



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Variaciones paleoseculares y campo geomagnético promedio en lavas del volcán Cerro Bravo y cerro Gallinazo

Yadira Alexandra Cubides Gallego

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química

Manizales, Colombia

2020

Variaciones paleoseculares y campo geomagnético promedio en lavas del volcán Cerro Bravo y cerro Gallinazo

Yadira Alexandra Cubides Gallego

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias-Física

Directora:

Dra. Victoria Mejía

Grupo de Investigación:

Magnetismo y Materiales Avanzados

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química

Manizales, Colombia

2020

A mis padres, Amanda y Manuel

Agradecimientos

Empiezo agradeciendo a mis padres por todas sus enseñanzas buscando siempre hacerme una persona más merecedora de habitar este planeta, especialmente a mi madre por su admirable vocación.

De manera especial agradezco a mi directora de tesis Victoria Mejía por brindarme su apoyo y confianza para la realización de este proyecto, así como el hecho de permitirme participar en él.

Mis sinceros agradecimientos al Dr. Joseph Meert, director del Laboratorio de Paleomagnetismo del departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de la Florida por concederme la oportunidad de acceder a los equipos y espacios para realizar las mediciones correspondientes a la investigación.

Agradezco al profesor Andrés Rosales y al Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados por su colaboración con la caracterización magnética realizada.

Esta investigación pudo llevarse a cabo con el apoyo económico otorgado por la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, la convocatoria nacional para el apoyo a proyectos de investigación y creación artística 2017-2018 de la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales (DIMA) y la convocatoria nacional apoyo a tesis de maestría de la Universidad Nacional de Colombia.

Resumen

Se presentan resultados paleomagnéticos para análisis de campo geomagnético promediado en el tiempo (TAF) y variaciones paleoseculares de doce sitios muestreados entre lavas y flujos piroclásticos, del volcán Cerro Bravo y el cerro Gallinazo. De acuerdo a estudios radiométricos previos las edades están entre 200a y 1.8Ma. 96 núcleos en total, se sometieron a desmagnetización por campo alterno (AF). Se realizó análisis de componente principal y cálculo de la dirección media por sitio. Ocho de los sitios pasaron todos los criterios de selección aplicados, según estos criterios seis sitios tienen polaridad normal y tres son transicionales. Dos de los sitios fueron completamente remagnetizados por rayos y otro de los sitios fue afectado por meteorización. La dispersión de los polos geomagnéticos virtuales (VGPs) coincide con la esperada para el modelo G, pero tiene un alto rango de incertidumbre.

Palabras clave: Variaciones paleoseculares, campo geomagnético promedio, Paleomagnetismo, Cerro Bravo

Paleosecular variations and average geomagnetic field in lavas from Cerro Bravo volcano and Gallinazo dome

Abstract

Paleomagnetic results are presented for time-averaged geomagnetic field analysis (TAF) and paleosecular variations from twelve sites sampled between lava and pyroclastic flows from Cerro Bravo volcano and Gallinazo mountain. According to previous radiometric studies the ages are between 200Y and 1.8MY. A total of 96 cores were subjected to alternating-field (AF) demagnetization. Main component analysis and calculation of the average direction per site was performed. Seven of the sites passed all the selection criteria applied, according to these criteria six sites have normal polarity and three sites are transitional. Two of the sites were completely re-magnetized by lightning and one of the sites was affected by weathering. The dispersion of the virtual geomagnetic poles (VGPs) coincides with the dispersion expected for the G model, but has a high range of uncertainty.

Keywords: Paleosecular variations, TAF, paleomagnetism, Cerro Bravo.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIV
Introducción	1
1. Metodología	5
1.1 Trabajo de campo.....	5
1.2 Trabajo de laboratorio.....	8
1.3 Análisis Magnético.....	9
1.4 Análisis de componente principal.....	10
1.5 Cálculo de la dirección media, polos geomagnéticos virtuales (VGPs) y variación paleosecular en lavas.....	11
2. Resultados	13
2.1 Estadísticas Paleomagnéticas	13
2.2 Afectación de las muestras por IRM	19
2.3 Correlacion magnetoestratigráfica	26
2.4 Variaciones paleoseculares del campo geomagnético.....	27
3. Discusión	29
4. Conclusiones	31
5. Trabajos futuros	33
A. Anexo: Conceptos	34
Bibliografía	39

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Mapa localización sitios de muestreo 1 y 2, recuadro rojo delimita el área de los sitios 3 a 12 (siguiente mapa).....	6
Figura 1-2: Mapa localización sitios de muestreo 3 a 12. Volcán Cerro Bravo.	7
Figura 1-3: Núcleos y muestras cortadas para el sitio 3.	8
Figura 1-4: Ciclo de histéresis que muestra los parámetros a obtener.....	10
Figura 2-1: Direcciones de los especímenes de los sitios 3, 10 y 12.....	14
Figura 2-2: Diagrama de proyección de áreas iguales para los sitios de estudio.	17
Figura 2-3: Gráficos Zijderveld para cuatro muestras diferentes.	20
Figura 2-4: Gráficas de la magnetización normalizada vs el tratamiento.....	21
Figura 2-5: Proyección de áreas iguales de las direcciones de todas las muestras del sitio 4.	22
Figura 2-6: Grafica de k vs Máximos de Intensidad de NRM.....	23
Figura 2-7: Diagrama Day para todos los sitios.....	24
Figura 2-8: Curvas de histéresis para dos de los sitios muestreados.....	25
Figura 2-9: Correlación magnetoestratigráfica.	26
Figura 2-10: Dispersión de los VGPs comparada con la dispersión para el modelo G.	27

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Información de los sitios muestreados.....	7
Tabla 2-1: Estadísticas paleomagneticas para los sitios muestreados.	16
Tabla 2-2: Resultados de estadísticas paleomagnéticas para los grupos de sitios.....	18
Tabla 2-3: Parámetros de la curva de histéresis usados para la caracterización mediante el diagrama Day.....	24

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
$B = \mu_0 H$	Inducción magnética	$T = kg/As^2$
B_c	Coercitividad	$T = kg/As^2$
B_{cr}	Coercitividad de remanencia	$T = kg/As^2$
I	Inclinación magnética	rad
k	Parámetro de precisión de las medidas	-
Ma	Millones de años	-
M_r	Magnetización de remanencia	A/m
M_s	Magnetización de saturación	A/m
S	Desviación angular estándar	rad

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α_{95}	Cono de confianza del 95%	rad
λ	Latitud geográfica	rad
χ_{hf}	Susceptibilidad de campo alto	-

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>AF</i>	<i>Campo alterno</i>
<i>E</i>	<i>Este</i>
<i>EW</i>	<i>Este-Oeste</i>
<i>GAD</i>	<i>Dipolo Axial Geocentrico</i>
<i>GPS</i>	<i>Sistema de Posicionamiento Global</i>
<i>IRM</i>	<i>Magnetización Remanente Isotermal</i>
<i>NRM</i>	<i>Magnetización Remanente natural</i>
<i>NW</i>	<i>Noreste</i>
<i>N-W</i>	<i>Norte-Este</i>
<i>MAD</i>	<i>Maxima Desviación Angular</i>
<i>MD</i>	<i>Multidominio</i>
<i>PSD</i>	<i>pseudomonodominio</i>

Abreviatura	Término
<i>PCA</i>	<i>Análisis de Componente Principal</i>
<i>SD</i>	<i>Monodominio</i>
<i>TAF</i>	<i>Campo Promediado en el Tiempo</i>
<i>TRM</i>	<i>Magnetización Termorremanente</i>
<i>VGP</i>	<i>Polo Geomagnético Virtual</i>
<i>VRM</i>	<i>Magnetización Remanente Viscosa</i>
<i>VSM</i>	<i>Magnetómetro de Muestra Vibrante</i>

Introducción

El campo magnético de la Tierra, a lo largo del tiempo, ha sido de gran interés para la ciencia y de gran importancia para la vida en el planeta. Se conoce que el campo magnético terrestre ha sufrido varios cambios de polaridad gracias al registro de orientaciones pasadas que guardan los minerales magnéticos. Aun cuando se ha avanzado en la concepción del campo geomagnético, se tienen interrogantes que surgen principalmente de las inversiones y la magnitud. Se estima un promedio de 250.000 años por polaridad, norte o sur. Sin embargo, el planeta ha conservado la misma polaridad durante los últimos 780.000 años. En cuanto a la magnitud, el campo geomagnético ha disminuido aproximadamente un 10% desde 1830 cuando fue medido por primera vez. Se han desarrollado simulaciones del campo geomagnético, modelos físicos en laboratorio y se han realizado observaciones satelitales que registran la superficie terrestre, que ayudan al conocimiento del campo magnético terrestre (Glatzmaier, 2005).

Hasta la actualidad se ha tenido considerable progreso acerca de su comportamiento y características, la variación de la dirección y de su magnitud. Aun así, muchos estudios del campo magnético terrestre en el pasado, se ven obstaculizados porque los datos paleomagnéticos no son suficientes. Las rocas que se solidifican mediante un rápido enfriamiento, es decir, que adquirieron magnetización termorremanente (TRM), proveen información instantánea del campo magnético en el pasado, este es, el campo magnético presente en el momento del emplazamiento. Por esta razón la mayor parte de la información que se conoce del campo geomagnético en el pasado corresponde a flujos de lava (Constable, 2011 y Hulot, 2010).

No se tienen muchos estudios de las variaciones paleoseculares que contengan información de polaridad, declinación e inclinación para la región del noroccidente

suramericano. En Sánchez et al. (2016) se realizó el estudio de campo geomagnético promediado en el tiempo y variaciones paleoseculares en lavas de la región centro y occidente de Colombia, incluyendo flujos del volcán Cerro Bravo y del cerro Tesorito. En el presente trabajo se realizaron muestreos en el cerro Gallinazo, el cual es contiguo a Tesorito, y en el volcán Cerro Bravo, en flujos no muestreados anteriormente. Por lo anterior se puede considerar este trabajo como una continuación de Sánchez et al. (2016). En el presente estudio se reportan resultados paleomagnéticos principalmente del volcán Cerro Bravo como aporte al conocimiento de la estratigrafía del volcán. Se utilizaron estrictos criterios de selección de los datos paleomagnéticos, similares a los empleados en otros estudios, para tratar de filtrar de forma objetiva datos espurios (Mejía et al., 2002, 2004, 2005, Tauxe, 2000).

La tectónica y geología de la zona de estudio corresponde a la región volcánica que ha sido interpretada como producto de la interacción entre las placas Caribe, Nazca y Suramérica y las micro placas Coiba y Panamá (Pennington, 1979; Taborda et al., 2000). El vulcanismo de la región norte de la cordillera de los Andes se asocia al margen continental activo ocasionado por la subducción de la placa Nazca bajo la mini placa del Bloque Andino (Bohórquez et al., 2005). El volcán Cerro Bravo y el cerro Gallinazo se encuentran localizados en la cordillera central, dentro de la cadena volcánica Machín - Cerro Bravo.

El volcán Cerro Bravo se localiza en el páramo de Letras en jurisdicción del municipio de Herveo en el departamento de Tolima, al norte del volcán Nevado del Ruíz, siendo uno de los volcanes más septentrionales de la cadena volcánica Machín - Cerro Bravo. Está clasificado como estrato volcán andesítico-dacítico y alcanza 4050 msnm, el volcán es interceptado por tres fallas; NW y EW de tipo normal, y N-E de rumbo. Su basamento es formado por rocas metamórfitas paleozoicas del Grupo Cajamarca y por rocas intrusivas terciarias de composición granodiorítica pertenecientes al stock de Manizales (Monsalve, 1991).

Conformado por dos calderas alimentadas por la misma cámara magmática, Cerro Bravo presenta una migración de la actividad volcánica desde el sur hacia el norte, de esta manera la actividad volcánica más reciente se sitúa en la caldera norte en la cual se ubica un complejo de domos (Herd, 1975). Según Lescinsky (1990), estos domos fueron emplazados hace aproximadamente 200 años. La caldera sur que se encuentra

parcialmente destruida en el norte, cuenta con remanentes de domo y la formación de esta caldera se dio entre 14.000 y 3000 años atrás. Hacia el sur de estas dos calderas se puede ver una caldera más antigua, allí se encuentra evidencia de actividad volcánica de edad Pleistoceno tardío, lavas de 50000 ± 50 Ka datadas por Thouret (Monsalve, 1991).

El cerro Gallinazo se eleva aproximadamente 2700 msnm y se ubica en el municipio de Villamaría (Caldas), al noroeste del volcán Nevado del Ruíz y al suroeste del Volcán Cerro Bravo, dentro de un campo volcánico *sensu stricto* denominado por Botero (2018) como Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termaleles, el cual es conformado por catorce volcanes y está asociado al sistema de fallas Villamaría-Termaleles. El basamento del campo volcánico está conformado por rocas metamórficas Triásicas del Complejo Cajamarca, rocas volcanoclásticas Cretácicas del Complejo Quebradagrande, rocas miloníticas Cretácicas del Guacaica y unidades ígneas Paleógenas del Stock de Manizales y del Batolito de El Bosque (Botero et al., 2018). El emplazamiento del domo Gallinazo se asocia a la falla Villamaría-Termaleles y se ubica en el intervalo entre 1,8 y 0.97 Ma (Calabriense – Pleistoceno Tardío) (Mejía et al. 2012).

Esta investigación se presenta de manera secuencial en el presente texto, iniciando por la descripción de la metodología en el capítulo uno, los resultados en el capítulo dos, la discusión y conclusiones en los capítulos tres y cuatro.

1. Metodología

1.1 Trabajo de campo

Una vez en campo, fueron identificados los afloramientos para el muestreo, tratando de seleccionar flujos de lava o flujos piroclásticos que fueran accesibles. Los sitios escogidos para realizar el muestreo fueron afloramientos de edades geológicamente recientes, que no estuvieran afectados por fallas y a los cuales se pudiera acceder por camino o carretera. Se muestrearon en total 12 sitios (figura 1-1), dos de los cuales fueron muestreados en el sector de Gallinazo localizados sobre carreteras; mientras que diez afloramientos muestreados en Cerro Bravo (figura 1-2) tienen un acceso de mayor dificultad, para los cuales fue necesario subir el equipo de muestreo en mulas. La información de los sitios de estudio se encuentra en la tabla 1-1.

De cada sitio se extrajeron de 8 a 10 núcleos de 2.5 cm de diámetro y aproximadamente 8 cm de longitud (Figura 1-3). En total, 106 especímenes fueron utilizados en este estudio. Para el muestreo se utilizó un taladro con motor de motosierra marca STIHL adaptado a una broca con punta diamantada y a una bomba de agua para la lubricación durante la extracción del núcleo. A cada núcleo se le realizó la orientación geográfica antes de retirarlo del cuerpo rocoso, utilizando una unidad de orientación, la cual permite conocer la inclinación y se adapta a una brújula que indica la declinación magnética. Realizado lo anterior se procedió a retirar y rotular los núcleos indicando la dirección obtenida con la unidad de orientación. En todos los sitios de muestreo se registraron las coordenadas y altura con un equipo de posicionamiento global (GPS), configurado de acuerdo al esferoide WGS84.

Figura 1-1: Mapa localización sitios de muestreo 1 y 2, recuadro rojo delimita el área de los sitios 3 a 12 (siguiente mapa).



El intervalo de tiempo de muestreo fue de tres meses aproximadamente. En total tomó nueve días para realizar el muestreo en campo (entre septiembre 19 de 2018 y enero 5 de 2019). Uno de los factores que más influyó en el tiempo para realizar el muestreo fueron las difíciles condiciones climáticas, dado que la mayor parte del tiempo se encontraba lloviendo y completamente nublado.

Figura 1-2: Mapa localización sitios de muestreo 3 a 12. Volcán Cerro Bravo.

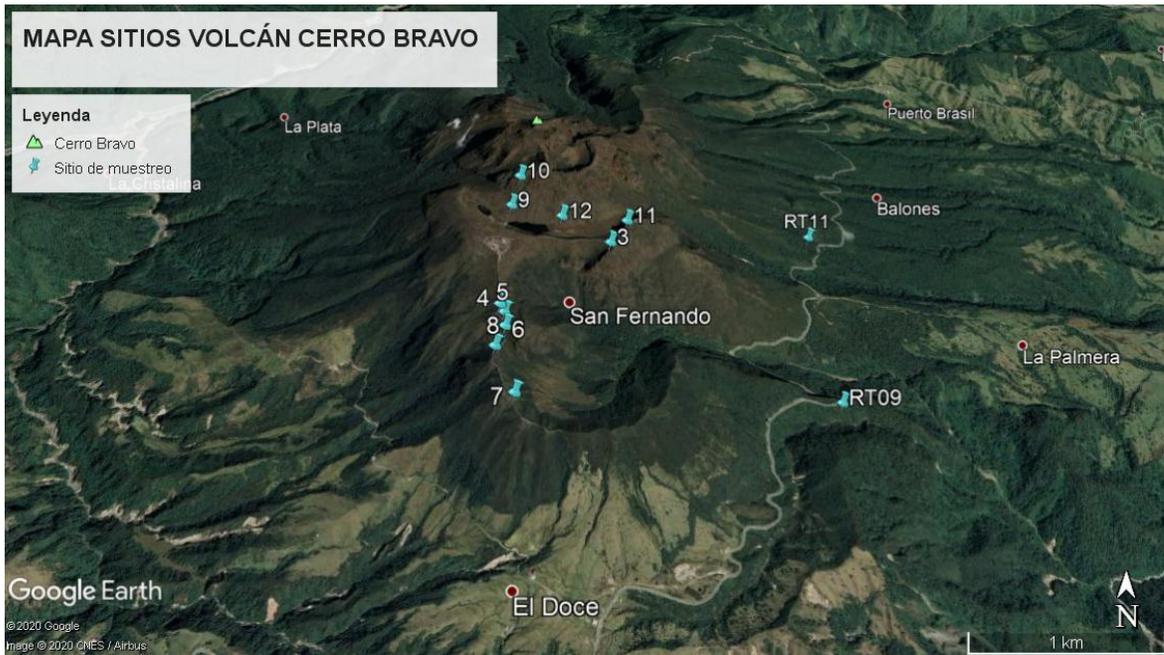


Tabla 1-1: Información de los sitios muestreados.

Sitio	Lat., N	Long., E	ALT (msnm)	Estructura geológica	Identificación vulcanológica	Ref.	Edad(Ma)	Ref. edad
YAC2	5.020	-75.437	2210	Cerro Gallinazo	Flujo de lava	-	1,8 ± 0,1 a 0,97 ± 0,05	3, 4
YAC3	5.020	-75.437	3876	Volcán Cerro Bravo	Flujo piroclástico	2	-	-
YAC4	5.085	-75.289	3870	Volcán Cerro Bravo	Remanente de domo (lava)	1	0.014 - <0.003	1
YAC5	5.081	-75.294	3860	Volcán Cerro Bravo	Remanente de domo (lava)	1	0.014 - <0.003	1
YAC6	5.081	-75.293	3851	Volcán Cerro Bravo	Remanente de domo (lava)	1	0.014 - <0.003	1
YAC7	5.080	-75.293	3639	Volcán Cerro Bravo	Lava	-	-	-
YAC8	5.077	-75.293	3844	Volcán Cerro Bravo	Lava	-	-	-
YAC9	5.079	-75.294	3885	Volcán Cerro Bravo	Lava	2	<0.0002	2
YAC10	5.087	-75.293	3956	Volcán Cerro Bravo	Domo (lava)	2	<0.0002	2
YAC11	5.088	-75.293	3921	Volcán Cerro Bravo	Flujo piroclástico	-	-	-
YAC12	5.086	-75.288	3862	Volcán Cerro Bravo	Lava	2	<0.0002	2

Referencias: 1, Monsalve, (1991), 2, Lescinsky, (1990), 3, Botero et. al, (2018), 4, Martínez et al. (2014). (-) sin información.

1.2 Trabajo de laboratorio

De cada núcleo se cortaron especímenes de aproximadamente 1.2 cm de largo (Figura 1-3), utilizando la parte del núcleo que se encontraba más interna en el cuerpo rocoso, esto con el fin de reducir la probabilidad de que las muestras utilizadas en el estudio estuvieran alteradas magnéticamente por meteorización. Para realizar los cortes se dispuso de una cortadora eléctrica con disco diamantado.

Figura 1-3: Núcleos y muestras cortadas para el sitio 3.



El análisis paleomagnético se realizó en el laboratorio de paleomagnetismo del departamento de ciencias geológicas de la Universidad de Florida. Los equipos utilizados fueron un desmagnetizador a campo alterno DTech 2000 AF, y un magnetómetro criogénico 2G, ubicados en un cuarto escudado para evitar influencia de campos magnéticos externos.

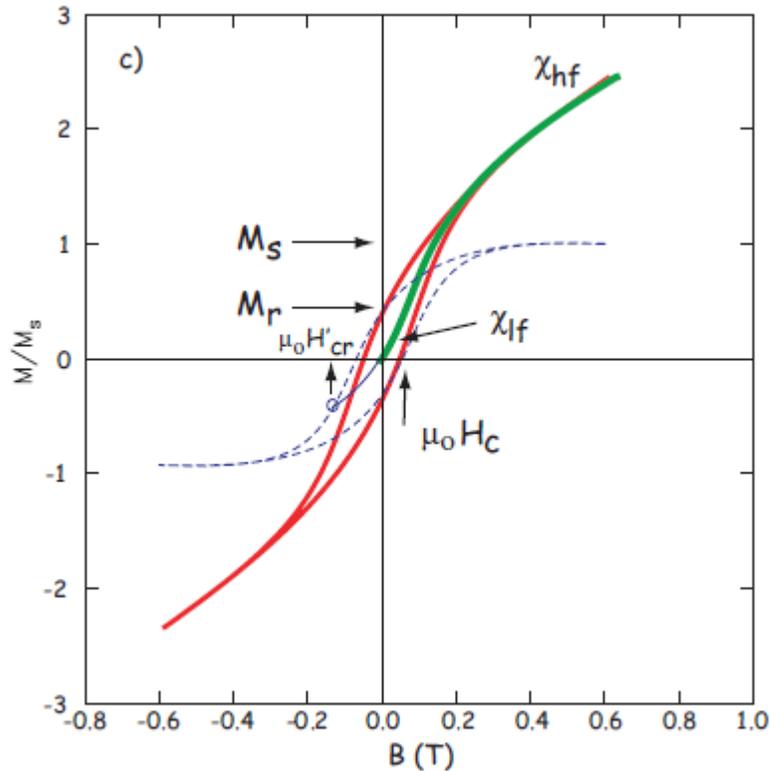
Se utilizó un magnetómetro criogénico inicialmente para obtener la intensidad de la magnetización remanente natural (NRM) (anexo A-4). El magnetómetro cuenta con tres sensores ubicados perpendicularmente que miden el vector magnético de la muestra. Con estos datos y con los datos tomados en campo, el software del magnetómetro calcula declinación, inclinación e intensidad de la magnetización. Para encontrar la componente principal de la magnetización primaria, se realizó desmagnetización por campo alterno (anexo A-7). Esta se llevó a cabo en una serie de pasos, entre 12 y 15 pasos. Se hicieron medidas en el magnetómetro después de cada paso de desmagnetización, iniciando con una intensidad de campo de 10 mT e incrementando el valor del campo en cada paso hasta que los valores de la intensidad magnética de la muestra se acercaran a cero. Los pasos de la desmagnetización utilizados fueron 10, 20, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 y 130 mT. Para la mayoría de las muestras se logró remover la magnetización remanente viscosa (VRM) (anexo A-6) o magnetización isothermal debida a rayos, en los primeros tres pasos de desmagnetización. En algunas muestras no se logró medir la NRM debido a que se saturaba el magnetómetro. Este comportamiento obedece a que la muestra debió haber adquirido magnetización remanente isothermal, dichas muestras tenían altos valores de intensidad que saturaban la capacidad de medición del magnetómetro. Algunas de estas muestras se pudieron medir solo a partir del tercer paso de desmagnetización.

1.3 Análisis Magnético

Se realizó una caracterización magnética para la cual se empleó un magnetómetro de muestra vibrante VSM Versalab marca Quantum Design, adscrito al Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Esta caracterización magnética se hizo para cada sitio procurando utilizar una parte de la matriz de la roca. También se realizaron curvas de histéresis para fenocristales de plagioclasa de algunas muestras. A las curvas de histéresis obtenidas se les hizo una corrección para eliminar la contribución paramagnética (figura 1-4). Con este procedimiento se buscaba obtener datos de magnetización de saturación (M_s), Magnetización de remanencia (M_r), coercitividad (B_c), coercitividad de remanencia (B_{cr})

y susceptibilidad de campo alto (χ_{hf}). Conocidos estos datos, se realizó el análisis de las estructuras multidominio (MD), pseudomonodominio (PSD) y monodominio (SD) mediante un diagrama Day (Day et al., 1977).

Figura 1-4: Ciclo de histéresis que muestra los parámetros a obtener.



La pendiente inicial de la línea verde indica la susceptibilidad de campo bajo (χ_{lf}), después de la saturación la pendiente indica la susceptibilidad de campo alto (χ_{hf}). El ciclo en azul con línea discontinua muestra la curva de histéresis restada la contribución paramagnética. M_s y M_r indican la magnetización de saturación después de la corrección paramagnética y la magnetización de remanencia. $\mu_0 H_c$ es el campo coercitivo y $\mu_0 H_{cr}$ la coercitividad de remanencia. Imagen tomada de Tauxe (2010).

1.4 Análisis de componente principal

Para una primera interpretación de los resultados de la desmagnetización por campo alterno, se realizaron gráficos Zijdeveld y estereogramas de proyección de áreas

iguales, los cuales permiten observar el comportamiento de la desmagnetización progresiva, si se tiene una o más componentes de magnetización. La corrección de la declinación local se realizó según el Campo de Referencia Geomagnética Internacional (IGRF): la 12a generación (Thébault, 2015).

En el análisis de componente principal (PCA) se recurrió al método estadístico desarrollado por Kirschvink (1980). Este calcula la mejor recta de ajuste de los datos de las direcciones obtenidas en la desmagnetización; permite conocer la dirección de la componente primaria, i.e. declinación, inclinación, y la medida de precisión del mejor ajuste lineal dada por la máxima desviación angular (MAD). Se determinaron los criterios de selección que ayudan a reconocer la información correcta acerca de las muestras que tienen una contribución paleomagnética primaria. Para el cálculo de la dirección de la componente primaria, se utilizaron mínimo 5 pasos de desmagnetización forzando la línea pasar por el origen, pero sin incluirlo como punto de datos, con un $MAD \leq 5$. En la mayoría de las muestras se usaron entre 11 y 13 pasos de la curva de desmagnetización para este cálculo.

1.5 Cálculo de la dirección media, polos geomagnéticos virtuales (VGPs) y variación paleosecular en lavas.

En este estudio se consideraron los criterios de selección utilizados por Mejía et al. (2002), Mejía et al. (2005), propuestos por Tauxe et al. (2000) y McElhinny y McFadden (1979). Se utilizaron al menos 3 especímenes para el cálculo de la dirección media por sitio, y se descartaron muestras que tuvieran en el análisis de componente principal un $MAD \geq 5$. La dirección media se obtuvo empleando el software IAPD y Pmag, los cuales emplean estadística de Fisher (Fisher, 1953) para datos con una distribución fisheriana o el método bootstrap paramétrico (Tauxe et al., 1991) para una distribución no fisheriana. Mediante diagramas de proyección de áreas iguales se visualizó gráficamente la dirección de cada muestra. Con esto, se descartaron las muestras con direcciones considerablemente diferentes a las direcciones de las demás muestras del sitio. Después se calculó la dirección media por sitio obteniendo así el parámetro de precisión k , el cono de confianza de 95%, y la declinación e inclinación media.

Siguiendo la metodología anterior, se calculó la dirección media con las direcciones medias de todos los sitios para diferentes grupos de sitios, los sitios utilizados fueron aquellos que tenían un $\alpha_{95} < 10^\circ$, criterio utilizado por Opdyke, 2006. Se comparó la dirección media por cada conjunto de sitios con la dirección esperada para el modelo GAD y la dirección esperada del modelo GAD más 5% cuadrupolo (ver anexo A-1).

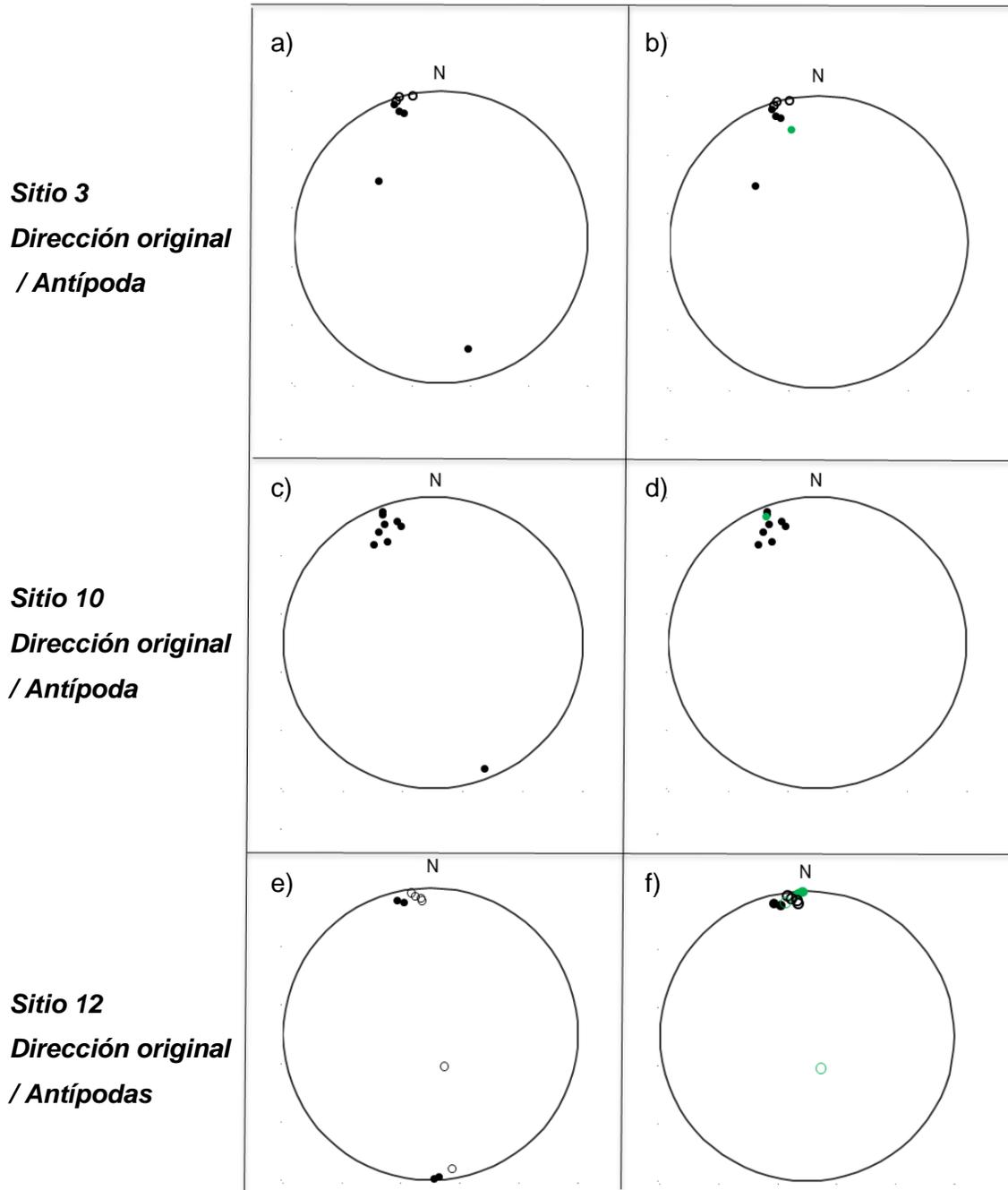
Se calcularon los VGPs para todos los sitios de estudio con la dirección del campo geomagnético media obtenida y la ubicación geográfica del sitio. También se calculó el VGP para cada conjunto de sitios. Para este cálculo se empleó nuevamente el software Pmag.

El análisis de la variación secular se realizó mediante el cálculo de la desviación estándar (S) de los polos paleomagnéticos de los grupos de sitios con relación al polo norte geográfico (latitud 90 grados), con el método descrito por Merrill et al. (1996) y Johnson y Constable (1995). Se calcularon los límites de confianza del 95% de la desviación angular estándar siguiendo el método descrito por Cox (1969).

2. Resultados

2.1 Estadísticas Paleomagnéticas

De tres de los 12 sitios muestreados, se encontró que algunas de sus muestras tenían una dirección perfectamente antípoda. En la figura 2-1 se puede observar el diagrama de proyección de áreas iguales para estos tres sitios, cada diagrama muestra la dirección para todas las muestras colectadas en cada sitio. La columna izquierda del gráfico muestra las direcciones de las muestras para sus respectivos sitios, una de las muestras con dirección antípoda corresponde al sitio 3, otra corresponde al sitio 10 y tres al sitio 12. En la columna derecha se muestran nuevamente las direcciones de las muestras de estos mismos sitios, pero con el cálculo de la dirección diametralmente opuesta de las que se muestran como antípodas (círculo verde). Utilizando la dirección antípoda de estas muestras mejoraba el valor del α_{95} y se incrementaba el número de muestras para realizar el cálculo de la dirección media.

Figura 2-1: Direcciones de los especímenes de los sitios 3, 10 y 12.

En la primera columna de la figura 2-1, a, c y e, se observan las direcciones obtenidas para todas las muestras del sitio 3, 10 y 12 respectivamente. La segunda columna de la figura b, d y f, se muestran nuevamente las direcciones obtenidas

para las muestras de los sitios 3, 10, y 12, pero esta vez con el cálculo de la dirección invertida para las muestras que se encuentran aparentemente antípodas (círculos verdes).

Este fenómeno ha sido estudiado por diversos autores (Bina et al., 1999; David J. Dunlop, 2010; Heller et al., 1986; Nagata et al., 1952). Según Butler (1992) la autoinversión es una ocurrencia poco común que se da en aproximadamente el 1% de las rocas ígneas de polaridad inversa.

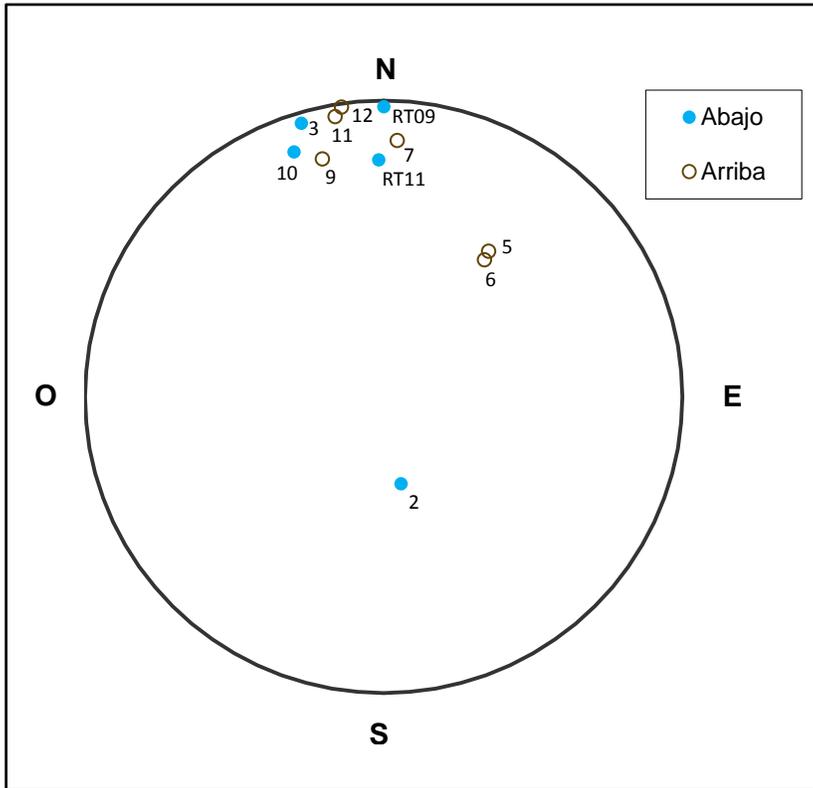
De los 12 sitios muestreados, 6 tienen polaridad normal (Sitios 3, 7, 9, 10, 11 y 12) y tres fueron interpretados como transicionales (Sitios 2, 5 y 6). Los resultados de la dirección media de estos sitios se aprecian en la proyección de áreas iguales (figura 2-2). Todos los que tienen polaridad normal se ubican en el volcán Cerro Bravo. De estos 6 sitios con excepción del sitio 12, se encontró que tienen distribución fisheriana (ver anexo A-10). Tres de los sitios muestreados no clasificaron dentro de los criterios de selección a nivel de muestra y sitio (sitios 1, 4, y 8). En los sitios 4 y 8, no se logró obtener una dirección media debido a afectación por IRM. Las muestras del sitio 1 estaban completamente meteorizadas, y su NRM mostraba una intensidad de la magnitud por debajo de los valores de magnetización que suelen presentar las rocas volcánicas (aprox. 0.03 A/m). Se descartaron en total seis de los sitios muestreados para realizar los cálculos de dirección media en adelante. En la tabla 2-1 se aprecian los resultados del cálculo de la dirección media por sitio y los polos paleomagnéticos.

Tabla 2-1: Estadísticas paleomagnéticas para los sitios muestreados.

Sitio	Lat, N	Long, E	N	n	P	Dir. Media				VGP	
						Dec	Inc	k	α_{95}	lat, N	long, E
YAC1	4,9940	-75,4247	10	-	-	-	-	-	-	-	-
YAC2	5,0200	-75,4373	10	5	T	168,9	63,0	248	4,9	-39,5	294,8
YAC3	5,0848	-75,2896	8	6	N	343,4	3,3	162	5,3	73,1	183,6
YAC4	5,0815	-75,2940	8	-	-	-	-	-	-	-	-
YAC5	5,0811	-75,2938	10	5	T	35,6	-35,6	98	7,8	47,1	51,1
YAC6	5,0805	-75,2937	8	3	T	35,8	-38,6	56	7^{16}	45,8	53,5
YAC7	5,0777	-75,2932	8	6	N	2,9	-12,6	146	5,6	78,2	90,5
YAC8	5,0797	-75,2941	8	-	-	-	-	-	-	-	-
YAC9	5,0868	-75,2938	8	6	N	345,7	-15,4	193	4,8	70,8	152,6
YAC10	5,0880	-75,2934	9	6	N	340,1	10,7	180	5	70,2	196,5
YAC11	5,0859	-75,2889	9	5	N	349	-5,6	97	6,8	76,5	159,3
YAC12	5,0861	-75,2916	10	6	N	353,1	0,2	144	6,1	81,5	159

Las columnas de izquierda a derecha son: nombre del sitio, latitud, longitud, N: número de núcleos muestreados en campo, n: número de muestras consideradas para el cálculo de la dirección media, declinación media, inclinación media, k: parámetro de precisión, α_{95} , polos geomagnéticos virtuales: latitud (norte) y longitud (este). Sitios 4 y 8 sin resultados. (-) sin información.

Figura 2-2: Diagrama de proyección de áreas iguales para los sitios de estudio.



Proyección de áreas iguales de los sitios muestreados más dos sitios de Sánchez et al. (2016); los vectores magnéticos que apuntan hacia arriba se muestran mediante los círculos no sombreados y los vectores que apuntan hacia abajo mediante los círculos azules.

Al aplicar el criterio de Vandamme (1994), se obtuvo el ángulo de corte y se descartaron sitios con latitudes de VGPs que estuvieran por debajo de 61.9° . De acuerdo a este criterio tres de los sitios (sitios 2, 5 y 6), son de polaridad transicional, los sitios 2 y 5 tienen un $k > 50$ y un $\alpha_{95} < 10$, cumpliendo de esta manera con los criterios de selección. El sitio 6 en cambio tiene un α_{95} que sale de los criterios utilizados.

Se hicieron diferentes combinaciones de los sitios para obtener la dirección media de las medias de los sitios (Tabla 2-2). Algunos de los sitios del estudio de Sánchez et al. (2016) fueron considerados en este estudio dado que comprometen la misma región, dos de dichos sitios se ubican en Cerro Bravo y los demás pertenecen a la misma cadena volcánica (Cerro Bravo – Machin). Se calculó la dirección media para los siguientes grupos de sitios:

- A. Seis sitios de este estudio más dos sitios de Sánchez et. al (2016), todos ubicados en Cerro Bravo y de polaridad normal (sitios 3, 7, 9, 10, 11, 12, RT09 y RT11).
- B. Seis sitios de este estudio más todos los sitios con polaridad normal de Sánchez et. al (2016).
- C. Ocho sitios de este estudio incluidos dos que indican ser transicionales, más dos sitios de Sánchez et. al (2016) todos correspondientes a Cerro Bravo.

En la tabla 2-2 se muestran los resultados de la dirección media para el grupo de sitios, polos geomagnéticos virtuales VGPs, la dispersión angular del VGP y la coincidencia con los modelos GAD y GAD más 5% cuadrupolo. Ninguno de los grupos de sitios coinciden con el GAD, dos de los grupos de sitios muestran coincidencia con el GAD más 5% cuadrupolo.

Tabla 2-2: Resultados de estadísticas paleomagnéticas para los grupos de sitios.

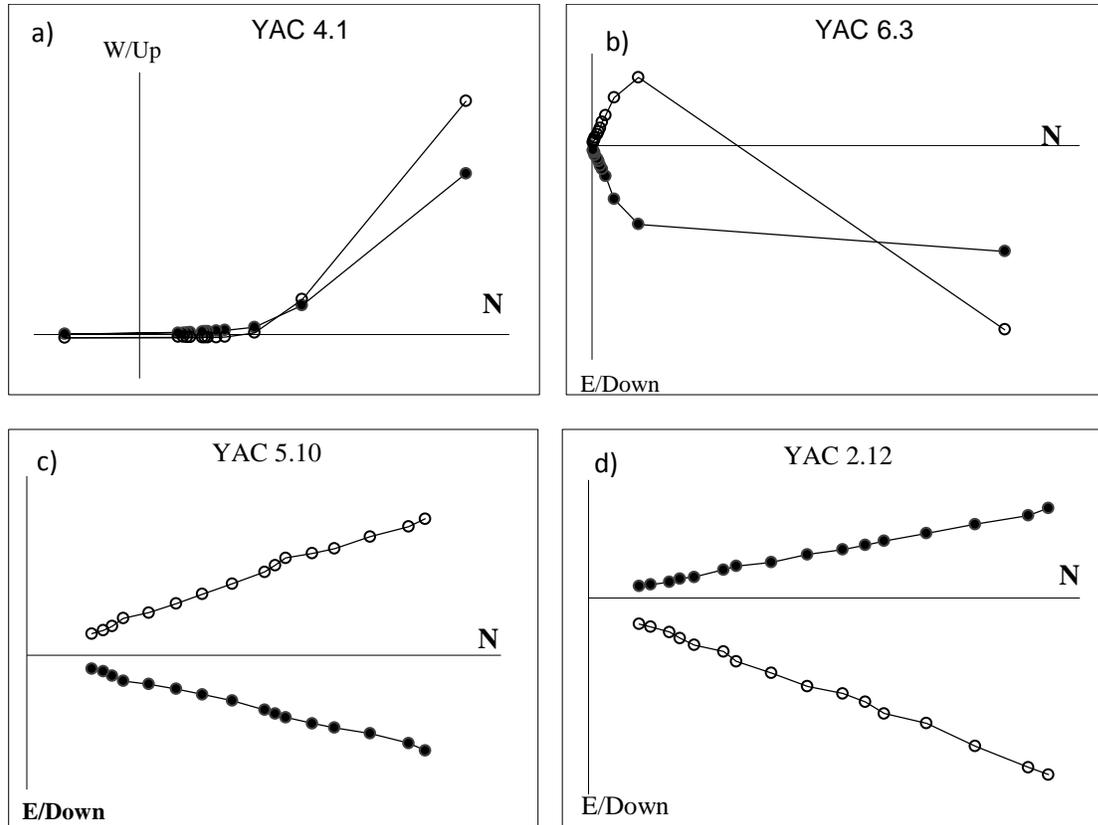
Grupo sitios	Lat media	Long	Dec	Inc	N	k	α_{95}	VGPs			Dispersión estándar			Coincidencia	
								Lat, N	Long, E	S	Su	SI	GAD	GAD +5%cuad.	
A	5.084944	-75.288851	351.4	0.1	8	34	9.7	80.0	164.1	14.7	21.7	11.1	NO	NO	
B	4.949525	-75.366065	1.6	4.4	43	23	4.6	86.8	74.4	13.1	15.4	11.5	NO	SI	
C	5.084128	-75.289836	358.5	-7.7	10	10	16.2	81.0	111.1	24.3	34.3	18.8	NO	SI	

Columnas de izquierda a derecha: conjunto de sitios, latitud promedio, longitud promedio, declinación media, Inclinación media, número de sitios en el cálculo N, parámetro de precisión k, polos paleomagnéticos: Latitud y longitud, dispersión S, límite superior Su, límite inferior SI, coincidencia con los modelos GAD y GAD más 5% cuadrupolo.

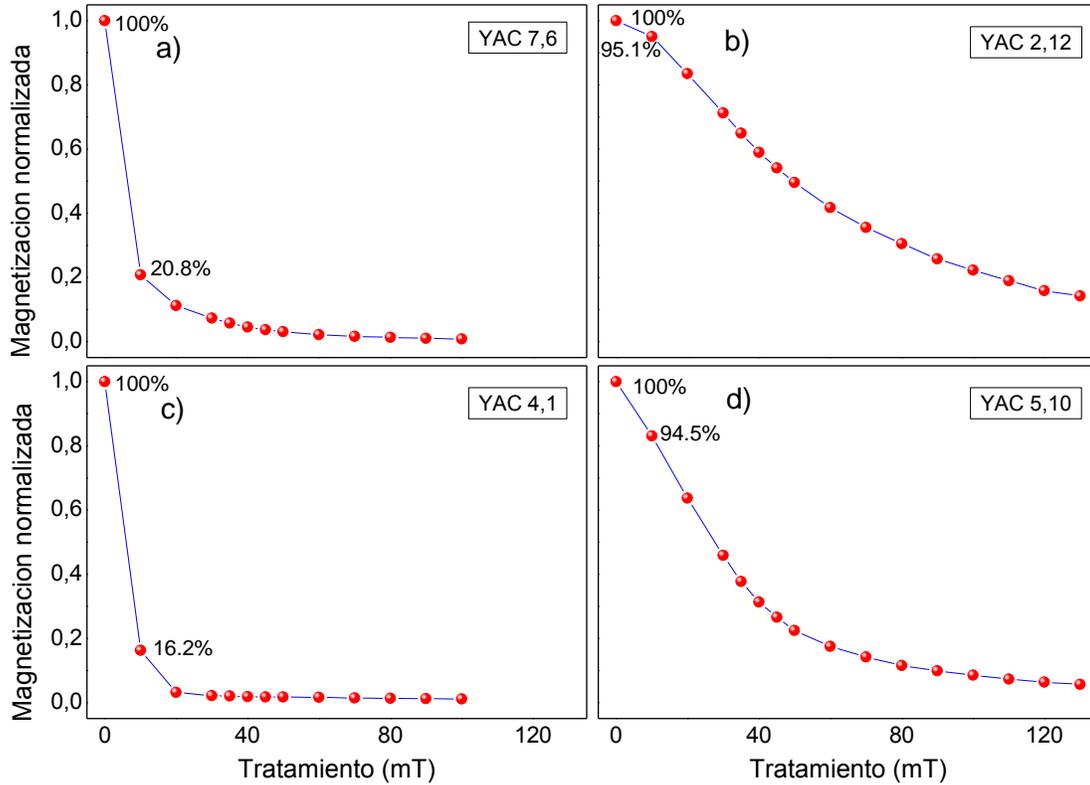
2.2 Afectación de las muestras por IRM

Dos factores que indican cuando una muestra ha sido impactada por un rayo son la dispersión en las direcciones de la NRM, y la magnetización de las muestras que presentan valores relativamente altos (ver A-2). Seis de los once sitios muestreados presentaron muestras con intensidades extremadamente altas (sitios: 4, 6, 7, 8, 9 y 11). A un total de diez muestras no fue posible medir la NRM (muestras: 4.7, 7.1, 7.2, 8.2, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 11.1 y 11.2), dado que estas intensidades estaban fuera del rango de operación del magnetómetro, en estas muestras se logró medir magnetización solo a partir del tratamiento a 10 mT, 20mT y algunas a partir del paso a 30 mT de la desmagnetización por campo alterno. La NRM de las demás muestras de dichos sitios se logró medir, sin embargo, todas presentaban valores de intensidad muy altos (figura 2-1). Estos elevados valores de intensidad unidos a la alta dispersión de NRM entre las muestras del sitio sugieren que estos sitios fueron impactados por rayos (ver anexo A-3) adquiriendo de esta manera IRM.

Mediante la desmagnetización por campo alterno se logró remover la IRM, obteniendo de esta manera la magnetización primaria para la mayoría de las muestras afectadas. Sin embargo, las muestras correspondientes a los sitios 4 y 8 se encontraban remagnetizadas completamente y no se obtuvo información importante. Durante la toda la desmagnetización estas muestran direcciones aleatorias. En la figura 2-3 se muestran cuatro gráficos Zijdeveld, dos corresponden a muestras de los sitios más afectados (muestras 4.1 y 6.3) y dos a muestras cuyas direcciones de NRM eran similares a la magnetización característica (muestras 5.10 y 2.12). En los gráficos Zijdeveld de las muestras 4.1 y 6.3 se pueden observar varias componentes de magnetización. En la figura 2-5 se muestra estereograma de áreas iguales para el sitio 4. En el estereograma se evidencia la gran dispersión entre todas las direcciones de las muestras del sitio 4. Dichas condiciones conducen a parámetros estadísticos por fuera de los criterios de selección.

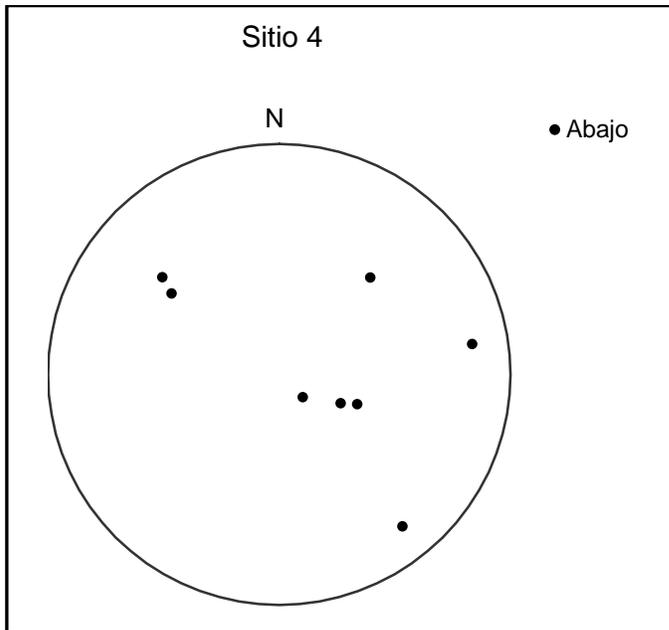
Figura 2-3: Gráficos Zijderveld para cuatro muestras diferentes.

Las figuras 2-3a y 2-3b, corresponden a los gráficos Zijderveld de dos muestras que fueron afectadas por rayos, en las cuales la dirección del tratamiento a cero difiere mucho de la dirección de la magnetización primaria. Las figuras 2-3c y 2-3d, corresponden a dos muestras de diferentes sitios que no fueron impactados, en ellas la dirección en el tratamiento cero es muy parecida a la dirección de la componente primaria de su magnetización.

Figura 2-4: Gráficas de la magnetización normalizada vs el tratamiento.

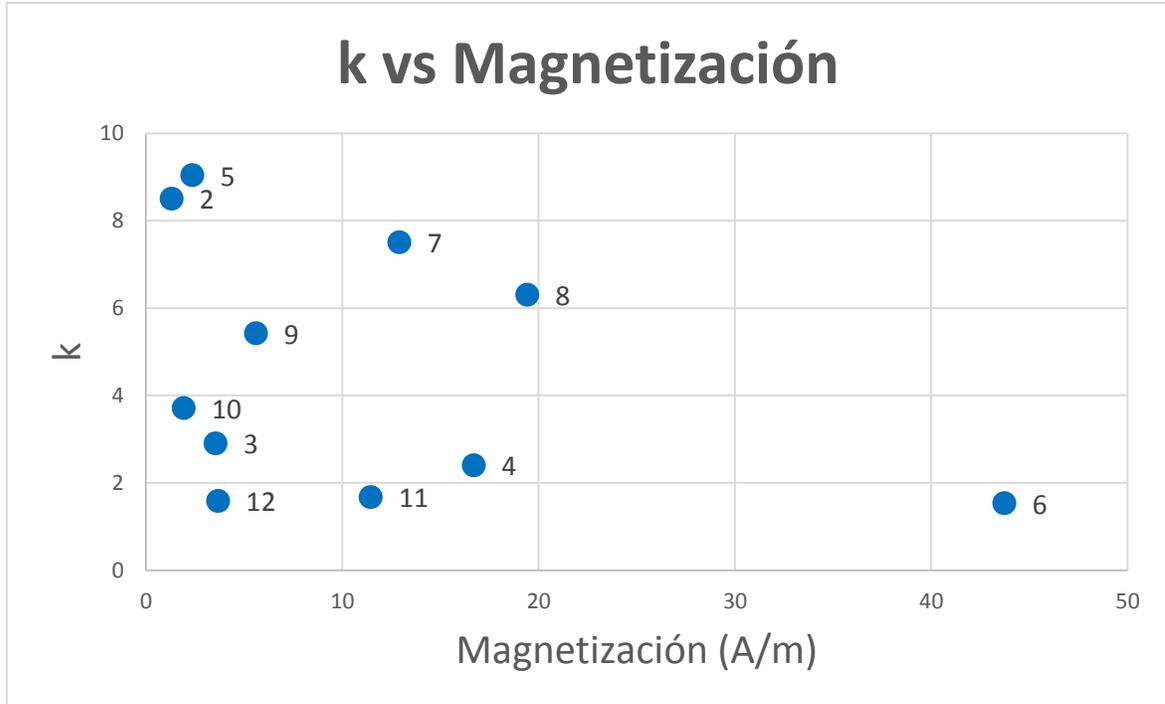
En la figura 2-4 se muestran cuatro gráficas de la curva de decaimiento de la intensidad en el proceso de desmagnetización para cuatro muestras pertenecientes a cuatro sitios. Las gráficas 2-4a y 2-4c corresponden a dos sitios afectados por IRM. Las gráficas 2-4b y 2-4d corresponden a dos sitios que no presentan IRM.

Figura 2-5: Proyección de áreas iguales de las direcciones de todas las muestras del sitio 4.



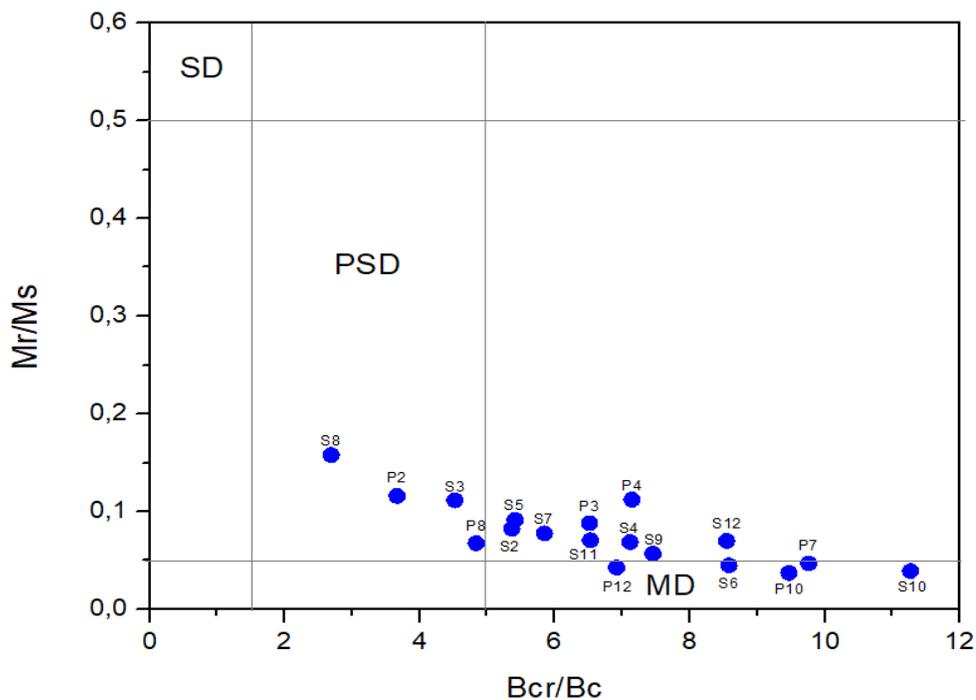
Direcciones obtenidas para todas las muestras del sitio 4, proyectadas en el estereograma de proyección de áreas iguales. Todos los vectores magnéticos obtenidos apuntan hacia abajo.

Un parámetro de utilidad para dar indicio de la afectación de las muestras por corrientes eléctricas de rayos, es la dispersión de las direcciones de la magnetización remanente natural (NRM). El parámetro de precisión k , fue calculado para todas las muestras de cada sitio sin eliminar la NRM. Teniendo en cuenta que cuando k tiende a cero hay mayor dispersión, se encontró que las muestras con intensidades más altas tenían valores de k pequeños (figura 2-6).

Figura 2-6: Grafica de k vs Máximos de Intensidad de NRM.

En la gráfica k vs Magnetización, se aprecian los valores de k obtenidos para cada sitio con las respectivas muestras sin someter al tratamiento de desmagnetización. Los valores de magnetización corresponden a los valores máximos de la magnetización original de la muestras.

En la figura 2-7 se muestra la caracterización magnética realizada utilizando el diagrama Day. El análisis magnético se realizó para algunas muestras con mayor contenido de fenocristales de plagioclasa (muestras P2, P3, P4, P7, P8, P10, P12), y para muestras sustraídas de la matriz de la roca (S2 a S12), solamente cuatro de las muestras analizadas tienen pseudo mono dominio (PSD), las demás indican multidominio (MD). Los valores obtenidos de las curvas de histéresis se muestran en la tabla 2-3. En la figura 2-8 se observan dos curvas de histéresis de dos de los sitios muestreados. La curva en rojo es la curva original y la curva en azul es la curva que se obtiene después de restar la contribución paramagnética para obtener los parámetros necesarios en la caracterización del estado de dominio.

Figura 2-7: Diagrama Day para todos los sitios.

Caracterización del estado de dominio de los minerales magnéticos contenidos por 18 de las muestras correspondientes a los 12 sitios muestreados. SD es la región para los minerales con un solo dominio, PSD la región para los minerales con pseudo mono dominio y MD región multi dominio.

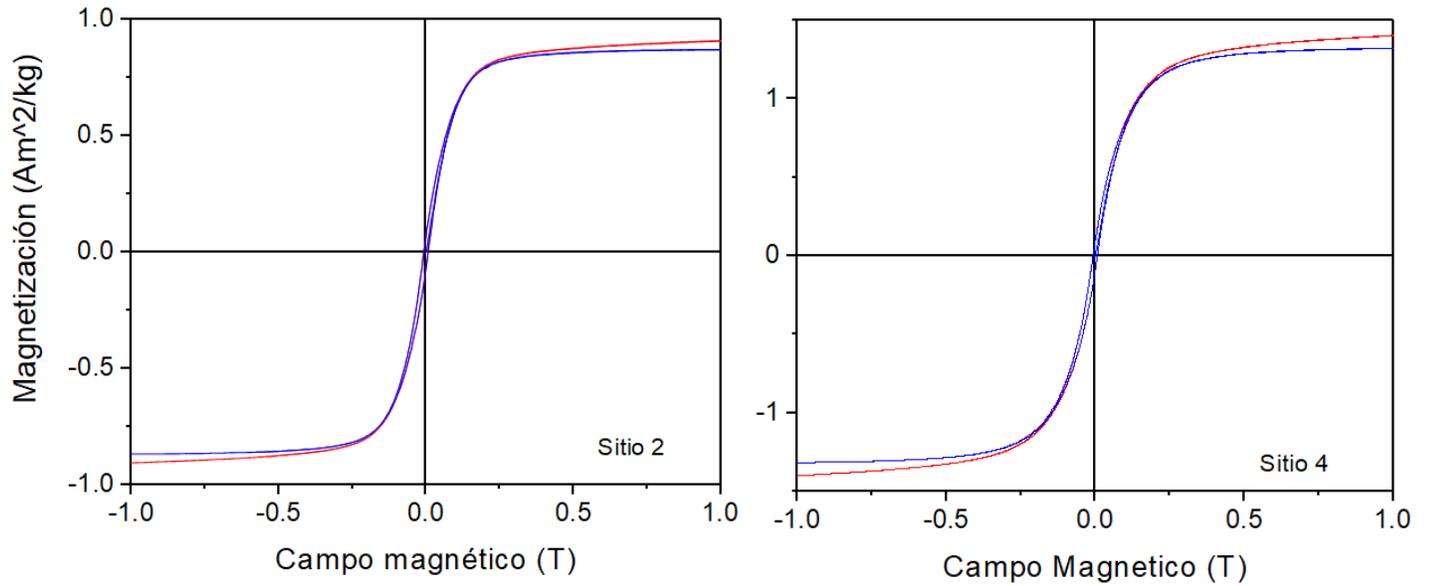
Tabla 2-3: Parámetros de la curva de histéresis usados para la caracterización mediante el diagrama Day.

Muestra	Ms (Am ²)/kg	Mr (Am ²)/kg	Bc (mT)	Bcr (mT)	Xhf	Mr/Ms
YAC2	0.87	0.07	7.32	39.31	3.00E-07	8.23E-02
P2	0.06	0.01	13.70	50.23	6.00E-08	1.16E-01
YAC3	0.22	0.02	11.36	51.42	1.71E-07	1.11E-01
P3	0.11	0.01	9.50	61.91	7.00E-08	8.80E-02
YAC4	1.32	0.09	6.85	48.77	6.00E-07	6.85E-02
P4	0.06	0.01	9.23	65.96	8.00E-08	1.12E-01
YAC5	2.18	0.20	9.84	53.28	1.00E-06	9.11E-02
YAC6	2.01	0.09	4.32	37.06	7.00E-07	4.47E-02
YAC7	1.87	0.14	6.86	40.11	9.00E-07	7.75E-02
P7	0.09	0.00	5.10	49.84	6.00E-08	4.65E-02
YAC8	1.56	0.25	18.90	50.95	1.00E-06	1.58E-01
P8	0.07	0.00	12.48	60.43	1.00E-09	6.74E-02

YAC9	0.93	0.05	5.43	40.47	1.39E-06	5.67E-02
YAC10	0.99	0.04	3.68	41.48	7.00E-07	3.88E-02
P10	0.03	0.00	6.57	62.25	4.00E-08	3.68E-02
YAC11	0.83	0.06	8.83	57.67	9.00E-07	7.06E-02
YAC12	1.20	0.08	5.95	50.86	1.22E-06	6.97E-02

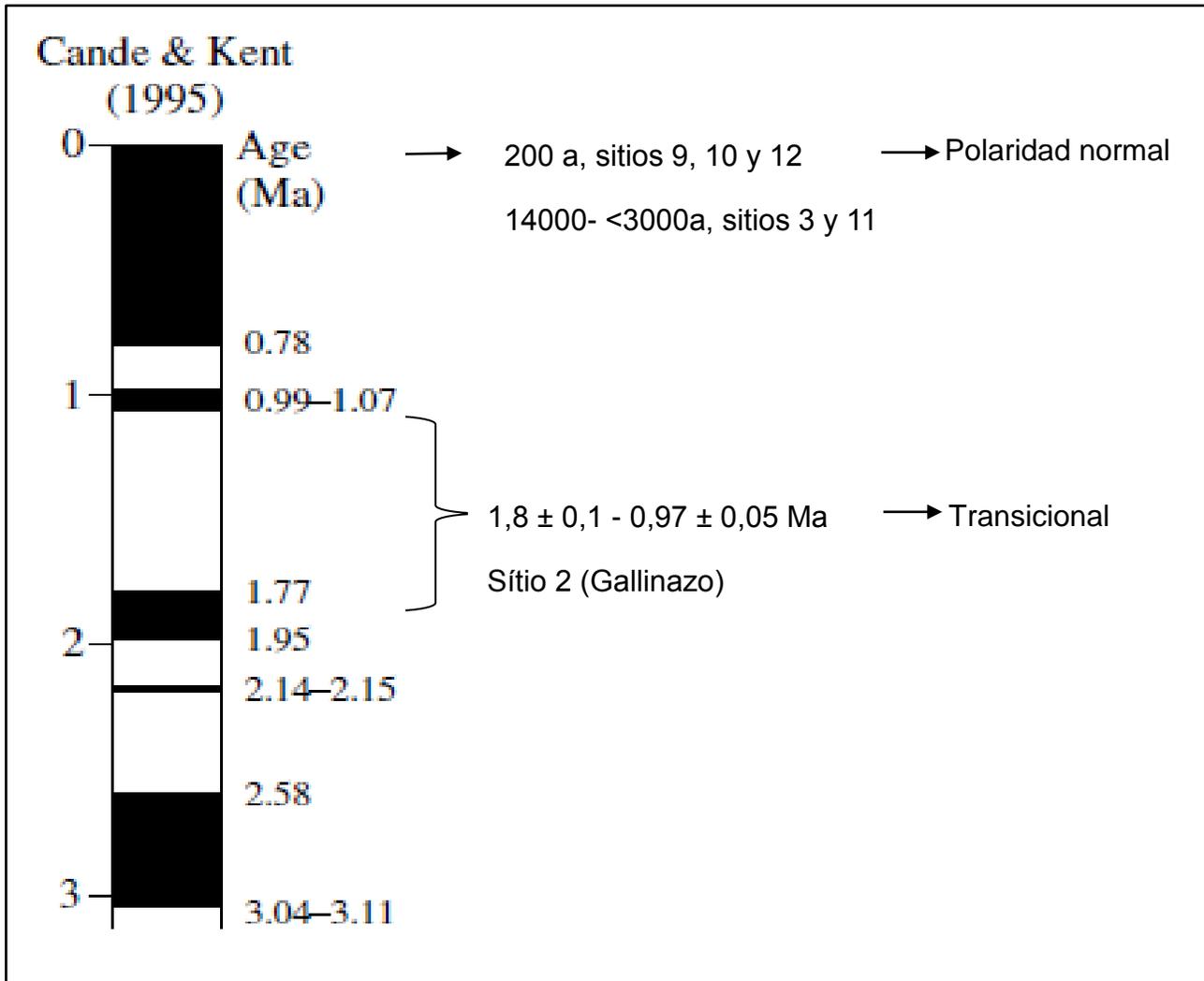
Tabla con datos de la caracterización magnética, Ms, magnetización de saturación, Mr, magnetización de remanencia, Bc, coercitividad, Bcr, coercitividad de remanencia, Xhf, coercitividad de campo alto.

Figura 2-8: Curvas de histéresis para dos de los sitios muestreados. En rojo la curva original y en Azul con la corrección paramagnética.



2.3 Correlacion magnetoestratigráfica

Figura 2-9: Correlación magnetoestratigráfica.

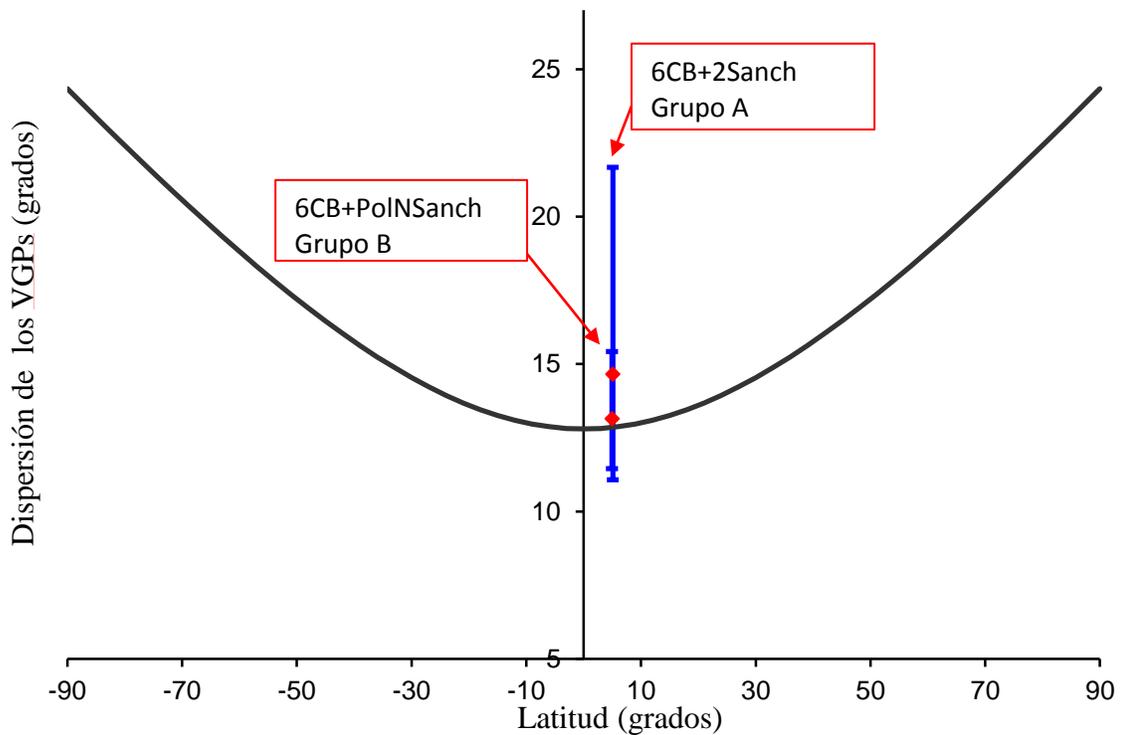


En la figura 2-9 se aprecia la relación entre la escala de tiempo de polaridad magnética por Cande y Kent (1995), la edad de los sitios consultada en la literatura y la polaridad encontrada en el presente estudio. En la figura se puede observar una coincidencia entre la polaridad obtenida, la edad reportada y la escala de tiempo de polaridad magnética, esto es, polaridad normal para los sitios

ubicados en el volcán Cerro Bravo, de edades correspondientes a los últimos 780.000 años, y polaridad transicional para el sitio 2, ubicado en Gallinazo.

2.4 Variaciones paleoseculares del campo geomagnético

Figura 2-10: Dispersión de los VGPs comparada con la dispersión para el modelo G.



La dispersión de los VGPs calculada para los grupos de sitios A y B (puntos en rojo) y el rango de incertidumbre (barras azules) para cada una, fue comparada con la dispersión para el modelo G (curva en negro) (Figura 2-10). El grupo A tiene un rango de incertidumbre muy amplio, y coincide con el modelo G. La dispersión obtenida para el grupo B se acerca más al valor de la dispersión esperada para el modelo G y su incertidumbre es menor con respecto a la hallada para el grupo A.

3. Discusión

Durante la desmagnetización por campo alterno se observaron altos valores de magnetización, el rango de intensidad de la NRM está entre aproximadamente 0.5 y 44 A/m. Los sitios que no están afectados por rayos muestran una NRM promedio de 0.5 A/m, mientras que la intensidad de NRM para varias de las muestras de los sitios que fueron impactados por rayos supera los 12 A/m y alcanza hasta 44 A/m o es desconocida dado que sus valores superaban el rango de medición del magnetómetro. La evidencia de que al menos 6 de los sitios contenían IRM producida por rayos se encuentra en los valores relativamente altos de intensidad de la NRM y la alta dispersión de las direcciones en cada sitio. La dispersión evaluada por el parámetro de precisión k previa a la desmagnetización, casi siempre era alta para los sitios con intensidades altas (figura 2-5 y 2-6). Para todas las muestras con intensidades altas y k pequeños se observa que después del primer paso de la desmagnetización tienen menos del 20% de la magnetización inicial, es decir que para el segundo paso de desmagnetización habían perdido el 80% de su magnetización original (figura 2-4). Caso contrario, las muestras que no se encontraban altamente magnetizadas, las cuales presentaban intensidades alrededor de 0.5 A/m, después de la remoción de la NRM permanecía hasta un 95% de su magnetización inicial. Se eligió desmagnetización por campo alterno porque es más efectiva al borrar magnetización producida por rayos (Mejia et al., 2002, Sánchez et. al, 2016). Lo anterior se apoya además en el hecho de que se lograra eliminar la magnetización viscosa entre los primeros tres pasos de desmagnetización para los sitios que poseían información interpretable.

La caracterización magnética realizada mediante el VSM, arrojó curvas de histéresis similares entre todas las muestras. Con la información extraída de las curvas se realizó el diagrama Day, ubicando la mayoría de los minerales magnéticos contenidos por las 18 muestras en la región de granos multidominio. Solo cuatro muestras aparentan tener

granos pseudo mono domino. Por este motivo las muestras recolectadas no constituyen un buen material para realizar experimentos de Thellier (Thellier y Thellier, 1959).

Los criterios de selección para el cálculo de la dirección media para cada sitio, $\kappa \geq 50$, $\alpha_{95} \leq 10$, con al menos 5 especímenes para el cálculo, fueron superados por 8 de los sitios (2, 3, 5, 7, 9, 10, 11 y 12). Mediante la misma metodología se calculó la dirección media con la media de los sitios: grupo A, para el cual no se obtuvo coincidencia con ninguno de los modelos GAD y GAD más 5% cuadrupolo (ver anexo A); grupo B, que no coincide con el GAD pero muestra coincidencia con el GAD más 5% cuadrupolo, pero esto puede ser meramente fortuito, debido a que se promedian con los sitios de transición; el grupo C, con seis sitios de este estudio y todos los sitios de polaridad normal de Sánchez et. al. (2016) muestra coincidencia con el modelo GAD más 5% cuadrupolo pero no con el GAD, igual que en Sánchez et. al. (2016).

En cálculos posteriores 3 de los sitios presentaban ser transicionales, los cuales deben ser excluidos para obtener resultados confiables de dispersión angular del TAF y compararlos con la dispersión para el modelo G. La dispersión angular obtenida descartando los sitios transicionales, fue 14.7° , la cual se aleja de la dispersión del modelo G, 12.9° , pero de acuerdo a los límites calculados se observa un rango de incertidumbre amplio y hay coincidencia con el modelo. Este rango de incertidumbre puede deberse a que el número de datos no es suficiente o que se muestreó un periodo de tiempo corto.

4. Conclusiones

Se muestrearon 10 sitios en el volcán Cerro Bravo, al menos seis de estos 10 sitios se encuentran afectados por rayos. A cuatro de estos seis sitios se les logró remover la magnetización producida por rayos que enmascara la magnetización primaria. Cerro Bravo se ubica en una región en la cual hay alta actividad de tormentas eléctricas, sin embargo mediante desmagnetización por campo alterno es posible remover la magnetización de este tipo.

Ocho de los sitios muestreados pasaron todos los criterios de selección, seis tienen polaridad normal y dos son transicionales (sitios 2 y 5). Un sitio más aparenta ser transicional pero no pasa los criterios de selección (sitio 6). Al realizar los cálculos de la dirección media por grupo de sitios, se encontró que ningún grupo coincide con el modelo GAD. El grupo B y C coinciden con un GAD más 5% cuadrupolo.

Al realizar el cálculo de la dispersión de los VGPs para los sitios que cumplen los criterios de selección, más los dos sitios en Cerro Bravo de Sánchez et al. (2016), se encuentra coincidencia con la dispersión para esta latitud del modelo G. Sin embargo el rango de incertidumbre es muy alto. Para el grupo B (6 sitios de Cerro Bravo y todos los sitios con polaridad normal de Sánchez et al. (2016)) la dispersión encontrada es muy parecida a la dirección esperada para el modelo G.

5. Trabajos futuros

En vista de que el número de sitios muestreados fue insuficiente, para el cálculo de las variaciones paleoseculares y campo geomagnético promedio de trabajos futuros se recomienda realizar un muestreo para una mayor cantidad de sitios, en domos, lavas y flujos piroclásticos de la región volcánica comprendida entre el complejo Villamaría-Termal y el volcán San Diego.

De acuerdo a los resultados de direcciones antípodos obtenidos en varios de los sitios, se podría realizar un estudio de procesos de autoinversión de la NRM en material ígneo, especialmente en flujos de lava y piroclastos del volcán Cerro Bravo y la región volcánica circundante.

A. Anexo: Conceptos

A-1. Modelos GAD y GAD más 5% cuadrupolo

El modelo del dipolo axial geocéntrico o GAD (por sus siglas en ingles), es un modelo que considera el campo magnético terrestre producido por un dipolo en el centro que la Tierra que coincide con el eje de rotación, por el cual se relaciona la inclinación magnética con la latitud. La inclinación esperada para el GAD se obtiene a través de la llamada ecuación del dipolo:

$$\tan I = 2 \tan \lambda$$

Donde, λ es la latitud e I la inclinación.

La inclinación tiene valores de 90 en el polo norte geográfico y disminuye a cero en el Ecuador y a -90 en el polo sur geográfico. Para el GAD la declinación magnética siempre será igual a cero (Butler, 1992).

El análisis de armónicos esféricos y datos paleomagnéticos apuntan a que el campo magnético terrestre coincide con el modelo GAD en un 95%. Autores como Merrill et al. (1996) y Johnson et al., (1996) argumentan un cuadrupolo del 5% del campo magnético total.

A-2. Magnetización Remanente

La magnetización que presentan algunas sustancias en ausencia de campos magnéticos externos se conoce como magnetización remanente o espontanea. Esta magnetización es debida a la interacción entre momentos magnéticos vecinos.

A-3. Magnetización Remanente Isotermal (IRM)

La magnetización remanente isotermal producida de forma natural, ocurre cuando hay exposición a campos magnéticos fuertes en cortos lapsos de tiempo a temperatura constante, por ejemplo, el campo magnético de un rayo. Las corrientes eléctricas de los rayos pueden exceder los 10 mil amperios y el campo magnético en un metro alrededor del rayo puede ser de 10 a 100 mT. En el mundo ocurren entre 100 y 1000 rayos cada segundo, y su mayor actividad se concentra en las regiones tropicales. Existe una alta probabilidad de que un afloramiento en estas regiones haya adquirido una magnetización secundaria debida a una IRM impartida por un rayo o que haya sufrido un mayor número de impactos y se haya remagnetizado completamente, es decir que su NRM primaria se haya borrado totalmente (Butler, 1992). Mediante campo alterno es posible remover esta magnetización que enmascara la magnetización primaria si la muestra tomada se encontraba a cierta distancia del impacto del rayo, ya que, en dado caso, la IRM afecta solo los granos de baja coercitividad. Se evidencia cuando un afloramiento ha sido impactado por un rayo debido a que presenta grandes valores de intensidad comparados con la intensidad de la NRM (David J. y Dunlop, 2010).

A-4. Magnetización Remanente Natural (NRM)

La magnetización remanente natural o NRM (por sus siglas en inglés, Natural Remanent Magnetization), es la magnetización remanente que posee la roca antes de ser sometida a algún tratamiento en laboratorio. Esta magnetización depende de varios factores como: el campo magnético terrestre presente en la formación de la roca, los fenómenos físicos, químicos y el campo magnético terrestre después de la formación de la roca a lo largo de su historia. De esta manera, la NRM se conforma por un componente primario, adquirido durante la formación de la roca, y un componente secundario, adquirido después de la formación de la roca. El componente primario es el que se utiliza en la mayoría de los estudios paleomagnéticos, dado que este es el que contiene el registro del campo geomagnético del tiempo en el cual se formó la roca.

A-5. Magnetización Termorremanente (TRM)

Una forma de magnetización remanente natural es la magnetización termorremanente (TRM por sus siglas en inglés, Thermal Remanent Magnetization). Es la magnetización adquirida por enfriamiento desde una temperatura por encima de la temperatura de Curie en presencia de un campo magnético, que a altas temperaturas puede afectar la orientación de los momentos magnéticos de los granos ferromagnéticos y generar remanencia, la magnetización termorremanente es la magnetización remanente más frecuente en rocas ígneas. Por debajo de la temperatura de Curie se encuentra la temperatura de bloqueo, a la cual ocurre la transición de comportamiento paramagnético a un estado estable, es la acción del campo magnético terrestre cuando la lava está a la temperatura de bloqueo la que produce la TRM, y esta remanencia puede permanecer a lo largo del tiempo geológico a temperaturas relativamente bajas sin ser eliminada por campos magnéticos posteriores al enfriamiento de la lava.

A-6. Magnetización Remanente Viscosa (VRM)

La magnetización remanente viscosa o VRM (por sus siglas en inglés), es la magnetización remanente que adquiere la roca a lo largo del tiempo con un campo magnético débil presente después de su enfriamiento. Los momentos magnéticos de los granos con tiempo de relajación corto, cambian su alineación adquiriendo de esta manera una VRM, mientras que los granos con tiempo de relajación mayor retendrán la magnetización primaria. La VRM es una magnetización secundaria que puede afectar la magnetización adquirida durante la formación de la roca.

A-7. Desmagnetización por campo alterno (AF)

La desmagnetización por campo alterno consiste en exponer la muestra a un campo magnético oscilante para sus tres ejes ortogonales. Se aplica un campo magnético

alterno con forma de onda sinusoidal que disminuye linealmente su magnitud respecto al tiempo. De esta manera, todos los granos con coercitividads menores al campo aplicado se realinearán en direcciones opuestas a medida que el pico de campo decaiga; en un rango de coercitividads la mitad de los granos se alinean en una dirección y la mitad en la dirección contraria. La remanencia total será aproximadamente cero. El proceso de desmagnetización se realiza por pasos, aumentando gradualmente el valor de pico del campo y midiendo la NRM restante después de cada tratamiento. La desmagnetización por campo alterno borra la NRM contenida por granos de baja estabilidad.

A-8. Modelo G

Se han propuesto dos tipos de modelos para analizar la dispersión angular con la latitud, modelos paramétricos y fenomenológicos. El modelo G (McFadden et al., 1988, McElhinny y McFadden, 1997) es el único modelo basado en observaciones fenomenológicas, a diferencia de los demás modelos existentes de las variaciones paleoseculares en lavas, y es el que mejor se ajusta a las observaciones realizadas. Está basado en la teoría del dínamo (Roberts, 1972) la cual se basa a su vez en dos familias de armónicos esféricos, familia antisimétrica o dipolar con respecto al ecuador y familia simétrica o cuadrupolar respecto al ecuador. Para el presente campo magnético terrestre, se ha observado que la dispersión de los VGPs es proporcional a la latitud para latitudes menores de 70°.

A-9. Polo geomagnético virtual o VGP

Un polo geomagnético virtual o VGP (por sus siglas en inglés) o VGPs para referirse a varios, es una posición de un dipolo imaginario que corresponde a una única observación de la dirección del campo geomagnético. Posee información del campo magnético terrestre para cierta ubicación y determinado momento en el tiempo. Cuando varios VGPs son promediados el resultado se denomina polo paleomagnético.

A-10. Distribución fisheriana

La función de distribución desarrollada por R. A. Fisher, da la probabilidad de encontrar una dirección paleomagnética dentro de un área angular. La dirección es centrada en un ángulo θ desde la media real, se asigna un valor unitario y se representa mediante un punto en una esfera de radio unitario. La función de densidad de probabilidad descrita por Fisher es:

$$PdA(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh(\kappa)} * \exp(\kappa * \cos\theta)$$

Donde θ , es el ángulo desde la dirección media, y κ , es la medida de la concentración de la distribución alrededor de la dirección media. El valor de κ es igual a cero para una distribución uniforme en toda la esfera y tiende a infinito cuando las direcciones se concentran en un punto. La función de distribución tiene una cuantificación de conos de confianza del 95%, el parámetro α_{95} es el ángulo que indica que existe una probabilidad del 95% de que la dirección media verdadera se encuentre dentro del cono en la esfera.

Bibliografía

- Bina, M., Tanguy, J. C., Hoffmann, V., Prévot, M., Listanco, E. L., Keller, R., Fehr, K. T., Goguitchaïchvili, A. T., & Punongbayan, R. S., (1999). A detailed magnetic and mineralogical study of self-reversed dacitic pumices from the 1991 Pinatubo eruption (Philippines), *Geophysical Journal International*, 138(1), 159–178.
- Botero, L. A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., Grajales, J. A., (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termale, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I), Características morfológicas y relaciones temporales, *Boletín de Geología*, 40(3), 85-102.
- Bohórquez, O. P., Monsalve, M.L., Velandia, F., Gil, F., Mora, H., (2005). Marco Tectónico de la Cadena Volcánica más Septentrional de la Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Geología*, 27(1),55-79
- Butler, R. F., (1992). *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*, Blackwell Scientific Publications, Boston.
- 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.
- Constable, C. G., (2011). Modelling the geomagnetic field from syntheses of paleomagnetic data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 187(3-4), 109-117.
- Dunlop, D. J., Özdemir, Ö., (2010). *Rock Magnetism Fundamentals and Frontiers. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Day, R., Fuller, M., & Schmidt, V. A., (1977). Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13(4), 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)
- Fisher, R., (1953). Dispersion on a Sphere. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 217(1130), 295–305.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
- Glatzmaier, G. A., & Olson, P., (2005). Probing the geodynamo. *Scientific American*, 292(4), 50-57.
- Heller et al., (1986). Reversed magnetization in pyroclastics from the 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Nature*, 324(6094), 241–242.
<https://doi.org/10.1038/324241a0>

- Herd, D. G., (1975). Glacial and volcanic geology of the Ruiz-Tolima volcanic complex Cordillera Central, Colombia.
- Hulot, G., Finlay, C. C., Constable, C. G., Olsen, N., & Manda, M., (2010). The magnetic field of planet Earth. *Space science reviews*, 152(1-4), 159-222.
- Johnson, C. L., and Constable, C. G., (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.
- 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.
- Lescinsky, D. T., (1990). Geology, Volcanology, and Petrology of Cerro Bravo, a Young, Dactic, Stratovolcano in West-Central Colombia.
- Martínez, L., Valencia L., Ceballos, J., Narváez, B., Pulgarín, B., Correa, A., Navarro, S., Murcia, H., Zuluaga, I., Rueda, J., y Pardo, N. (2014). Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final, Bogotá – Manizales – Popayán. Servicio Geológico Colombiano. 853p.
- McElhinny, M. W., & McFadden, P. L., (1997). Palaeosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database. *Geophysical Journal International*, 131(2), 240-252.
- McElhinny, M. W., and P. L. McFadden (1979), Paleosecular variation over the past 5 Myr based on a new generalized database, *Geophys. J. Int.*, 131, 240–252.
- McFadden, P. L., Merrill, R. T., & McElhinny, M. W. (1988). Dipole/quadrupole family modeling of paleosecular variation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B10), 11583-11588.
- Mejía, V., Barendregt, R. W., and Opdyke N. D., (2002). Paleosecular variation of brunhes age lava flows from British Columbia, Canada, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 3(12), 8801, doi:10.1029/2002GC000353.
- Mejía, V., Opdyke, N. D., Vilas, J. F., Singer, B. S., & Stoner, J. S., (2004). Plio-Pleistocene time-averaged field in southern Patagonia recorded in lava flows. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(3).
- Mejía, V., Böhnell, H., Opdyke, N. D., Ortega-Rivera, M. A., Lee, J. K. W., and Aranda-Gomez, J. J., (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.
- Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A., Cramer, T., (2012). Análisis estructural al noreste del volcán Nevado del Ruíz, Colombia—aporte a la exploración geotérmica. *Boletín de Geología*, 34(1), 27-41.
- Merrill, R. T., McElhinny M. W., and McFadden, P. L., (1996). The Magnetic Field of the

- Earth: Paleomagnetism, the Core and the Deep Mantle, International Geophysics, 1st ed., Academic Press, New York.
- Monsalve, M. L., (1991). Mapa preliminar de amenaza volcánica del Volcán Cerro Bravo. INGEOMINAS. Manizales.
- Nagata et al., (1952). Self-reversal of thermo-remanent magnetism of igneous rocks. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 4(1), 22–38., <https://doi.org/10.5636/jgg.4.22>
- Opdyke, N. D., Hall, M., Mejia, V., Huang, K., & Foster, D. A., (2006). Time-averaged field at the equator: Results from Ecuador. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(11).
- Pennington, W., (1979). The subduction of the eastern Panamá Basin and the seismotectonics of northwestern south América. Tesis doctoral, University Wisconsin Madison, 108p
- 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.
- Sánchez-Duque, A., Mejia V., Opdyke N. D., Huang K., & Rosales A., (2016). Plio-Pleistocene paleomagnetic secular variation and time-averaged field: Ruiz-Tolima volcanic chain, Colombia, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 538–549, doi:10.1002/2015GC006149.
- Tauxe L., Kylstra N., & Constable C., (1991). Bootstrap statistics for paleomagnetic data. *Data*, 96, 723–740.
- 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.
- Tauxe, L., Staudigel, H., and Wijbrans, J. R., (2000). Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from La Palma in the Canary Islands, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 1(9), doi:10.1029/2000GC000063.
- Tauxe, L., (2010). *Essentials of paleomagnetism*. Univ of California Press.
- Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., ... & Canet, E., (2015). International geomagnetic reference field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 79.
- Thellier, E., Thellier, O., (1959). Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.* 15, 285–376.