevo debe corresponder a un evento volcánico diferente con edad inferior a 5 Ma con predilección por sitios con edades absolutas por dataciones radiométricas o al menos con edades relativas por correlación estratigráfica. Se debe incluir en el muestreo lavas e ignimbritas consolidadas el flanco oriental de la cordillera central en el departamento del Huila, relacionados con el vulcanismo de la Cadena Volcánica de los Coconucos y la Caldera de Paletará. Usar la metodología y los criterios de calidad de datos empleados en este estudio.

Ampliar el estudio paleomagnético en Nariño, anexando por lo menos otros 25 sitios de muestreo, que cumplan con las especificaciones planteadas en el ítem anterior.

Para nuevos estudios similares a este, se recomienda muestrear en sitios con edades determinadas en estudios previos, situación que facilita enormemente la elaboración de la magnetoestratigrafía y garantiza un adecuado muestreo en el tiempo, evitando recolectar

muestras de sitios con edades muy próximas entre sí que pueden afectar el cálculo de las variaciones paleoseculares. Idealmente, se debe contar con un rubro en el presupuesto dirigido a obtener edades radiométricas de algunos sitios, que pudiesen ser empleadas para obtener edades relativas de otros sitios por correlación estratigráfica.

En rocas ígneas muestreadas en futuros estudios paleomagnéticos en Colombia, se recomienda el uso de la desmagnetización progresiva por campo alterno como método principal de desmagnetización, complementado con desmagnetización térmica progresiva en especímenes donde la remoción de la NRM inicial no alcance el 50%.

A. Anexo: Base de datos de estudios paleomagnéticos ordenados según su latitud

Localización	Lat., N	Long., E	P	N	Dec	Inc	α_{95}	Sb	Sl	Su	Ref.
McMurdo Volcanic Field	-78.0	166.0	C	111	13.8	-81.1	2.2	23.0	21.0	25.4	1
			N	68	12.8	-82.4	2.8				
			R	43	194.8	78.9	3.6				
Isla Decepción	-63.0	-61.0	N	13	350.4	-73.7	5.4	16.3	12.9	22.0	2
Patagonia	-51.2	-70.6	C	33	358.7	-68.2	3.5	17.1	14.6	20.6	3
			N	22	359.3	-70.6	4.3				
			R	11	177.7	63.4	6.1				
Isla Posesión	-46.4	51.8	C	36	2.0	-64.0	3.7	17.9	15.4	21.3	4
			N	18	356.3	-65.4	3.9				
			R	18	187.2	62.5	6.5				
Nueva Zelanda	-38.5	176.0	C	105	7.4	-58.4	2.1	15.5	14.2	17.2	5
			N	81	9.0	-57.4	2.5				
			R	24	181.0	61.3	3.8				
Newer Volcanic Victoria, Australia	-38.0	144.0	C	33	356.3	-57.7	3.5	14.2	12.1	17.0	6
			N	13	2.1	-62.3	6.3				
			R	20	173.4	54.6	3.8				
Patagonia Norte	-36.0	-69.0	C	31	357.3	-52.8	4.6	13.0	11.1	15.7	7
			N	19	354.8	-53.0	6.7				
			R	12	181.0	52.3	6.0				
Isla de Pascua	-27.1	-109.2	N	64	357.5	-44.8	4.0	12.3	11.0	14.0	8
Atacama	-23.0	-68.0	C	29	356.9	-36.2	6.6	18.8	16.0	22.9	9
			N	8	345.0	-43.8	13.4				
			R	21	180.6	33.0	7.3				
Islas de la Sociedad	-17.0	-151.0	C	116	1.2	-35.0	2.8	15.1	13.8	16.6	10
			N	73	2.5	-34.4	3.6				
			R	43	179.1	36.1	4.7				
Java, Indonesia	-7.4	112.0	N	35	359.6	-18.5	5.2	12.9	11.1	15.4	11
Ecuador	-0.6	-78.0	C	51	359.9	-5.4	4.2	14.0	12.3	16.2	12
			N	21	354.6	-5.0	7.2				
			R	30	183.5	-5.6	4.0				
Islas Galápagos	-0.4	-91.6	C	64	357.4	2.6	3.5	11.4	10.2	13.0	13

Anexo A: (Continuación):

Localización	Lat., N	Long., E	P	N	Dec	Inc	α_{95}	Sb	Sl	Su	Ref.
Monte Kenia	0.0	36.5	C	69	1.4	-0.7	3.2	11.0	9.2	12.7	14
			N	58	1.2	-0.7	3.6				
			R	10	181.9	0.6	8.0				
Nariño, Colombia	1.1	-77.4	C	17	355.6	-2.2	8.5	13.5	17.6	11.0	
			N	9	356.4	-6.3	11.4				
			R	8	174.6	-2.4	14.2				
Sur-Occidente, Colombia	1.6	-77.1	C	28	357.7	7.0	7.3	14.0	17.1	11.9	
			N	16	0.3	6.1					
			R	12	174.3	-8.0					
Cauca, Colombia	2.4	-76.5	C	11	1.2	21.0	9.2	15.5	21.6	12.1	
			N	7	5.7	22.2	14.7				
Loiyangalani, Kenia	2.6	36.5	C	32	1.1	-1.0	4.1	9.3	7.9	11.1	15
			N	15	358.6	-1.1	4.7				
			R	17	183.4	0.8	6.7				
Ruiz-Tolima, Colombia	4.9	-75.4	C	40	3.7	6.4	4.6	12.5	14.8	10.8	
			N	37	3.7	5.6	4.8				
Costa Rica	10.0	-84.0	C	28	2.1	14.2	8.2	17.2	14.9	21.0	16
			N	24	0.9	16.8	8.5				
Depresión de Afar, Etiopía	12.0	41.5	C	103	2.9	14.8	3.1	12.6	11.5	13.9	17
			N	53	3.0	19.9	3.2				
			R	50	182.9	-9.2	5.0				
Isla Guadalupe	16.0	-62.0	N	25	0.5	30.2	4.1	10.2	8.6	12.6	18
México	19.6	-99.0	C	187	358.8	31.6	2.0	12.7	11.9	14.1	19
			N	144	359.0	30.7	2.2				
			R	43	178.0	-34.5	4.1				
Hawaii	21.3	-158.0	C	118	1.4	28.1	2.2	11.1	10.2	12.2	20
			N	108	1.8	27.8	2.3				
			R	10	176.5	-30.7	9.3				
La Palma, Islas Canarias	28.8	-17.8	C	21	358.6	42.4	6.1	15.8	13.1	20.0	21
			N	9	355.1	46.6	9.6				
			R	12	180.9	-39.1	8.4				
Sur-Occidente, Estados Unidos	35.4	-111.8	C	54	355.7	53.8	3.1	14.6	12.9	16.8	22
			N	35	354.0	54.9	4.4				
			R	19	178.6	-51.7	4.0				
San Miguel, Islas Azores	37.0	-25.0	C	27	357.4	48.2	5.4	16.0	13.5	17.4	23
			N	14	359.2	52.1	7.9				
			R	13	175.7	-43.9	7.6				
Norte de California - Idaho Estados Unidos	39.0	-113.0	C	33	3.5	58.3	4.1	16.3	14.0	19.6	24
			N	15	7.0	59.4	6.7				
			R	18	180.8	-57.3	5.4				
Washington	46.0	-121.7	N	56	2.6	65.2	2.5	15.1	13.4	17.1	25
Columbia Británica	51.5	-122.4	N	45	356.9	70.2	2.8	17.8	15.4	20.2	26
Islas Aleutianas	53.0	-168.0	C	75	358.6	70.7	2.6	20.4	19.0	22.9	27
			N	62	356.8	68.1	2.0				
			R	13	207.0	-82.9	18.1				
Isla Nunivak, Alaska Estados Unidos	60.0	-166.0	C	50	2.8	75.0	2.8	18.1	15.9	21.0	28
			N	36	359.8	74.6	2.8				
			R	14	191.5	-75.9	7.3				
Islandia	65.1	-15.0	C	38	0.4	74.3	4.2	23.5	20.3	27.9	29
			N	13	358.9	77.2	8.9				
			R	25	180.9	-72.8	4.8				

El valor de la latitud y la longitud es la media aproximada de la latitud y la longitud de las localidades de estudio. **P** se refiere a la forma en que los sitios de cada localidad fueron agrupados según su polaridad magnética: **N** para normal, **R** para inversa, y **C** para la combinación de sitios con polaridad normal e invertida. **Dec** e **Inc** es la declinación e inclinación magnéticas calculadas y α_{95} es el cono de confianza al 95% para la dirección calculada. **Sb** es la dispersión de los VGP's. **Sl** y **Su** son el límite de confianza inferior y

Anexo A: (Continuación):

superior de la dispersión al 95% de confianza [Cox, 1969]. **Ref** es un número que se corresponde con la referencias tal como sigue: 1, [Lawrence et al., 2009]; 2, [Baraldo et al., 2003]; 3, Mejia et al. [2004]; 4, [Camps et al., 2001]; 5, [Tanaka et al., 1996], [Tanaka et al., 1997] [Tanaka et al., 2009]; 6, Opdyke y Musgrave [2004]; 7, [Quidelleur et al., 2009]; 8, Brown [2002] y [Miki et al., 1998]; 9, Brown citado en Johnson et al. [2008]; 10, [Yamamoto et al., 2002]; 11, [Elmaleh et al., 2004]; 12, Opdyke et al. [2006]; 13, [Kent et al., 2010]; 14, Opdyke et al. [2010]; 15, Opdyke et al. [2010]; 16, Constable citado en Johnson et al. [2008]; 17, [Kidane et al., 2003]; 18, Carlut et al. [2000]; 19, Mejia et al. [2005]; 20, [Laj et al., 1999] y [Herrero-Bervera y Valet, 2002] [Herrero-Bervera y Valet, 2003], [Herrero-Bervera y Valet, 2007]; 21, Tauze et al. [2000]; 22, Tauze et al. [2003] y [Mankinen, 2008]; 23, Johnson et al. [1998]; 24, Tauze et al. [2004b] y [Mankinen, 2008]; 25, [Mitchell et al., 1989]; 26, Mejia et al. [2002]; 27, [Stone y Layer, 2006]; 28, Coe citado en Johnson et al. [2008]; 29, [Udagawa et al., 1999].

Bibliografía

- Ayala, C., G. Veloza, G. Bayona, M. Gómez, A. E. Rapalini, V. Constanzo-Álvarez, M. Aldana, and M. Cortés (2005), Paleomagnetismo y Mineralogía Magnética en las unidades del Mesozoico de Bucaramanga y el Macizo de Floresta, *Geol. Col.*, 30.
- Baag, C., and C. E. Helsley (1974), Geomagnetic Secular Variation Model E, *J. Geophys. Res.*, 79(32), 4918–4922.
- Baraldo, A., A. E. Rapalini, H. Böhnell, and M. Mena (2003), Paleomagnetic study of Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica, *Geophys. J. Int.*, 153(2), 333–343, doi:10.1046/j.1365-246X.2003.01881.x.
- Barrero, D. (1979), *Geology of the central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia*, Publicaciones Geológicas Especiales de Ingeominas 4, INGEOMINAS, Bogotá.
- Bayona, G., C. Jaramillo, and A. Reyes-Harker (2006a), Resultados Paleomagnéticos en unidades del Paleógeno de Colombia y oeste de Venezuela, y posibles usos para la caracterización de contactos discordantes, *Geol. Col.*, 31, 29–44.
- Bayona, G., G. Jiménez, C. Silva, A. Cardona, C. Montes, J. Roncancio, and U. Cordani (2009), Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: A preliminary interpretation for block rotation and translations, *J. S. Am. Earth Sci., Article in Press, Corrected Proof*, doi:10.1016/j.jsames.2009.10.005.
- Bayona, G., A. E. Rapalini, and V. Constanzo-Álvarez (2006b), Paleomagnetism in Mesozoic Rocks of the Northern Andes and Its Implications in Mesozoic Tectonics of Northwestern South America, *Earth Planets Space*, 58(10), 1255–1272.
- Bird, P. (2003), An updated digital model of plate boundaries, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- Botero, G. (1963), Contribución al conocimiento de la Geología de la Zona Central de Antioquia, *Anales Facultad de Minas*, (57), 1–101.
- Brown, L. L. (2002), Paleosecular variation from Easter Island revisited: modern demagnetization of a 1970s data set, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 133(1-4), 73–81, doi:10.1016/S0031-9201(02)00093-6.
- Butler, R. F. (1992), *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*, Blackwell Scientific Publications, Boston. [online] Available from: <http://www.geo.arizona.edu/Paleomag/book/>

- Calvache, M. L. (1995), The geological evolution of Galeras Volcanic Complex, Ph.D Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, USA.
- Camps, P., B. Henry, M. Prévot, and L. Faynot (2001), Geomagnetic paleosecular variation recorded in Plio-Pleistocene volcanic rocks from Possession Island (Crozet Archipelago, southern Indian Ocean), *J. Geophys. Res.*, *106*(B2), 1961–1971, doi:200110.1029/2000JB900370.
- Cande, S. C., and D. V. Kent (1995), Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic, *J. Geophys. Res.*, *100*(B4), 6093–6095, doi:199510.1029/94JB03098.
- Carlut, J., and V. Courtillot (1998), How complex is the time-averaged geomagnetic field over the past 5 Myr?, *Geophys. J. Int.*, *134*(2), 527–544, doi:10.1046/j.1365-246x.1998.00577.x.
- Carlut, J., X. Quidelleur, V. Courtillot, and G. Boudon (2000), Paleomagnetic directions and K/Ar dating of 0 to 1 Ma lava flows from La Guadeloupe Island (French West Indies): Implications for time-averaged field models, *J. Geophys. Res.*, *105*(B1), 835–849, doi:10.1029/1999JB900238.
- Case, J. E., L. G. Duran S., A. Lopez R., and W. R. Moore (1971), Tectonic Investigations in Western Colombia and Eastern Panama, *Geol. Soc. Am. Bull.*, *82*(10), 2685–2712, doi:10.1130/0016-7606(1971)82[2685:TIWCA]2.0.CO;2.
- Christensen, U. R., and P. Olson (2003), Secular variation in numerical geodynamo models with lateral variations of boundary heat flow, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *138*(1), 39–54, doi:10.1016/S0031-9201(03)00064-5. [online] Available from: <http://www.jhu.edu/~polson1/pdfs/TomographicDynamo2.pdf>
- Constable, C. G., and R. L. Parker (1988), Statistics of the Geomagnetic Secular Variation for the Past 5 m.y., *J. Geophys. Res.*, *93*(B10), 11,569–11,581, doi:10.1029/JB093iB10p11569.
- Cox, A. (1962), Analysis of the present geomagnetic field for comparison with paleomagnetic results, *J. Geomag. Geoelec.*, *13*, 101–112.
- Cox, A. (1969), Confidence Limits for the Precision Parameter k, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, *17*(5), 545–549, doi:10.1111/j.1365-246X.1969.tb00257.x.
- Cox, A. (1970), Latitude Dependence of the Angular Dispersion of the Geomagnetic Field, *Geophys. J. Int.*, *20*(3), 253–269, doi:10.1111/j.1365-246X.1970.tb06069.x.
- Creer, K. M. (1962), The Dispersion of the Geomagnetic Field Due to Secular Variation and Its Determination for Remote Times from Paleomagnetic Data, *J. Geophys. Res.*, *67*(9), 3461–3476, doi:196210.1029/JZ067i009p03461.
- Creer, K. M. (1970), A palaeomagnetic survey of South American rock formations: General introduction, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, *267*, 458–462.
- Creer, K. M., E. Irving, and A. E. M. Naim (1959), Palaeomagnetism of the Great Whin Sill, *Geophys. J. Int.*, *2*(4), 306–323, doi:10.1111/j.1365-246X.1959.tb05802.x.
- Day, R., M. Fuller, and V. Schmidt (1977), Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence, *J. Geophys. Res.*, *82*, 260–266.

- Dunlop, D. J. (2002), Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc), 2. Application to data for rocks, sediments, and soils, *Journal of Geophysical Research*, 107(B3), 5/1–5/15.
- Dunlop, D. J., and O. Özdemir (1997), *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*, Cambridge University Press, New York.
- Duque-Caro, H. (1990), The Choco Block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications, *J. South Am. Earth Sci.*, 3(1), 71–84, doi:10.1016/0895-9811(90)90019-W.
- Duque, J. F., G. E. Toro, A. Cardona, and M. L. Calvache (2009), Geología, geocronología y geoquímica del Volcán Morasurco, Pasto, Colombia, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 27, 25–36. [online] Available from: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=169516257003>
- Ego, F., M. Sebrier, A. Lavenu, H. Yepes, and A. Eguez (1999), Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes, *Tectonophysics*, 259(1-3), 101–116, doi:10.1016/S0040-1951(99)00052-9.
- Elmaleh, A., J. P. Valet, X. Quidelleur, A. Solihin, H. Bouquerel, T. Tesson, E. Mulyadi, A. Khokhlov, and A. D. Wirakusumah (2004), Paleosecular variation in Java and Bawean Islands (Indonesia) during the Brunhes chron, *Geophys. J. Int.*, 157(1), 441–454.
- Espinosa, A., I. G. Hedley, and J. J. Aranda-Gomez (1986), Paleomagnetic reconnaissance of the Grupo Diabásico, Western Andes (Colombia), *Geol. Col.*, 15, 149–153.
- Estrada, J. J. (1995), Paleomagnetism and accretion events in the Northern Andes, Ph.D Thesis, State University of New York, Department of Geological Sciences and Environmental Studies, Binghamton.
- Feininger, T. (1970), The Palestina Fault, Colombia, *Geological Society of America Bulletin*, 81(4), 1201–1216, doi:10.1130/0016-7606(1970)81[1201:TPFC]2.0.CO;2.
- Fisher, R. (1953), Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 217(1130), 295–305, doi:10.1098/rspa.1953.0064.
- Frey Mueller, J. T., J. N. Kellogg, and V. Vega (1993), Plate Motions in the North Andean Region, *J. Geophys. Res.*, 98(B12), 21853–21863, doi:10.1029/93JB00520.
- Gee, J. S., and D. V. Kent (2009), Source of oceanic magnetic anomalies and the geomagnetic polarity timescale, in *Geomagnetism*, vol. 5, edited by M. Kono, pp. 455–507, Elsevier B.V.
- Glatzmaier, G. A., and R. S. Coe (2009), Magnetic Polarity Reversals in the Core, in *Core Dynamics*, vol. 8, edited by P. Olson, pp. 283–297, Elsevier B.V.
- Glatzmaier, G., and P. Olson (2005), Probing the Geodynamo, *Sci. Am.*, 292, 50–57, doi:10.1038/scientificamerican0405-50.
- Grand, M. M., and A. Handszer (1989), Naturaleza y dinámica de un flujo piroclástico en la zona de Nereidas, departamento de Caldas, Tesis de pregrado, Universidad de Caldas, Manizales, March.
- Gubbins, D. (2007), Time-Averaged Paleomagnetic Field, in *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, edited by D. Gubbins and E. Herrero-Bervera, p. 718, Springer.

- Gubbins, D., and E. Herrero-Bervera (Eds.) (2007), *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Springer.
- Hatakeyama, T., and M. Kono (2002), Geomagnetic field model for the last 5 My: time-averaged field and secular variation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 133(1-4), 181–215, doi:10.1016/S0031-9201(02)00084-5.
- Heller, R., R. T. Merrill, and P. L. McFadden (2002), The variation of intensity of earth's magnetic field with time, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 131(3-4), 237–249, doi:10.1016/S0031-9201(02)00038-9.
- Herd, D. G. (1974), Glacial and Volcanic Geology of the Ruiz-Tolima Volcanic Complex, Cordillera Central, Colombia, Ph.D Thesis, University of Washington, Seattle, August.
- Herrero-Bervera, E., and J. P. Valet (2002), Paleomagnetic secular variation of the Honolulu Volcanic Series (33–700 ka), O'ahu (Hawaii), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 133(1-4), 83–97, doi:10.1016/S0031-9201(02)00092-4.
- Herrero-Bervera, E., and J. P. Valet (2003), Persistent anomalous inclinations recorded in the Koolau volcanic series on the island of Oahu (Hawaii, USA) between 1.8 and 2.6 Ma, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212(3-4), 443–456, doi:10.1016/S0012-821X(03)00168-7.
- Herrero-Bervera, E., and J. P. Valet (2007), Holocene paleosecular variation from dated lava flows on Maui (Hawaii), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 161(3-4), 267–280, doi:10.1016/j.pepi.2007.02.008.
- Hospers, J. (1955), Rock Magnetism and Polar Wandering, *J. Geol.*, 63(1), 59–74.
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V, Working Group V-MOD: Geomagnetic Field Modeling (2010), International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation, *Geophysical Journal International*, 183(3), 1216–1230, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x.
- Irving, E., and M. A. Oliver (1964), A statistical model of the geomagnetic field, *Pure Appl. Geophys.*, 57(1), 47–52, doi:10.1007/BF00879707.
- James, M. E. (1985), Evidencia de colisión entre la miniplaca Bloque Andino y la Placa Norteamericana desde el Mioceno Medio, in *Memorias VI Congreso Latinoamericano de Geología*, edited by J. V. Wagner, pp. 71–89, Bogotá, Colombia.
- Johnson, C. L. et al. (2008), Recent investigations of the 0–5 Ma geomagnetic field recorded by lava flows, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(4), Q04032, doi:10.1029/2007GC001696.
- Johnson, C. L., and C. G. Constable (1995), The time-averaged geomagnetic field as recorded by lava flows over the past 5 Myr, *Geophys. J. Int.*, 122(2), 489–519, doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb07010.x.
- Johnson, C. L., and C. G. Constable (1997), The time-averaged geomagnetic field: global and regional biases for 0–5 Ma, *Geophys. J. Int.*, 131(3), 643–666, doi:10.1111/j.1365-246X.1997.tb06604.x.
- Johnson, C. L., and C. G. Constable (1998), Persistently anomalous Pacific geomagnetic fields, *Geophys. Res. Lett.*, 25(7), 1011–1014, doi:10.1029/98GL50666.
- Johnson, C. L., J. R. Wijbrans, C. G. Constable, J. Gee, H. Staudigel, L. Tauxe, V. H. Forjaz, and M. Salgueiro (1998), 40Ar/39Ar ages and paleomagnetism of São Miguel lavas, Azores, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 160(3-4), 637–649, doi:10.1016/S0012-821X(98)00117-4.

- Jordan, T. E., B. L. Isacks, R. W. Allmendinger, J. A. Brewer, V. A. Ramos, and C. J. Ando (1983), Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate, *Geol. Soc. Am. Bull.*, *94*(3), 341–361, doi:10.1130/0016-7606(1983)94.
- Kellogg, J. N., I. J. Ogujiofor, and D. R. Kansakar (1985), Cenozoic tectonics of the Panama and North Andes blocks, in *Memorias VI Congreso Latinoamericano de Geología*, edited by J. V. Wagner, pp. 41–59, Bogotá, Colombia.
- Kellogg, J. N., and V. Vega (1995), Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity, *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, edited by P. Mann.
- Kelly, P., and D. Gubbins (1997), The geomagnetic field over the past 5 million years, *Geophys. J. Int.*, *128*(2), 315–330, doi:10.1111/j.1365-246X.1997.tb01557.x.
- Kent, D. V., H. Wang, and P. Rochette (2010), Equatorial paleosecular variation of the geomagnetic field from 0 to 3 Ma lavas from the Galapagos Islands, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *183*(3–4), 404–412, doi:10.1016/j.pepi.2010.08.010.
- Kidane, T., V. Courtillot, I. Manighetti, L. Audin, P. Lahitte, X. Quidelleur, P. Gillot, Y. Gallet, J. Carlot, and T. Haile (2003), New paleomagnetic and geochronologic results from Ethiopian Afar: Block rotations linked to rift overlap and propagation and determination of a ~2 Ma reference pole for stable Africa, *J. Geophys. Res.*, *108*(B2), 32 PP., doi:200310.1029/2001JB000645.
- Kirschvink, J. L. (1980), The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data: examples from Siberia and Morocco, *Geoph. J. Royal Astr. Soc.*, *62*(3), 699–718.
- Kono, M. (Ed.) (2009), *Geomagnetism*, Treatise on Geophysics, Elsevier B.V.
- Kono, M., H. Tanaka, and H. Tsunakawa (2000), Spherical harmonic analysis of paleomagnetic data: The case of linear mapping, *J. Geophys. Res.*, *105*(B3), 5817–5833, doi:10.1029/1999JB900050.
- Laj, C., and J. E. T. Channell (2009), Geomagnetic excursions, in *Geomagnetism*, vol. 5, edited by M. Kono, pp. 373–416, Elsevier B.V.
- Laj, C., H. Guillou, N. Szeremeta, and R. Coe (1999), Geomagnetic paleosecular variation at Hawaii around 3 Ma from a sequence of 107 lava flows at Kaena Point (Oahu), *Earth Planet. Sci. Lett.*, *170*(4), 365–376, doi:10.1016/S0012-821X(99)00119-3.
- Lanza, R., and A. Meloni (2006), *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*, Springer-Verlag.
- Lawrence, K. P., L. Tauxe, H. Staudigel, C. G. Constable, A. Koppers, W. McIntosh, and C. L. Johnson (2009), Paleomagnetic field properties at high southern latitude, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *10*, 27 PP., doi:2009.10.1029/2008GC002072.
- Lescinsky, D. T. (1990), Geology, volcanology and petrology of Cerro Bravo, a young, dacitic, stratovolcano in west-central Colombia, M.Sc. Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, August.

- MacDonald, W. D. (1980), Anomalous paleomagnetic directions in late tertiary andesitic intrusions of the Cauca depression, Colombian Andes, *Tectonophysics*, 68(3-4), 339–348, doi:10.1016/0040-1951(80)90183-3.
- MacDonald, W. D., J. J. Estrada, G. M. Sierra, and H. Gonzalez (1996), Late Cenozoic tectonics and paleomagnetism of North Cauca Basin intrusions, Colombian Andes: Dual rotation modes, *Tectonophysics*, 261(4), 277–289, doi:10.1016/0040-1951(95)00184-0.
- MacDonald, W. D., and N. D. Opdyke (1974), Triassic Paleomagnetism of Northern South America, *AAPG Bull.*, 58(2), 208–215, doi:10.1306/83D913B7-16C7-11D7-8645000102C1865D.
- MacDonald, W. D., and N. D. Opdyke (1984), Preliminary paleomagnetic results from Jurassic rocks of the Santa Marta massif, Colombia, in *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics*, edited by W. E. Bonini, R. B. Hargraves, and R. Shagam, pp. 295–298, Geological Society of America Memoir 162.
- Mankinen, E. A. (2008), Paleomagnetic study of late Miocene through Pleistocene igneous rocks from the southwestern USA: Results from the historic collections of the U.S. Geological Survey Menlo Park laboratory, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9(Q05017), 27 PP., doi:2008 10.1029/2008GC001957 [Citation].
- Marriner, G. F., and D. Millward (1984), The petrology and geochemistry of Cretaceous to Recent volcanism in Colombia: the magmatic history of an accretionary plate margin, *J. Geol. Soc.*, 141(3), 473–486, doi:10.1144/gsjgs.141.3.0473.
- McElhinny, M. W., and P. L. McFadden (1997), Palaeosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database, *Geophys. J. Int.*, 131(2), 240–252, doi:10.1111/j.1365-246X.1997.tb01219.x.
- McElhinny, M. W., and P. L. McFadden (2000), *Paleomagnetism, Continents and Oceans*, International Geophysics, 2nd ed., Academic Press, San Diego.
- McElhinny, M. W., P. L. McFadden, and R. T. Merrill (1996), The time-averaged paleomagnetic field 0–5 Ma, *J. Geophys. Res.*, 101(B11), 25007–25027.
- McElhinny, M. W., and R. T. Merrill (1975), Geomagnetic secular variation over the past 5 m.y., *Rev. Geophys.*, 13(5), 687–708.
- McFadden, P. L., and M. W. McElhinny (1984), A physical model for paleosecular variation, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 78, 809–830.
- McFadden, P. L., and M. W. McElhinny (1988), The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in palaeomagnetism, *Earth Plan. Sci. Letts.*, 87(1-2), 161–172, doi:10.1016/0012-821X(88)90072-6.
- McFadden, P. L., R. T. Merrill, and M. W. McElhinny (1988), Dipole/Quadrupole Family Modeling of Paleosecular Variation, *J. Geophys. Res.*, 93(B10), 11583–11588.
- McFadden, P. L., R. T. Merrill, M. W. McElhinny, and S. Lee (1991), Reversals of the Earth's Magnetic Field and Temporal Variations of the Dynamo Families, *J. Geophys. Res.*, 96(B3), 3923–3933, doi:10.1029/90JB02275.
- Meissnar, R. O., E. R. Flueh, F. Stibane, and E. Berg (1976), Dynamics of the active plate boundary in southwest Colombia according to recent geophysical measurements, *Tectonophysics*, 35(1–3), 115–136, doi:10.1016/0040-1951(76)90032-9.

- Mejia, V., R. W. Barendregt, and N. D. Opdyke (2002), Paleosecular variation of brunhes age lava flows from British Columbia, Canada, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *3*(12), 8801, doi:10.1029/2002GC000353.
- Mejia, V., H. Böhnell, N. D. Opdyke, M. A. Ortega-Rivera, J. K. W. Lee, and J. J. Aranda-Gomez (2005), Paleosecular variation and time-averaged field recorded in late Pliocene–Holocene lava flows from Mexico, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *6*(7), Q07H19, doi:10.1029/2004GC000871.
- Mejia, V., N. D. Opdyke, J. F. Vilas, B. S. Singer, and J. S. Stoner (2004), Plio-Pleistocene time-averaged field in southern Patagonia recorded in lava flows, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *5*, Q03H08, doi:10.1029/2003GC000633.
- Merrill, R. T., M. W. McElhinny, and P. L. McFadden (1998), *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle*, International Geophysics, 1st ed., Academic Press, New York.
- Merrill, R. T., and P. L. McFadden (2003), The geomagnetic axial dipole field assumption, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *139*(3-4), 171–185, doi:10.1016/j.pepi.2003.07.016.
- Miki, M., H. Inokuchi, S. Yamaguchi, J. Matsuda, K. Nagao, N. Isezaki, and K. Yaskawa (1998), Geomagnetic paleosecular variation in Easter Island, the southeast Pacific, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *106*(1-2), 93–101, doi:10.1016/S0031-9201(97)00106-4.
- Mitchell, R. J., D. J. Jaeger, J. F. Diehl, and P. E. Hammond (1989), Palaeomagnetic Results From the Indian Heaven Volcanic Field, South-Central Washington, *Geophys. J. Int.*, *97*(3), 381–390.
- Monsalve, M. L. (1991), Geoquímica y dataciones de episodios tipo San Vicente en el volcán Puracé, *Bol. Geol. Ingeominas*, *33*(1-3), 3–16.
- Monsalve, M. L. (2000), *Catálogo de las volcanitas Neógenas de Colombia, Fascículo Formación Coconuco*, Catálogo de las volcanitas Neógenas de Colombia, Informe interno, INGEOMINAS, Bogotá.
- Monsalve, M. L., and B. Pulgarín (1993), Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Puracé, *Revista Ingeominas*, *2*, 3–27.
- Monsalve, M. L., and B. Pulgarín (1999), Cadena volcánica de los Coconucos (Colombia), centros eruptivos y productos recientes, *Bol. Geol. Ingeominas*, *37*(1-3), 17–51.
- Naranjo, J. L. (2005), *Modelo de Evolución Morfotectónica del Sistema de Fallas de Romeral entre Pereira (Risaralda) y Filadelfia (Caldas)*, Cuadernos de Investigación 12, Universidad de Caldas, Manizales.
- Naranjo, J. L., and P. A. Ríos (1989), Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos, *Revista Universidad de Caldas*, *10*(1-3), 113.
- Nelson, W. H. (1962), Contribución al conocimiento de la Cordillera Central de Colombia sección entre Ibagué y Armenia, *Bol. Geol. Ingeominas*, *10*(13), 161–202.
- Opdyke, N. D., M. Hall, V. Mejia, K. Huang, and D. A. Foster (2006), Time-averaged field at the equator: Results from Ecuador, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *7*(Q11005), doi:10.1029/2005GC001221.
- Opdyke, N. D., D. V. Kent, K. Huang, D. A. Foster, and J. P. Patel (2010), Equatorial paleomagnetic time-averaged field results from 0–5 Ma lavas from Kenya and the latitudinal variation of angular dispersion, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *11*(Q05005), doi:10.1029/2009GC002863.

- Opdyke, N. D., and V. Mejia (2004), Earth's magnetic field, in *Timescales of the Paleomagnetic Field*, vol. 145, edited by D. V. Kent, W. Lowrie, and J. G. Meert, pp. 315–320, AGU, Washington, D. C.
- Opdyke, N. D., and R. Musgrave (2004), Paleomagnetic results from the Newer Volcanics of Victoria: Contribution to the Time Averaged Field Initiative, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5(Q03H09), doi:10.1029/2003GC000632.
- Parra, E., and M. Velásquez (2002), *Geología de la Plancha 447 Ipiales y 447bis Tallambí escala 1:100.000. Mapa geológico y memoria explicativa*, INGEOMINAS, Bogotá.
- Pennington, W. D. (1981), Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonics of Northwestern South America, *J. Geophys. Res.*, 86(B11), 10753–10770, doi:10.1029/JB086iB11p10753.
- Pérez, G. (1980), Evolution geológica de la Subcuenca del Alto Patia; Departamento del Cauca, Colombia, *Geol. Norand.*, 2, 3–10.
- Pinilla, A., P. A. Ríos, B. P. Rodríguez, J. J. Sánchez, B. Pulgarín, C. A. Borrero, and H. J. Roa (2008), El Neógeno Volcánico en el Altiplano Nariñense, suroccidente Colombiano, *Geología Colombiana*, 33, 69–78.
- Pulgarín, B., M. L. Monsalve, M. M. Arcila, and H. Cepeda (1994), Actividad histórica y actual del Volcán Puracé, *Bol. Geol. Ingeominas*, 34(2-3), 39–53.
- Quidelleur, X., J. Carlut, P. Tchilinguirian, A. Germa, and P. Gillot (2009), Paleomagnetic directions from mid-latitude sites in the southern hemisphere (Argentina): Contribution to time averaged field models, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 172(3-4), 199–209, doi:10.1016/j.pepi.2008.09.012.
- Quidelleur, X., J. P. Valet, V. Courtillot, and G. Hulot (1994), Long-term geometry of the geomagnetic field for the last five million years: An updated secular variation database, *Geophys. Res. Lett.*, 21(15), 1639–1642, doi:10.1029/94GL01105.
- Ramos, V. A. (1999), Plate tectonic setting of the Andean Cordillera, *Episodes - News magazine of the International Union of Geological Sciences*, 22(3), 183–190.
- Roberts, G. O. (1972), Dynamo Action of Fluid Motions with Two-Dimensional Periodicity, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 271(1216), 411 – 454, doi:10.1098/rsta.1972.0015.
- Schaefer, S. J. (1995), Nevado del Ruiz Volcano, Colombia: Magmatic system and evolution, Ph.D Thesis, Arizona State University, Phoenix, December.
- Sierra, G. M. (1998), Las Rocas como Brújulas Fósiles, *Rev. Univ. EAFIT*, 112, 101–112.
- Sierra, G. M., J. J. Estrada, and W. D. MacDonald (1995), Estudios Paleomagnéticos en rocas Terciarias en la cuenca del río Cauca, departamento de Caldas: Implicaciones Tectónicas, *Rev. Univ. EAFIT*, 100, 79–110.
- Stern, C. R. (2004), Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting, *Rev. Geol. Chile*, 31(2), 161–206, doi:10.4067/S0716-02082004000200001. [online] Available from: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0716-02082004000200001&script=sci_arttext

- Stone, D. B., and P. W. Layer (2006), Paleosecular variation and GAD studies of 0–2 Ma flow sequences from the Aleutian Islands, Alaska, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7(Q04H22), 23 PP., doi:2006 10.1029/2005GC001007 [Citation].
- Taboada, A., C. Dimaté, and A. Fuenzalida (1998), Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción, *Física de la Tierra*, (10), 111–148. [online] Available from: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=124572>
- Tanaka, H., K. Kawamura, K. Nagao, and B. F. Houghton (1997), K-Ar ages and paleosecular variation of direction and intensity from Quaternary lava sequences in the Ruapehu Volcano, New Zealand, *J. Geomag. Geoelec.*, 49(4), 587–599.
- Tanaka, H., N. Komuro, and G. M. Turner (2009), Palaeosecular variation for 0.1–21 Ka from the Okataina Volcanic Centre, New Zealand, *Earth Planets Space*, 61, 213–225.
- Tanaka, H., G. M. Turner, B. F. Houghton, T. Tachibana, M. Kono, and M. O. McWilliams (1996), Palaeomagnetism and chronology of the central Taupo Volcanic Zone, New Zealand, *Geophysical Journal International*, 124(3), 919–934, doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb05645.x.
- Tassara, A., C. Swain, R. Hackney, and J. Kirby (2007), Elastic thickness structure of South America estimated using wavelets and satellite-derived gravity data, *Earth Plan. Sci. Letts.*, 253(1–2), 17–36, doi:10.1016/j.epsl.2006.10.008.
- Tauxe, L. (1998), *Paleomagnetic Principles and Practice*, Springer, New York.
- Tauxe, L. (2005), Inclination flattening and the geocentric axial dipole hypothesis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233(3–4), 247–261, doi:10.1016/j.epsl.2005.01.027. [online] Available from: <http://magician.ucsd.edu/~ltauxe/CV/reprints/tauxe05.pdf>
- Tauxe, L. (2010), *Essentials of Paleomagnetism*, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California. [online] Available from: <http://magician.ucsd.edu/Essentials/>
- Tauxe, L. (2011), *PmagPy*, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92093-0220, USA. [online] Available from: <http://magician.ucsd.edu/Software/PmagPy/index.html>
- Tauxe, L., C. G. Constable, C. L. Johnson, A. A. P. Koppers, W. R. Miller, and H. Staudigel (2003), Paleomagnetism of the southwestern U.S.A. recorded by 0–5 Ma igneous rocks, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(4), 8802, doi:10.1029/2002GC000343. [online] Available from: <http://magician.ucsd.edu/~ltauxe/CV/reprints/tauxe03b.pdf>
- Tauxe, L., P. Gans, and E. A. Mankinen (2004a), Paleomagnetism and Ar-40/Ar-39 ages from volcanics extruded during the Matuyama and Brunhes Chrons near McMurdo Sound, Antarctica, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, doi:10.1029/2003GC000656.
- Tauxe, L., K. P. Kodama, and D. V. Kent (2008), Testing corrections for paleomagnetic inclination error in sedimentary rocks: A comparative approach, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 169(1–4), 152–165, doi:10.1016/j.pepi.2008.05.006. [online] Available from: <http://magician.ucsd.edu/~ltauxe/CV/reprints/tauxe08.pdf>

- Tauxe, L., N. Kylstra, and C. Constable (1991), Bootstrap Statistics for Paleomagnetic Data, *J. Geophys. Res.*, *96*(B7), 11723–11740, doi:199110.1029/91JB00572.
- Tauxe, L., C. Luskin, P. Selkin, P. Gans, and A. Calvert (2004b), Paleomagnetic results from the Snake River Plain: Contribution to the time-averaged field global database, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *5*(Q08H13), doi:10.1029/2003GC000661. [online] Available from: <http://magician.ucsd.edu/~ltauxe/CV/reprints/tauxe04d.pdf>
- Tauxe, L., H. Staudigel, and J. R. Wijbrans (2000), Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from La Palma in the Canary Islands, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, *1*(9), 1038, doi:10.1029/2000GC000063. [online] Available from: <http://magician.ucsd.edu/~ltauxe/CV/reprints/tauxe00b.pdf>
- Thouret, J. C., J. M. Cantagrel, R. Salinas, and A. Murcia (1990), Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia), *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *41*(1-4), 225–251, doi:10.1016/0377-0273(90)90090-3.
- Torres, M. P. (1997), Aporte al Conocimiento de la Geología y la Estratigrafía de la Formación Popayán Departamento del Cauca, *Novedades Colombianas*, *7*, 4–27. [online] Available from: <http://museo.unicauca.edu.co/revista/%E2%80%9Cnovedades-colombianas%E2%80%9D-no-7-enero-de-1997>
- Torres, M. P., M. L. Monsalve, B. Pulgarín, and H. Cepeda (1999), Caldera del Paletará: Aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila (Colombia), *Bol. Geol. Ingeominas*, *37*(1-3), 1–15.
- Torres, M. P., M. L. Monsalve, B. Pulgarín, and G. E. Toro V. (2011), Caldera de Paletará: Fuente de un voluminoso vulcanismo riolítico en la Cordillera Central de Colombia, in *Memorias XIV Congreso Latinoamericano de Geología y XIII Congreso Colombiano de Geología*, Medellín, Colombia.
- Udagawa, S., H. Kitagawa, A. Gudmundsson, O. Hiroi, T. Koyaguchi, H. Tanaka, L. Kristjansson, and M. Kono (1999), Age and magnetism of lavas in Jökuldalur area, Eastern Iceland: Gilsá event revisited, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *115*(2), 147–171, doi:10.1016/S0031-9201(99)00073-4.
- Vandamme, D. (1994), A new method to determine paleosecular variation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, *85*(1-2), 131–142, doi:10.1016/0031-9201(94)90012-4.
- Vatin-Pérignon, N., P. Goemans, R. A. Oliver, and E. Parra (1990), Evaluation of magmatic processes for the products of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia from geochemical and petrological data, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, *41*(1-4), 153–176, doi:10.1016/0377-0273(90)90087-V.
- Velandia, F., E. Salazar, B. Pulgarín, H. Forero, and G. Hincapié (2008), Estratigrafía de los Depósitos Volcánicos del Altiplano Nariñense, Colombia, *Geología Colombiana*, *33*, 89–100.
- Wilson, R. L. (1970), Permanent Aspects of the Earth's Non-dipole Magnetic Field over Upper Tertiary Times, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, *19*(4), 417–439, doi:10.1111/j.1365-246X.1970.tb06056.x.
- Yamamoto, Y., K. Shimura, H. Tsunakawa, T. Kogiso, K. Uto, H. G. Barszczus, H. Oda, T. Yamazaki, and E. Kikawa (2002), Geomagnetic paleosecular variation for the past 5 Ma in the Society Islands, French Polynesia, *Earth Planets Space*, *54*(7), 797–802.

Yoshihara, A., and Y. Hamano (2000), Intensity of the Earth's magnetic field in late Archean obtained from diabase dikes of the Slave Province, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 117(1-4), 295–307, doi:10.1016/S0031-9201(99)00103-X.

Zijderveld, J. (1967), AC desmagnetization of rocks: Analysis of results, in *Methods in Paleomagnetism*, pp. 254–286, Elsevier B.V., Amsterdam.