

**ESTUDIOS MAGNÉTICOS DE SEDIMENTOS MARINOS DE LAS BAHÍAS DE
CARTAGENA Y BARBACOAS (COLOMBIA); EVIDENCIAS DEL APORTE DE
SEDIMENTOS DEL RÍO MAGDALENA A ZONAS ARRECIFALES.**

DANIELA MEJIA ECHEVERRY

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Geólogo**

Asesores:

Dr. José Fernando Duque Trujillo

Dr. Marcos Adrián E. Chaparro

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MEDELLIN, 2015**

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a las personas que de manera directa o indirecta, contribuyeron en la realización de este trabajo, en especial a:

Dr. José Duque, por quien inició el proyecto y quien me ha apoyado en todo momento. Gracias por ponerle tanta energía a este trabajo.

Dr. Chaparro, por enseñarme tanto sobre magnetismo ambiental, por compartir sus conocimientos y abrirme las puertas de su laboratorio. Por toda su paciencia y colaboración, mis más sinceros agradecimientos y admiración.

Al comité de Becas de la Universidad EAFIT en convenio con la Andi; hicieron posible mi viaje a Argentina.

Dr. Juan Darío Restrepo, por su apoyo al proyecto.

Al IFAS-Tandil, por recibirme en sus instalaciones y acogerme como una investigadora más, por compartir tantos momentos agradables conmigo.

Daniel Gargiulo, Claudio, Mariana y los niños, gracias por su compañía mientras estaba en Tandil, por la amabilidad y las lecciones de lenguaje cada día.

Anita Barrios, por su amistad mientras estaba en Argentina, por su compañía en los días fríos del laboratorio y los viajes juntas.

A Wilton, que me ayudo con tantas cosas en los laboratorios de EAFIT, gracias por los tintos y las tertulias.

Mateo Arboleda, por su valiosa amistad en estos 5 años.

Sandra Correa y Susana Vega, por los ratos de esparcimiento, por los concejos y la gran amistad.

Mi familia; padres, hermanos y las dos plaguitas, fueron mi motor siempre, por la confianza y el gran apoyo, muchas gracias.

Por último, un agradecimiento muy especial a Sergio, mi compañía incondicional, la voz de aliento de todos estos años; por lo que aguantó, por su amor y paciencia.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	Pag.
1. INTRODUCCION	7
2. OBJETIVOS	8
3. GENERALIDADES	9
3.1. LOCALIZACIÓN	9
3.2. ÁREA DE ESTUDIO	10
3.2.1. Río Magdalena y Canal del Dique	10
3.2.2. Contexto Geológico y Sedimentos.....	11
3.2.3. Dispersión de sedimentos	12
3.2.4. Tasas de sedimentación.....	14
3.3. ESTUDIOS ANTERIORES	16
4. METODOLOGIA	18
4.1. RECOLECCIÓN Y TOMA DE MUESTRAS	18
4.2. MEDICIONES MAGNÉTICAS	18
4.2.1. Susceptibilidad Magnética.....	19
4.2.2. Magnetización Remanente Anhistérica (MRA)	20
4.2.3. Magnetización Remanente Isotérmica (MRI).....	21
4.3. EQUIPOS	23
5. RESULTADOS	23
5.1. CANAL DEL DIQUE	23
5.2. CIÉNAGA LOS VÁSQUEZ	26
5.3. CIÉNAGA PORTONAITO	29
5.4. PERIQUITOS.....	31
5.5. PUNTA BARÚ	33
5.6. BARBACOAS.....	35
6. DISCUSIÓN	37
7. CONCLUSIONES	43
8. BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Localización de los núcleos de sedimento analizados	9
Figura 2. Mapa geológico del área de estudio	11
Figura 3. Mapas MODIS de concentración de sedimentos en suspensión entre los años 2008 y 2011	14
Figura 4a. Series interanuales de tasas de sedimentación para los núcleos de Barbacoas en Lequerica.	15
Figura 4b. Valores de susceptibilidad magnética vs profundidad.	16
Figura 5. Extracción de núcleo de sedimento con pistón de gravedad en el sitio Periquitos	18
Figura 6. Curvas de adquisición de MRA a partir de 3 campos directos.....	21
Figura 7. Representación gráfica de la adquisición con campo creciente MRA.....	22
Figura 8. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Dique” versus profundidad (cm).....	24
Figura 9. Curvas de MRI de adquisición total y componentes para la muestra Dique	25
Figura 10. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Vásquez” versus profundidad (cm).....	27
Figura 11. Curvas de MRI de adquisición total y componentes para la muestra Vásquez	28
Figura 12. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Naito” versus profundidad (cm).....	29
Figura 13. Curvas de MRI de adquisición total y componentes para la muestra Naito.....	30
Figura 14. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Periquitos” versus profundidad (cm).....	31
Figura 15. Curvas de MRI de adquisición total y componentes para la muestra Periquito.	32
Figura 16. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Barú” versus profundidad (cm).....	33
Figura 17. Curvas de MRI de adquisición total y componentes para la muestra Barú	34
Figura 18. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Barbacoas” versus profundidad (cm).....	35
Figura 19. Curvas de MRI de adquisición total y componentes para la muestra Barbacoas	36

Figura 20. Representación de la variación de los valores promedios de parámetros de concentración χ y MRA a través del tiempo, en los sedimentos superficiales y profundos de cada núcleo.....	38
Figura 21. Susceptibilidad magnética versus magnetización remanente isotérmica de saturación.	39
Figura 22. Gráfica de King (King et al., 1982). Este gráfico representa χ_{MRA} contra χ junto con rectas de calibración para distintos tamaños de granos magnéticos.	41
Figura 23. Valores de Hcr versus susceptibilidad magnética (χ).	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Localización de los puntos del muestreo.	9
---	----------

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Tablas de parámetros magnéticos.....	47
ANEXO 2. Análisis MRI de componentes magnéticas.....	54

RESUMEN

La descarga de sedimentos transportados por el Río Magdalena a las bahías de Cartagena y Barbacoas y su contribución a zonas las arrecifales de las Islas del Rosario, es un tema controversial, por las implicaciones en las políticas de manejo ambiental en ecosistemas coralinos. El aumento en las tasas de sedimentación en dichos puntos en las últimas décadas (Restrepo y Correa, 2014) es un hecho comprobado a partir de estudios sedimentológicos.

En este estudio, se aplicaron técnicas de magnetismo ambiental para 119 muestras tomadas dentro de las bahías de Cartagena y Barbacoas. En el Laboratorio de Magnetismo y Paleomagnetismo del CIFICEN (Argentina), se midieron los parámetros magnéticos susceptibilidad magnética (χ) y Magnetizaciones de remanencia anhistéica (MRA) e isotérmica (MRI), con el objetivo de caracterizar magnéticamente cada punto y relacionar las variaciones de material ferrimagnético con la contribución de sedimentos continentales en los sitios de muestreo.

Las propiedades magnéticas de los sedimentos analizados, muestran diferencias en la concentración de minerales para y ferrimagnéticos, al igual que en sus tamaños de grano magnético. Se observa que en el sitio Periquitos (cercano a las Islas del Rosario) se obtienen valores bajos de susceptibilidad magnética, correspondientes a una importante contribución de minerales paramagnéticos, sin embargo, el parámetro magnetización remanente anhistéica muestra un importante aumento (hasta 20 veces más) para los últimos 10-20 años, lo cual indica un incremento de la concentración de minerales ferrimagnéticos finos en sitios que anteriormente no tenían un aporte directo de sedimentos terrígenos.

1. INTRODUCCION

Actualmente, se han incorporado estudios magnéticos para la caracterización física de sedimentos, como una técnica de bajo costo y gran aporte en la determinación de condiciones paleoambientales, indicadores de cambio climático, contaminación antropogénica, entre otros. Las técnicas magnéticas suelen ser aplicadas en sedimentos lacustres, marinos, fluviales y de suelo; líquenes, hojas, musgo y cualquier otro elemento que en su estructura, pueda incorporar partículas magnéticas que sirvan como indicadores ambientales (Chaparro, 2006)

Las mediciones magnéticas, suelen tener un grado de sensibilidad capaz de detectar materiales ferromagnéticos en concentraciones muy bajas (Chaparro, 2006). Esto es de gran importancia, ya que permite el estudio de materiales con diversos ambientes de proveniencia. Vale resaltar que el análisis de parámetros magnéticos, es una herramienta muy útil para establecer características del ambiente, y en algunos casos determinar la presencia de elementos tóxicos, por medio de la caracterización de los portadores magnéticos.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo, analizar sedimentos marinos depositados durante los últimos ~30 años en un ambiente de estuario en la Bahía de Cartagena y Bahía de Barbacoas, en el Noroeste de Colombia, ya que la presencia del Canal del Dique y el aumento en el aporte de sedimentos continentales durante las últimas cuatro décadas, representa una amenaza para la estabilidad de los ecosistemas y en especial a los arrecifes de coral.

Los estudios para 6 núcleos de sedimento, se realizaron en el Laboratorio de Magnetismo y Paleomagnetismo del CIFICEN (Argentina), donde se obtuvieron diferentes parámetros magnéticos tales como susceptibilidad magnética específica (χ), magnetización remanente anhistórica de saturación (MRA), susceptibilidad anhistórica específica (χ_{MRA}), magnetización remanente isotérmica de saturación (MRIS), entre otros. El estudio de los parámetros, nos ha permitido analizar las variaciones del material ferrimagnético sobre la columna de sedimento, en relación a los tamaños de grano, composición y concentración, ligado a la descarga de sedimentos sobre el delta del Río Magdalena.

2. OBJETIVOS

2.2. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar magnéticamente las muestras tomadas en las Bahías de Cartagena y Barbacoas a partir del análisis de la variación de parámetros magnéticos, y determinar si estos evidencian la llegada de sedimentos desde el Canal del Dique, a zonas arrecifales de las Islas del Rosario.

2.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Extraer núcleos de sedimentos del área de estudio y acondicionar las muestras para la aplicación de técnicas magnéticas.
- Aplicar técnicas de magnetismo ambiental en la totalidad de las muestras; susceptibilidad magnética y magnetizaciones de remanencia anhistórica e isotérmica.
- Caracterizar magnéticamente los sedimentos extraídos de la zona de estudio.
- Determinar las variaciones del material ferrimagnético en los puntos de muestreo en relación a la concentración, composición y tamaño de grano.
- Relacionar los parámetros magnéticos obtenidos con el aporte de sedimentos del Río Magdalena en las Bahías Cartagena y Barbacoas.

3. GENERALIDADES

3.1. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra localizada en el Norte de Colombia, al oeste del departamento de Bolívar, ciudad de Cartagena. Entre las coordenadas $10^{\circ}23'6.86''$ N $75^{\circ}38'45.59''$ O Y $10^{\circ}14'50.46''$ N $75^{\circ}48'2.32''$ O. Los puntos de muestreo se presentan en la figura 1 y tabla 1.

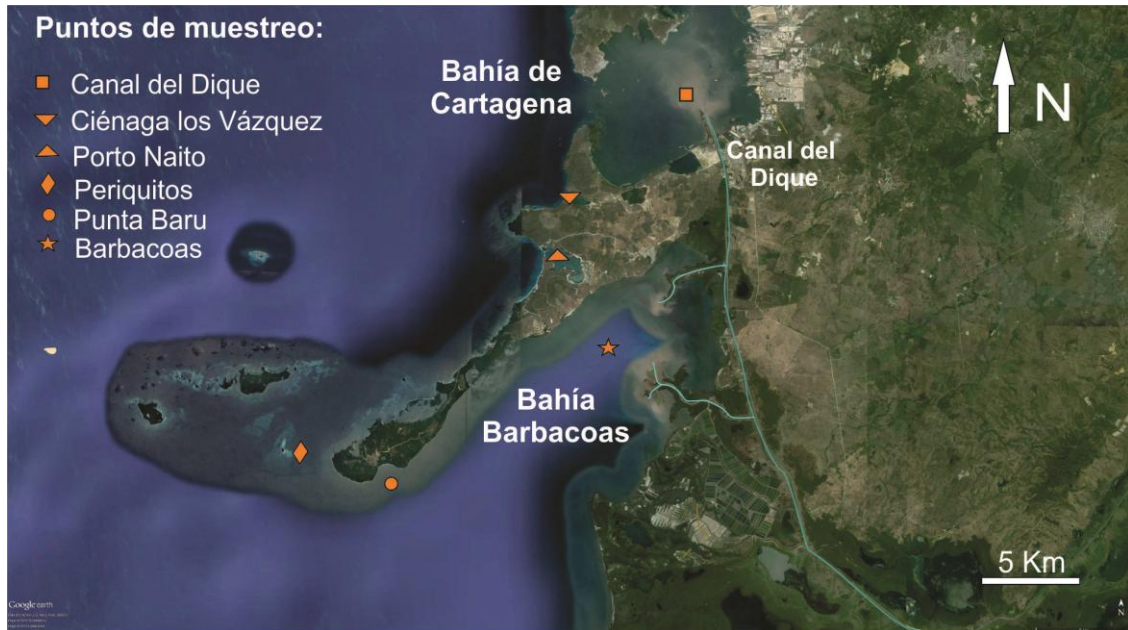


Figura 1. Localización de los núcleos de sedimento analizados. (Modificado de Google Earth).

PUNTO DE MUESTREO	COORDENADAS
Canal del Dique	$10^{\circ}18'53.90''$ N $75^{\circ}32'5.10''$ O
Ciénaga Los Vásquez	$10^{\circ}15'49.20''$ N $75^{\circ}35'23.20''$ O
Ciénaga Portonaito	$10^{\circ}14'21.20''$ N $75^{\circ}36'4.20''$ O
Periquitos	$10^{\circ}8'35.20''$ N $75^{\circ}42'57.10''$ O
Punta Barú	$10^{\circ}7'22.40''$ N $75^{\circ}41'21.00''$ O
Barbacoas	$10^{\circ}11'55.30''$ N $75^{\circ}33'59.80''$ O

Tabla 1. Localización de los puntos del muestreo.

3.2. ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1. Río Magdalena y Canal del Dique

Según los resultados presentados por Restrepo y Correa, (2014) sobre los aportes fluviales interanuales del río Magdalena a través del Canal del Dique, el 78% de la cuenca se encuentra en estado crítico de erosión debido a las altas tasas de deforestación y al cambio en el uso de los suelos por actividades como agricultura, ganadería, minería intensiva y urbanización. El promedio del transporte total de sedimentos del Magdalena en la estación Calamar para las décadas 1970-2000 era de 144 millones de toneladas/año o el equivalente a una producción de sedimentos por kilómetro cuadrado de 550 millones/año.

Restrepo y Correa (2014) reportan que entre el 2005 y 2011, el transporte anual del Río Magdalena en la estación Calamar se incrementó en un 32% con respecto al promedio 1970-2000, es decir, un aumento de 44 millones de toneladas/año.

El análisis del transporte de sedimentos del Río Magdalena en la estación Calamar para el periodo 1970-2011, indica que el Río Magdalena es el sistema fluvial del continente americano con las tasas de erosión más altas por kilómetro cuadrado de área hidrográfica para el periodo 2005-2011. Esto se traduce en un mayor impacto ambiental aguas abajo de Calamar y a lo largo del sistema distributivo del Canal del Dique (Restrepo y Correa, 2014).

Similar a la señal del transporte de sedimentos del río Magdalena, el canal del Dique ha experimentado incrementos en el transporte de sedimentos del orden del 30% con respecto al promedio de los años 1980s. Para el periodo 2005-2010, el Canal del Dique ha transportado aproximadamente 3 millones de toneladas/año más que el promedio observado en la década 1990-2000. El total del transporte de sedimentos del Canal del Dique, medido en la estación Santa Helena (antes de la salida a la bahía de Cartagena) es del orden de 8.9 millones de toneladas/año en el periodo 2005-2010, valor que corresponde a cerca del 5% de la erosión de toda la cuenca del río Magdalena (Restrepo y Correa, 2014).

Según Restrepo y Correa (2014), actualmente el Canal del Dique deposita en la Bahía de Cartagena cerca de 580.000 volquetas de seis toneladas por año, con un promedio de 1600 volquetas/día y presenta una alta variabilidad interanual transportando una amplia proporción de su carga de sedimentos en períodos de tiempo relativamente cortos.

3.2.2. Contexto Geológico y Sedimentológico:

La importancia de la geología local en el presente estudio, radica en el aporte mineralógico que pueden tener las unidades emergidas sobre la zona de estudio, esto aplica esencialmente en el punto cercano a las islas del rosario, donde el objetivo principal, es registrar el aporte de sedimentos del Canal del Dique, a partir de la presencia minerales magnéticos; asumiendo que la presencia y aumento de estos minerales magnéticos en dichos puntos es por materiales provenientes del Río Magdalena, a través del Canal del Dique.

Lo anterior, apoyados en que composicionalmente, las formaciones aledañas no presentan minerales de alta señal magnética o de predominancia en componentes ferromagnéticos. Esta es principalmente la formación La "Popa" definida por Camacho et al, (1968), como una unidad de dos miembros; el inferior compuesto por arcillas plásticas, margosas y areniscas de cuarzo, y el superior compuesto de calizas margosas coralinas, algáceas y con moluscos (Fig.2).

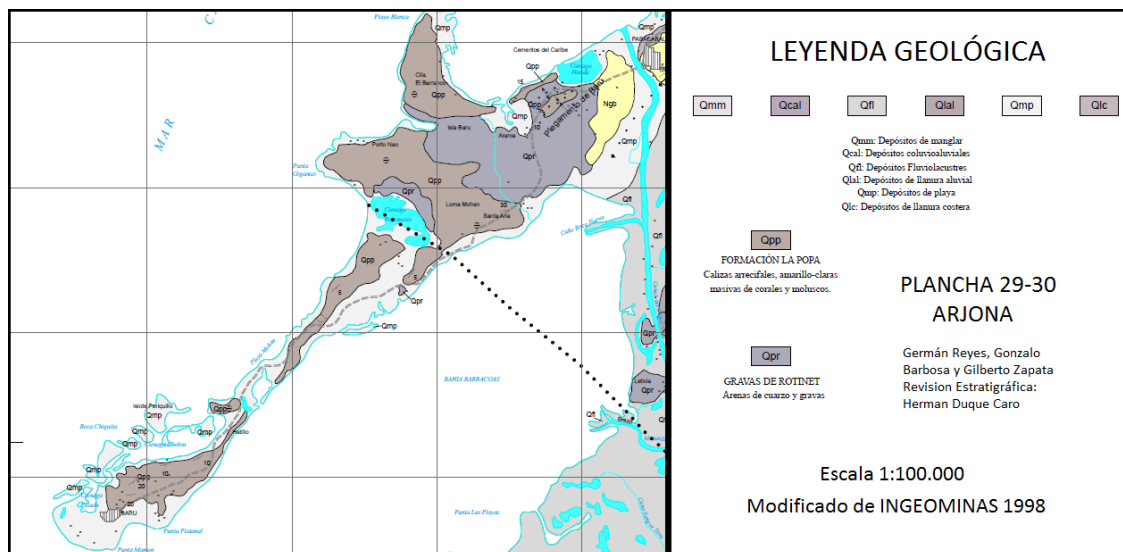


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio. Modificado de INGEOMINAS 1998.

Las playas ubicadas en la parte Norte de la zona de estudio entre Ciénaga Los Vásquez y Portonaito, están constituidas por mezclas heterogéneas y mal seleccionadas de sedimentos polimodales, principalmente por bloques, gravas y arenas calcáreas de restos arrecifales porosos con texturas y formas muy variadas, desde angulosas a bien redondeadas, y desde esféricas a plati-formes (Restrepo y Correa, 2014).

El basamento (límite rocoso inferior) de las playas entre Polonia y Portonaito está constituido, por arrecifes de corales cementados y fracturados, con una topografía altamente irregular de cavidades, montículos y grietas rellenas comúnmente por fragmentos coralinos. Los principales aportes en estos puntos, parecen provenir del mismo basamento y también de la erosión de los depósitos conglomeráticos de línea de costa y de los escarpes adyacentes. Esta circunstancia es notable a lo largo de Playa Bonita (Oeste de Ciénaga Los Vásquez) y playas adyacentes hacia el sur (Restrepo y Correa, 2014).

3.2.3. Dispersión de sedimentos

En el estudio multidisciplinario realizado por Ecoral, Restrepo y Correa, (2014), se presenta un modelo de dispersión de sedimentos a partir del análisis imágenes satelitales, usando la reflectancia superficial, por su alta sensibilidad a las concentraciones de sedimentos en suspensión. El análisis se realizó con nivel de cuantificación de 16-bits variando entre -100 y 160005 en las imágenes diarias MODIS analizadas entre los años 2000 y 2013.

En el informe, se resaltan los siguientes puntos sobre la turbidez y dispersión de los sedimentos en las Bahías:

“...La discusión nacional sobre los aportes del Canal del Dique a las islas del Rosario ha sido enfocada en años anteriores a los frentes de dispersión desde los deltas Lequerica, Matunilla y Correa en la bahía de Barbacoas. Incluso, otros estudios han señalado el efecto de la pluma de turbidez del Magdalena desde bocas de Ceniza. En nuestro modesto entender, la bahía de Cartagena, con sus canales de salida en el costado oeste como Bocachica y Varadero, nunca fueron contemplados como uno de los principales agentes de dispersión de aguas turbias estuarinas. Los resultados parciales entregados en este trabajo indican que las plumas de turbidez de la bahía deben ser consideradas como un serio y principal tensor ambiental de la calidad de las aguas arrecifales del litoral externo de Barú.

La Bahía de Cartagena es uno de los sistemas estuarinos finales del río Magdalena a través del canal del Dique. Por lo tanto, el Canal del Dique, al nacer en Calamar, es un sistema distributivo deltaico del Magdalena. Con base en los resultados de este estudio, gran parte de la hipótesis de los efectos del Dique en los ecosistemas costeros y marinos de Barú e islas del Rosario queda validada.

Por lo tanto, los sistemas coralinos de Barú e islas del Rosario serían la parte externa del estuario del río Magdalena. En otras palabras, todos los planes de manejo ambiental, de monitoreo, de restauración ecosistémica y de mitigación de amenazas, deben incluir a los ecosistemas de Barú y del Rosario como parte del componente fluvial bajo y externo del río Magdalena.

Los resultados muestran que de un total de 13 años de análisis, los aportes de aguas turbias (concentraciones de sedimentos mayores a 15 mg/l) fueron observados, en general para todas las áreas de análisis, cerca del 30% de todo el tiempo o un total de cuatro años. En otras palabras, durante la última década, aguas turbias desde las bahías de Barbacoas y Cartagena han alterado las condiciones cristalinas del litoral externo de Barú e islas del Rosario en una tercera parte del tiempo. Esto demuestra que la costa de Barú no está afectada sólo por las aguas del Canal del Dique en eventos llamados “bombazos” o episódicos. Más bien, estas alteraciones se presentan de forma continua a escalas intra e inter anual. También, durante algunos meses, las áreas litorales y arrecifales de Barú e islas del Rosario parecen más bien unas lagunas fluviales internas con altos valores de turbidez.

Estas plumas o frentes de dispersión provienen del Magdalena al norte y de las bahías de Cartagena y Barbacoas al sur, actuando simultáneamente en determinados meses y ejerciendo un efecto de “pinza” sobre las aguas arrecifales (Fig. 3). En conclusión, las plumas de turbidez de la bahía deben ser consideradas como un serio y principal tensor ambiental de la calidad de las aguas litorales de Barú.

Otro resultado relevante es la coherencia espectral entre el caudal y la concentración de sedimentos en los dos sistemas estuarinos del Canal del Dique, las bahías de Barbacoas y Cartagena. El caudal lidera los eventos de turbidez en escalas de tiempo de 1-2 meses, lo cual podría indicar que después de periodos “pico” de aportes fluviales, las aguas de la región experimentarían condiciones altas de sedimentos en suspensión en máximo 2 meses después de los eventos altos de caudal. En otras palabras, el caudal y la turbidez no están en fase, y los desfases o “lags” de 1-2 meses indican que la presencia de la turbidez en las aguas arrecifales es más persistente y continua, y que ésta no se expresa como eventos episódicos e instantáneos ligados a los pulsos mensuales y anuales del Canal del Dique...” (Restrepo y Correa,2014).

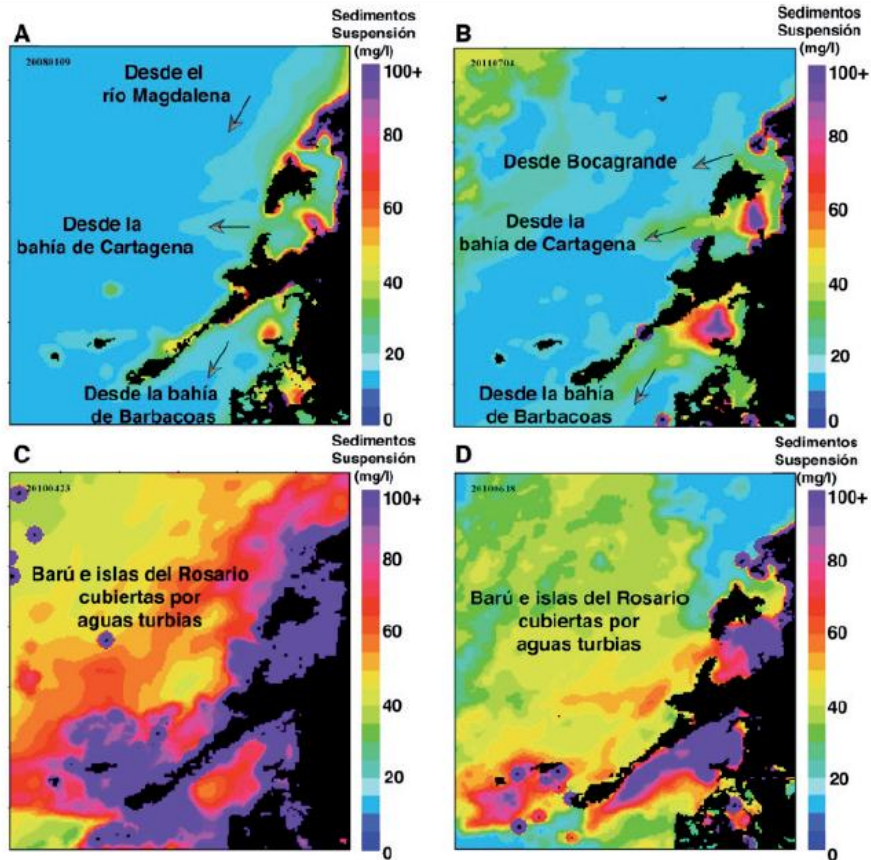


Figura 3. Mapas MODIS de concentración de sedimentos en suspensión entre los años 2008 y 2011 mostrando la dispersión de plumas de turbidez desde las tres zonas fuente: Magdalena al norte, Bahía de Cartagena y Barbacoas al sur (Tomado de Restrepo y Correa, 2014).

3.2.4. Tasas de sedimentación

Los datos cronológicos de 5 núcleos extraídos en la bahía de Cartagena y Barbacoas, fueron adquiridos en el proyecto “Línea Base ambiental Argos Barú”, a partir del uso del Pb_{210} como indicador geocronológico, luego las edades fueron convertidas a tasas de sedimentación para el periodo de registro.

En el presente estudio, existen tres puntos correlacionables con la geocronología presentada por Restrepo y Correa, (2014); “Dique”, “Baru” y “Barbacoas”, nombrados en dicho estudio como: Dique en Pasacaballos, Barbacoas en Punta Barú, y Barbacoas en Lequerica, respectivamente.

Según los resultados cronológicos, la parte interna de la Bahía de Cartagena, tiene valores promedio de sedimentación de 0.59 a 1.10 cm /año en los sectores Honda y Coquito. En la región Dique, en Pasacaballos el promedio de la sedimentación es

de 1.49 cm/año. Dentro de la Bahía de Barbacoas en las zonas de Lequerica y Punta Barú, se dan valores de sedimentación promedio de 1.84 y 2.06 cm/año, respectivamente.

En cuanto a las tasas de sedimentación interanual, los núcleos de Dique y Barbacoas en Lequerica, comparten tendencias similares, evidenciando incrementos acelerados en los periodos 1980-1985 y 1987-1990 (Fig. 4a). Posteriormente, los valores disminuyen considerablemente entre los años 1997 y 2007, y Barbacoas en Lequerica vuelve a aumentar sus tasas entre los años 2008 y 2012. Al contrario de las series de Barbacoas en Lequerica y Canal del Dique, Punta Barú, presenta una tendencia ascendente y continua para el periodo 1990-2012. En el núcleo Canal del Dique, es notorio el descenso acelerado de las tasas de acumulación después de 1998, posiblemente debido a planes continuos de dragado en esta parte de la salida del Dique a la Bahía de Cartagena (Restrepo y Correa, 2014).

La Figura 4b, presenta las edades estimadas para los núcleos “Dique”, “Barú” y “Periquitos”, según las tasas de sedimentación promedio anual, a partir del grafico de susceptibilidad magnética versus profundidad.

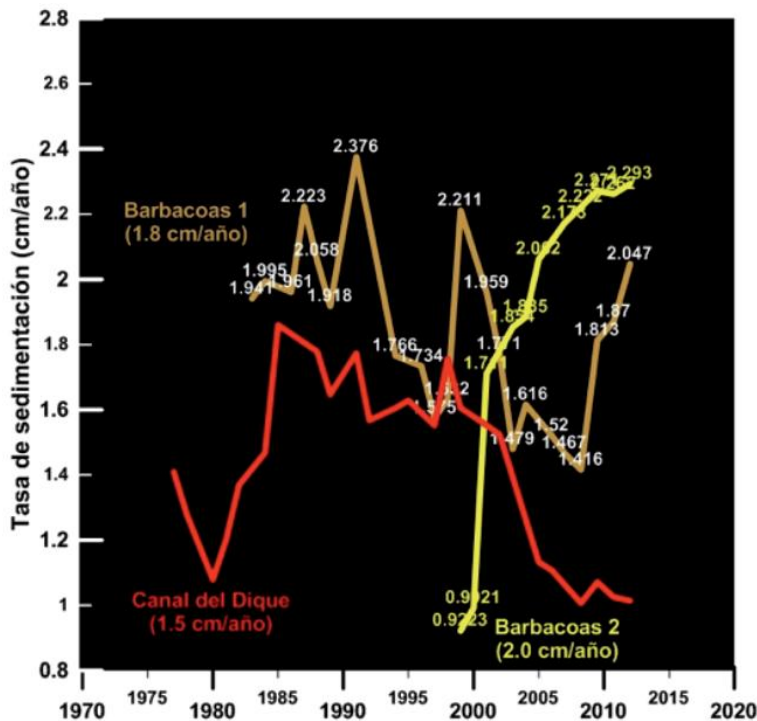
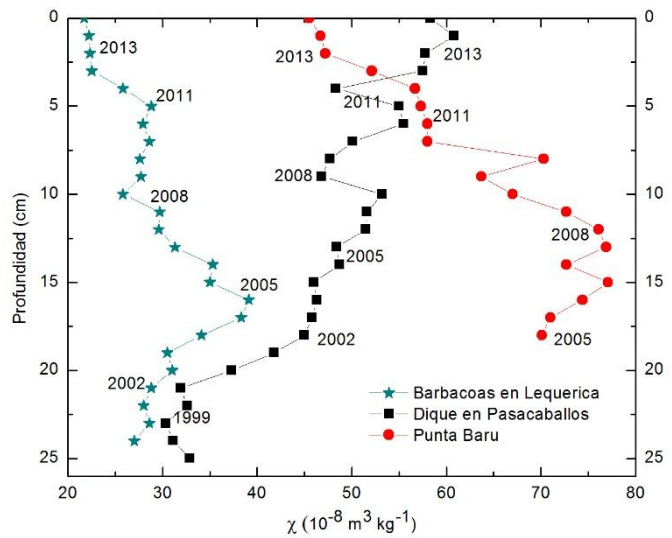


Figura 4a. Series interanuales de tasas de sedimentación para los núcleos de Barbacoas en Lequerica (línea café), Barbacoas en Punta Barú (línea amarilla) y canal del Dique en Pasacaballos (línea roja) (Tomado de Restrepo y Correa, 2014)

Figura 4b. Valores de susceptibilidad magnética versus profundidad. Las dataciones fueron asignadas mediante el promedio de las tasas de sedimentación anual reportadas por Restrepo y Correa, (2014).



En esta se observa, que aunque el comportamiento en los valores de susceptibilidad presenta tendencias similares para los núcleos ubicados dentro de la Bahía de Cartagena, las edades no correlacionan picos de máximos y mínimos entre los diferentes puntos. A pesar de esto, la importancia de los datos geocronológicos radica en el registro temporal de los cambios en los parámetros magnéticos (Concentración, Composición y Tamaño de grano), discutidos en la sección de resultados.

3.3. ESTUDIOS ANTERIORES

En las bahías de Cartagena y Barbacoas se han realizado trabajos de investigación enfocados en diferentes problemáticas ambientales, sin embargo, poco se conoce acerca del aporte real de sedimentos del Canal del Dique sobre las islas del Rosario. Sobre este punto, Restrepo y Correa, (2014), mencionan que “...En Colombia se ha realizado ciencia enfocada a conocer el comportamiento de la dinámica oceanográfica y físico-química de la Bahía de Cartagena y de su variabilidad estacional anual. Algunos de estos estudios, en su mayoría realizados por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas -CIOH- de la Dimar, han estimado los efectos del canal del Dique dentro del sistema estuarino de la Bahía (Wang, 1982; Lonin y Tuchkovenko, 1998; Tuchkovenko y Lonin, 2003; Lonin et al. 2004; Lonin y Masson, 2006; Lonin, 2009; Molares y Mestres, 2012). No obstante, la pertinencia y calidad de estos trabajos, ningún proyecto nacional ha enfocado la problemática del sistema Magdalena-Dique-Bahías-Barú e Islas del Rosario, como un sistema único ambiental dada su conectividad fluvio-costera y marina...”.

Restrepo et al, (2013), muestra como las altas tasas de deforestación y las actividades antropogénicas influyen en el aumento de las descargas de sedimentos sobre la bahía de Cartagena, y como afecta esto los arrecifes de coral, mediante estudios sedimentológicos.

Finalmente, en estudios más recientes, el proyecto Ecoral Barú, hace un primer intento en unir las piezas del “rompecabezas ambiental” del sistema Magdalena-Dique-Bahías-Barú e Islas del Rosario, mediante la transversalidad de disciplinas como geología, biología marina, geofísica, oceanografía, indicadores paleoambientales y economía de ecosistemas.

Como un aporte al conocimiento de la interacción entre el sistema Río Magdalena-Bahías Cartagena y Barbacoas, se propone con este trabajo, el análisis de minerales magnéticos a través de métodos de magnetismo ambiental; La aplicación de técnicas magnéticas en sedimentos o suelo para determinar niveles de contaminación relativa en ambientes específicos, es un método utilizado a menudo gracias a su bajo costo y confiabilidad. Aunque en Colombia no se encuentren trabajos publicados que utilicen técnicas magnéticas en la caracterización de sedimentos en ambientes estuarinos, los trabajos a continuación muestran como esta herramienta es aplicada en sistemas similares:

- Deepti et al, (2009), utiliza proxies como la susceptibilidad magnética para identificar fuentes y factores que controlan la distribución de metales pesados en un estuario tropical de la India, relacionado con los tiempos de monzón, pre monzón y post monzón.
- Chenyin Dong et al, (2014), realiza mediciones magnéticas en sedimentos superficiales del estuario Yangtze, China, para determinar cambios en la morfología del estuario con parámetros como χ_{MRA} , MRIS, $\chi_{MRA}/MRIS$, entre otros.
- Prajith, A., et al, (2015), presentan las propiedades magnéticas de núcleos de sedimento en el estuario de Mandovi Oeste de India, para realizar inferencias acerca de la proveniencia de los sedimentos y el grado de polución en el ambiente.

4. METODOLOGIA

4.1. RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Los sedimentos fueron recolectados durante la campaña de muestreo en mayo del 2014, se tomaron núcleos de sedimentos marinos mediante el uso de un pistón de gravedad en 6 sitios dentro del estuario (Fig. 5); los cuales se identificaron como: Canal del Dique, Portonaito, Laguna Los Vásquez, Periquitos, Punta Barú y Bahía Barbacoas. Las longitudes de los núcleos variaron entre 10 y 25 cm.

En el laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo Ambiental de la Universidad EAFIT (Colombia), los núcleos fueron abiertos y sub muestreados cada 1 cm. Las muestras se secaron a una temperatura de 40° y algunas de las muestras se tamizaron por la cantidad de fragmentos de concha presentes. En total se analizaron 119 muestras, pesadas y envasadas en recipientes plásticos de 2,3 cc.



Figura 5. Extracción de núcleo de sedimento con pistón de gravedad en el sitio Periquitos.

4.2. MEDICIONES MAGNÉTICAS

Las mediciones magnéticas pueden ser destructivas o que modifican el estado natural magnético de la muestra y no destructivas que no adquieren remanencia; dentro de las técnicas no destructivas, se utilizó susceptibilidad magnética en todos los núcleos. Las técnicas destructivas corresponden a magnetizaciones de remanencia anhistórica e

isotérmica, aplicadas también en el presente estudio. En el Laboratorio de Magnetismo y Paleomagnetismo del CIFICEN (Argentina), se realizaron los estudios magnéticos para la totalidad de las muestras.

4.2.1. Susceptibilidad Magnética

En presencia de un campo magnético \mathbf{H} se induce una magnetización \mathbf{M} en un material. La magnetización \mathbf{M} es un efecto macroscópico debido a la contribución microscópica de momentos magnéticos dipolares inducidos y permanentes. (Chaparro, 2006). La magnetización \mathbf{M} es definida por,

$$\mathbf{M} = \kappa \cdot \mathbf{H} \quad (1.1)$$

Siendo κ , la susceptibilidad magnética. Si el campo magnético H aplicado es lo suficientemente pequeño en magnitud ($H \sim 80 \text{ A/m}$) y asumiendo que no hay anisotropía en el medio; es posible establecer, a partir de (1.1), la siguiente relación lineal,

$$\kappa = \frac{M}{H} \quad (1.2)$$

Siendo en este caso, κ una cantidad escalar, susceptibilidad magnética volumétrica, adimensional. Este parámetro es la medida de la facilidad con que un material se magnetiza y depende de los minerales magnéticos presentes, su concentración y características. La medición de κ a campos H pequeños es una forma *no destructiva* de medir las características magnéticas de una muestra (Chaparro, 2006).

Las mediciones realizadas con el sensor de laboratorio MS2B (Bartington Instruments), fueron de campo bajo, es decir, del orden del campo terrestre, (0.05 mT) o tanto como 0.1-1 mT. Los valores altos se consideran a partir de 10 mT, por esto el procedimiento se considera reversible y no afectaría las siguientes mediciones (MRA, MRI).

En el anexo 1 se presenta los valores de susceptibilidad magnética, para el total de las muestras analizadas.

4.2.2. Magnetización remanente anhistérica (MRA)

La MRA es inducida bajo la presencia de campos magnéticos relativamente débiles, su adquisición es producida por medio de la combinación de un campo magnético estacionario (H_0) y un campo magnético alterno (AF, alternating field, por sus siglas en inglés). El efecto del campo H_0 es superpuesto al del campo AF mientras éste decrece lentamente desde su valor máximo hasta cero. En este proceso el campo AF cumple el papel de relajar el sistema y reorientar los momentos magnéticos dipolares permanentes en forma aleatoria, en forma similar a las excitaciones térmicas en los procesos de termoremanencia (MRT) (Chaparro, 2006).

En las muestras estudiadas, se impartieron 3 intensidades de campo directo (DC) creciente con valores de 10, 50 y 90 μT , con el dispositivo para impartir MRA de Molspin Lda. El procedimiento se realizó en 3 pasos, con el fin de obtener una medición más precisa, puesto que con los valores de magnetización para cada campo, se calcula la pendiente, que al final será el valor K_{ARM} .

La Figura 6, muestra los valores de magnetización para muestras de los núcleos Dique, Vásquez, Baru y Barbacoas, después de la imposición de un campo magnético directo (DC). A partir de la pendiente de estos puntos se obtiene la K_{ARM} . (Ver Anexo 1) que junto con el valor MRA (Magnetización a 0.9 Oe), dependerán de las direcciones relativas entre H_0 y $H \sim$.

Debe tenerse en cuenta que la intensidad de MRA es dependiente de la distribución de tamaños de grano, especialmente para granos $<1 \mu\text{m}$ (Chaparro, 2006). La MRA decrece un orden de magnitud entre granos de $0.1 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$ (Dunlop y Xu, 1993).

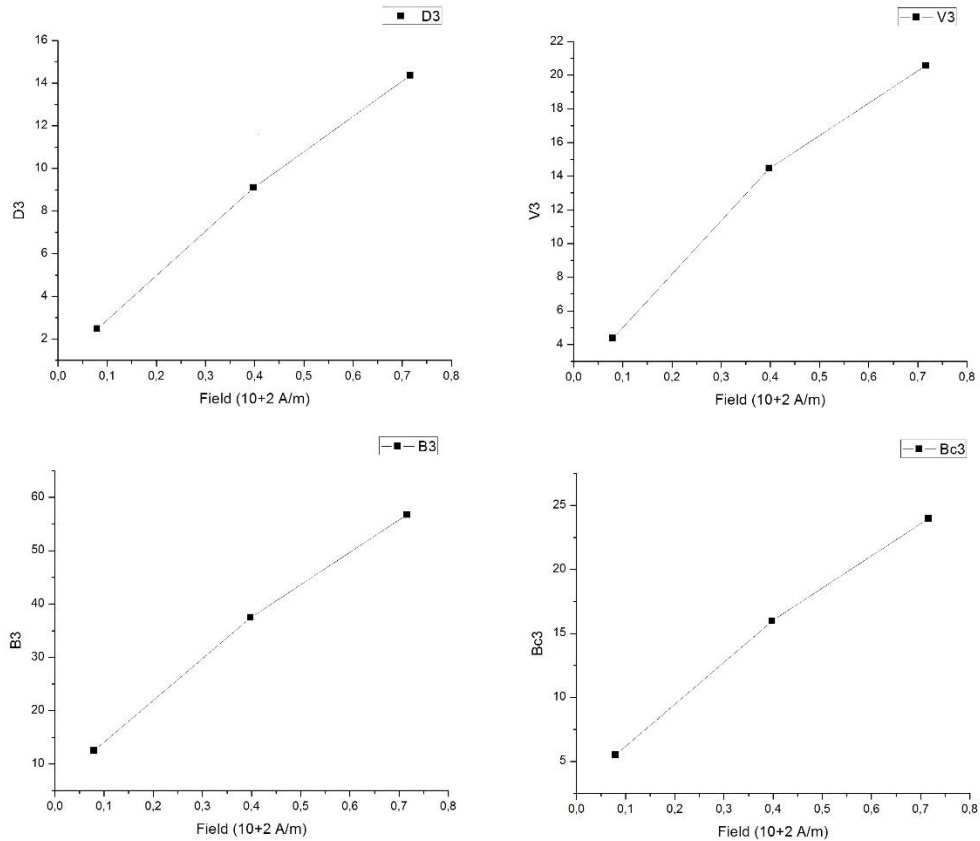


Figura 6. Curvas de adquisición de MRA a partir de 3 campos directos, para 4 muestras. La pendiente de la curva indica el valor κ_{ARM} .

4.2.3. Magnetización remanente isotérmica

La adquisición de remanencia isotérmica constituye otra de las formas en que los materiales pueden adquirir una magnetización remanente. A diferencia de la MRA, el proceso es realizado sin la presencia de un campo AF. La inducción magnética se realiza por medio de un campo directo H , al igual que en el caso de la MRA, aunque mucho más intenso. Generalmente, en el proceso de adquisición de MRI el campo H alcanza valores de 1-2.5 T, el cual es 4 órdenes de magnitud mayor que el H_0 en la adquisición de MRA ($\sim 100 \mu\text{T}$). Consecuentemente, este tipo de procesos induce magnetizaciones remanentes más intensas, así como cambios más difíciles de revertir o eliminar que en los procesos anhistérmicos.

En este tipo de estudios, una simple medición aporta escasa información magnética, no obstante, es posible obtener valiosa información a partir de distintas y detalladas etapas de magnetización. En dichas etapas de magnetización, el campo H es variado en forma lenta y creciente, desde valores de unos pocos mT ($\sim 4 \text{ mT}$ o 0.004 T) hasta valores altos ($\sim 2.5 \text{ T}$) (Chaparro, 2006).

Para este análisis, fueron elegidas 28 muestras, a las cuales se les realizó el proceso de adquisición y campo reverso aplicando un el campo H variado en forma lenta y creciente (Fig. 7). Las muestras restantes se saturaron a un campo de 2,5 T y se les aplico un campo reverso con el fin de conocer su Coercitividad de Remanencia (Hcr).

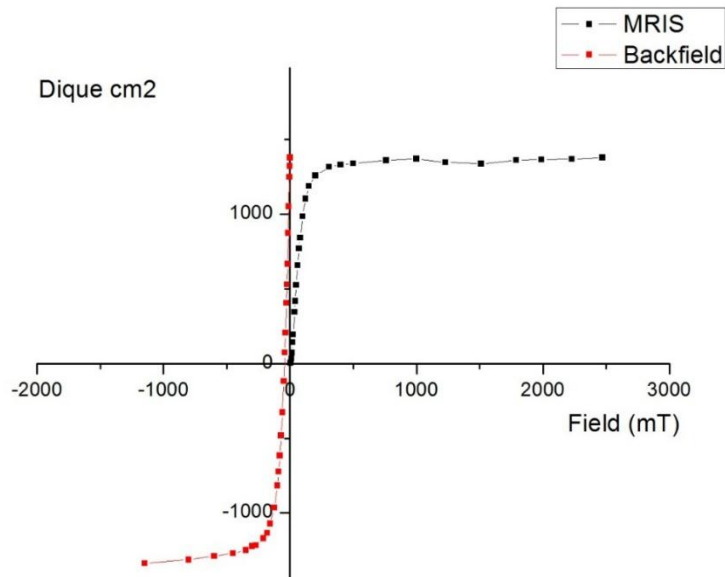


Figura 7. Representación gráfica de la adquisición con campo creciente del cm 2 de Canal del Dique junto con el campo reverso aplicado en la misma muestra.

4.3. EQUIPOS

Los instrumentos utilizados durante el presente estudio, pertenecen al Laboratorio de Magnetismo y Paleomagnetismo del CIFICEN (Argentina), y se mencionan a continuación:

- Susceptibilímetro magnético MS2/3, Bartington Instruments Ltd., el cual puede ser utilizado con sus dos sensores: sensor de laboratorio, MS2B de doble frecuencia (470 y 4700 Hz) y su sensor de campo MS2D.
- Desmagnetizador blindado, Molspin Ltd.
- Dispositivo para impartir MRA y MRA parcial (pARM) Molspin Ltd.

- Magnetizador de pulso modelo IM-10-30 ASC Scientific.
- Magnetómetro rotativo de puerta de flujo, Minispin, Molspin Ltd.

5. RESULTADOS

A partir de las mediciones de susceptibilidad magnética χ y las magnetizaciones de remanencia anhistérica e isotérmica, fueron calculados siete parámetros magnéticos para caracterizar las variaciones de los componentes magnéticos en los núcleos analizados. Los parámetros χ , MRA y MRIS describen la concentración de minerales ferromagnéticos; el Hcr y S-ratio la composición o fases magnéticas; y la K_{MRA}/K y MRA/MRIS describen el tamaño de grano del material magnético. Para cada muestra fueron graficados los parámetros versus la profundidad, para diferenciar los cambios o variaciones a través del tiempo.

Como complemento a los parámetros de composición, se realizó para algunas muestras, el análisis de componentes magnéticos a través de la deconvolución de la señal magnética MRI, aplicada a la curva de adquisición MRI con el programa IRM-CLG (Kruiver et al., 2001), donde se presentan las componentes magnéticas y su contribución porcentual en el contenido estrictamente magnético.

En esta sección se describe para cada sitio, las propiedades magnéticas a partir de los valores de la susceptibilidad magnética específica, los valores de las magnetizaciones remanentes dependientes de la concentración, los rangos del Hcr y S-ratio traducidos en aporte de minerales magnéticos “Duros” y “Blandos” y finalmente, los tamaños de grano magnético a partir de los valores K_{MRA}/K y MRA/MRIS.

5.1. CANAL DEL DIQUE

Este núcleo fue tomado cerca del canal del Dique en Pasacaballos (Fig. 1). Un ambiente deltaico de alta sedimentación. Con una profundidad de 25 cm de material lodo-arcilloso, el punto de muestreo “Dique” es el más cercano a la desembocadura del Río Magdalena sobre la Bahía de Cartagena.

Las mediciones de susceptibilidad magnética y magnetización remanente anhistérica, muestran que el núcleo “Dique”, presenta una señal predominantemente ferromagnética con valores χ entre ~ 30 y 60 ($10^{-6}m^3Kg^{-1}$) y un rango entre 97 y 120 ($10^{-6}Am^2Kg^{-1}$) para la MRA. Estos valores representan una variación en la concentración del material ferrimagnético a lo largo del tiempo, que como se muestra en la Figura 8, aumenta hacia la superficie, teniendo sus máximos valores en los primeros 4 centímetros.

Considerando los valores de MRA, el material ferromagnético fino se concentra en los primeros 3 centímetros del núcleo disminuye con la profundidad. Esta tendencia comparada con las variaciones de MRIS evidencian que la disminución en los valores de MRA a profundidad, se debería más a la disminución de granos finos que a la concentración (Fig.8).

Sin embargo, entre los centímetros 20 a 26, se observa claramente una disminución en la concentración de material ferromagnético, marcado por valores bajos en los parámetros χ , MRA e MRIS.

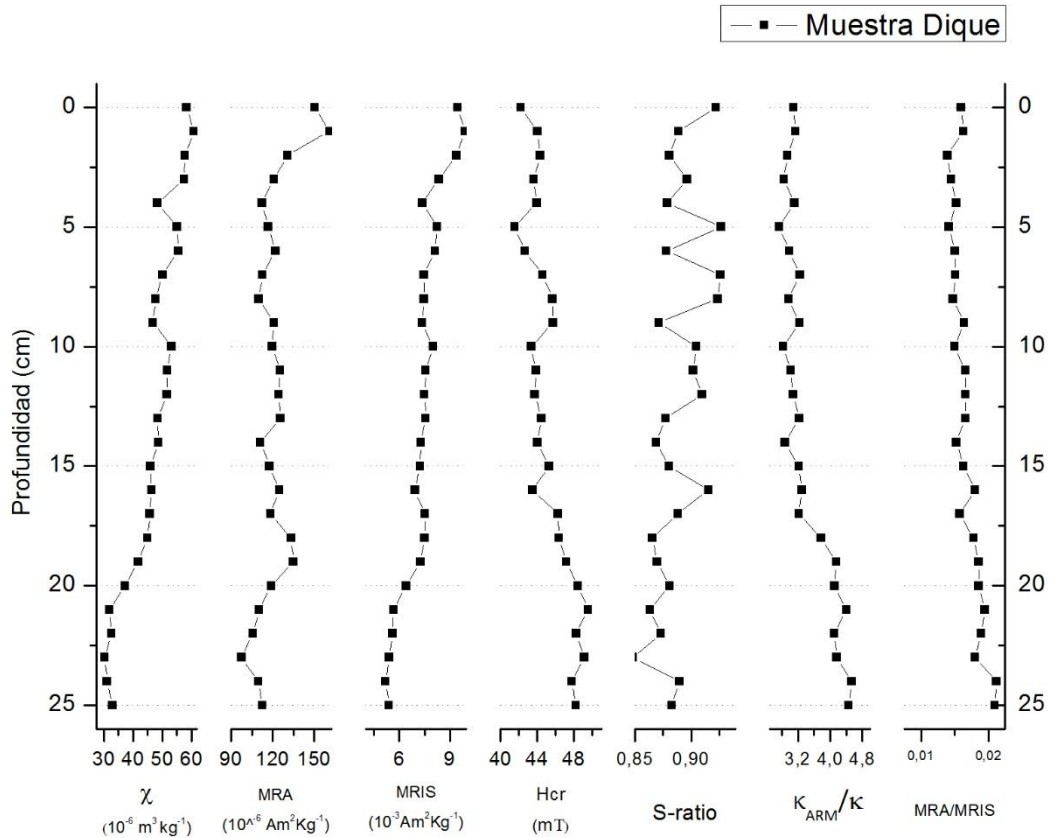


Figura 8. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Dique” versus profundidad (cm).

La mineralogía magnética de la sección, muestra la presencia de fases ferrimagnéticas como Magnetita-Maghemita, con valores Hcr entre 40 y 50 mT aproximadamente. Sin embargo, aunque en la totalidad de las muestras se confirme una fase ferrimagnética, las secciones que presentan valores cercanos a 50 mT podrían tener un aporte considerable de antiferromagnéticos como Hematita y Titanohematita. Lo anterior, se ve reflejado en el parámetro S-ratio, el cual muestra una disminución de 1 cuando los valores de Hcr aumentan, mostrando un posible aumento de minerales antiferromagnéticos.

Según el análisis de la descomposición de la señal magnética MRI (Fig.9), los minerales magnéticos observados en el cm 5 del núcleo “Dique”, tienen una contribución de material ferrimagnético del 82%, con coercitividad de remanencia ($B_{1/2}$) de 62 mT. La contribución de minerales antiferromagnéticos o de fases “Duras”, se da en un 5%, marcado por valores $B_{1/2}$ de 251 mT. La figura 9, muestra la distribución de las poblaciones de minerales magnéticos en una distribución estadística normal (Anexo 2).

En general las muestras presentan un tamaño de grano magnético de 0,2 a 1 μm , cuya variación se observa en el parámetro κ_{MRA}/κ con un leve cambio a partir del centímetro 18. Pese a lo anterior, se puede decir que el tamaño de grano magnético de este núcleo no varía considerablemente con la profundidad, en comparación con los demás puntos analizados en este estudio.

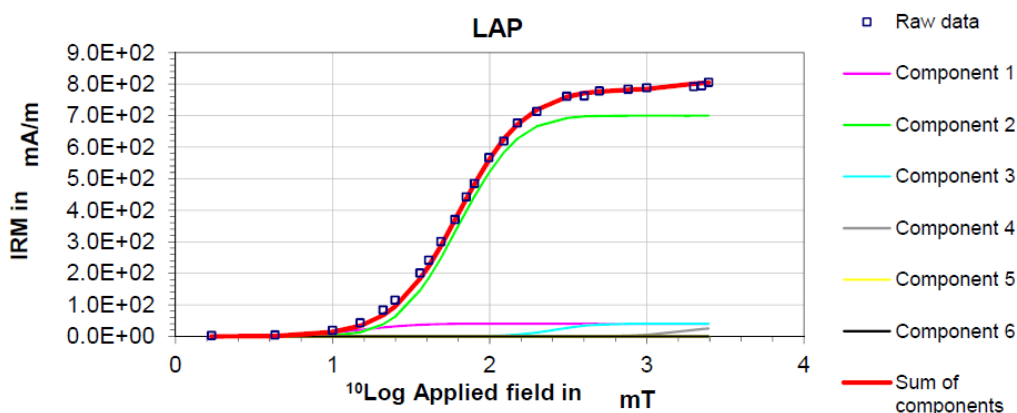


Figura 9. Curvas MRI de adquisición total y componentes para la muestra Dique cm 5. La Componente 2 corresponde a la contribución ferrimagnética, la Componente 3 a la antiferromagnética.

5.2. CIÉNAGA LOS VÁSQUEZ

El núcleo “Vásquez” fue extraído en la Bahía de Cartagena, un ambiente de ciénaga (Fig. 1), donde se presentan acantilados producto del fuerte oleaje sobre depósitos semiconsolidados de sedimentos coralinos (terrazas de depositación) y calizas cementadas de la formación la Popa (Restrepo y Correa, 2014). El núcleo recolectado tiene una longitud de 23 cm, donde se analizó cm a cm cada parámetro.

Las mediciones de χ , indican un dominio de material paramagnético con valores de 4 a 7 $\times 10^{-6}$ $\text{m}^3 \text{Kg}^{-1}$ a lo largo del núcleo. Estos valores muestran que a grandes rasgos, en la laguna de “Los Vásquez” predominan minerales paramagnéticos; sin embargo, las mediciones de MRA e MRIS, indican un incremento en el material ferrimagnético desde el cm 5 hacia la superficie, con valores de 140 ($10^{-6} \text{Am}^2 \text{Kg}^{-1}$) y 1,5 ($10^{-3} \text{Am}^2 \text{Kg}^{-1}$), respectivamente; este comportamiento creciente, se puede distinguir en los parámetros de concentración MRA y MRIS (Fig. 10).

Además de los cambios en la concentración, en los primeros 5 centímetros de la sección se observa una disminución en el tamaño de grano magnético hacia la superficie, indicado por los parámetros $\kappa_{\text{MRA}}/\kappa$ y MRA/MRIS. La Figura 10, muestra como varia el tamaño de grano del núcleo “Vásquez”, en comparación con los demás puntos de muestreo; se puede decir que aunque el sitio presenta granos magnéticos de tamaño fino, los granos de menor tamaño podrían estar concentrándose en los primeros centímetros de la sección.

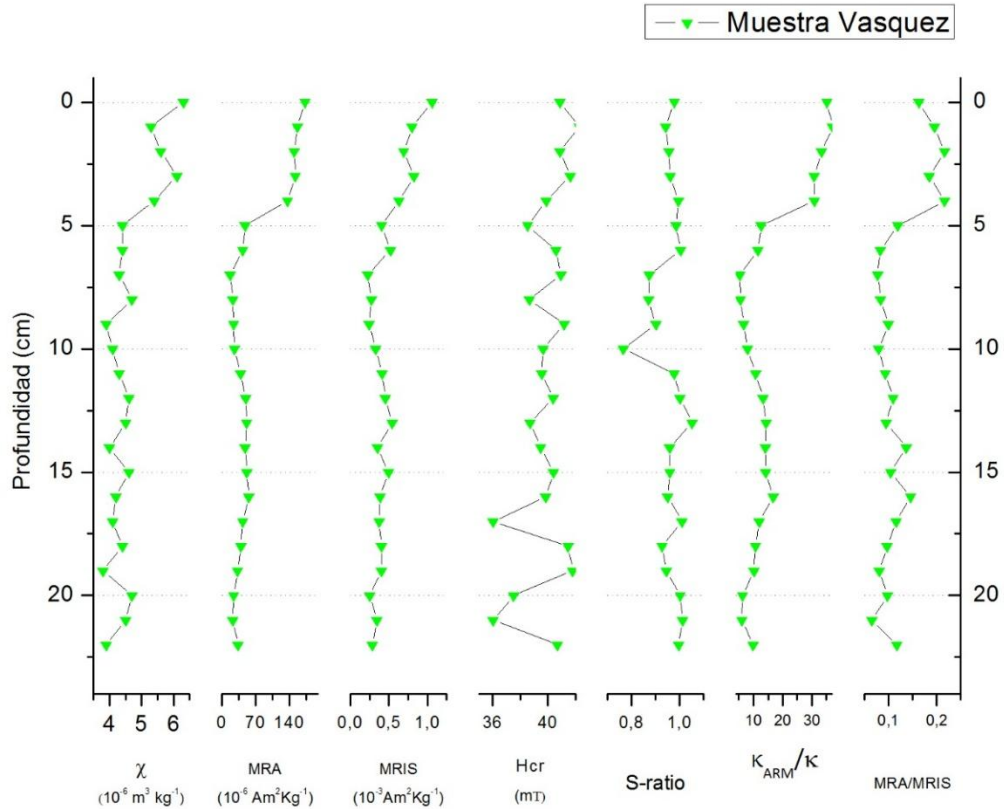


Figura 10. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Vásquez” versus profundidad (cm).

Mineralógicamente, se observan fases ferrimagnéticas del grupo de la Magnetita-Maghemita, con valores entre 36 y 40 mT en Hcr. Además, los valores S-ratio cercano a 1, indican la predominancia de las fases ferrimagnéticas sobre las antiferromagnéticas (Hematita- Titanohematita). Observando el comportamiento general del Hcr y S-ratio, se podría decir que estos dos parámetros aparentemente están poco relacionados con los de concentración (χ , MRA, MRIS) y tamaño de grano (κ_{MRA}/κ , MRA/MRIS).

Los análisis de la deconvolucion magnética IRM del cm 10 del núcleo, muestra una contribución de minerales antiferrimagnéticos del 10.8 %; las fases blandas contribuyen un 77% del total de minerales magnéticos, con un $B_{1/2}$ cercano a 48 mT (Fig.11). Estos valores son atribuibles a los cm 7 a 10, donde el parámetro S-ratio se aleja del valor 1.

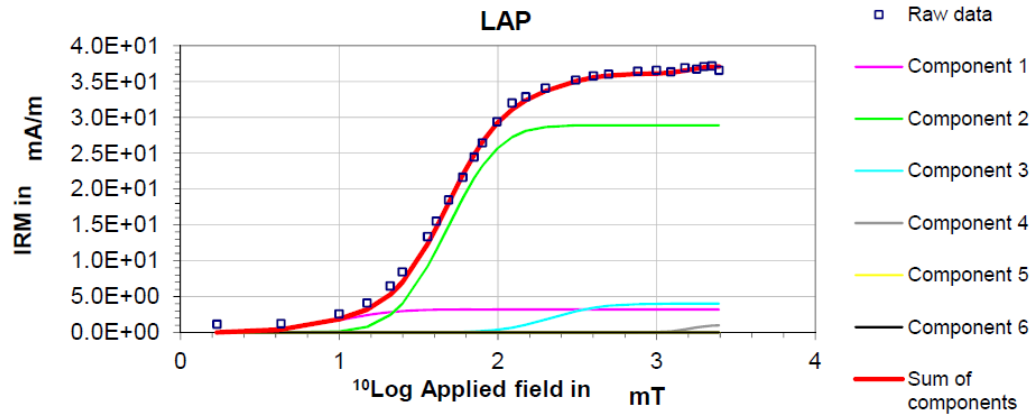


Figura 11. Curvas MRI de adquisición total y componentes para la muestra Vásquez (cm 10). La Componente 2 corresponde a la contribución ferrimagnética, la Componente 3 a la antiferromagnética.

5.3. PORTONAITO

La Ciénaga de Portonaito, está ubicada dentro de la Bahía de Cartagena contigua a Ciénaga los Vásquez (Fig.1); se caracteriza por ser un sistema de baja energía debido a su geomorfología de bahía cerrada. En este sitio se extrajo un núcleo de 9 cm de longitud, con sedimentos de tamaño limo y presencia de fragmentos de concha con un tamaño mayor a 5 mm.

Los parámetros magnéticos de “Portonaito” están caracterizados por señales de dominio paramagnético con valores χ que no superan los 8 ($10^{-6}\text{m}^3\text{Kg}^{-1}$).

Tanto la MRA como MRIS, muestran un leve incremento en la concentración de minerales ferrimagnéticos entre los cm 6 y 8 de la sección, mientras la χ se mantiene constante, mostrando la dominancia de minerales paramagnéticos a esta profundidad (Fig.12).

La parte superficial se caracteriza porque la MRA aumenta, junto con los parámetros $\kappa_{\text{MRA}}/\kappa$ y MRA/MRIS, esta relación indica la predominancia de granos magnéticos finos en este punto de la sección.

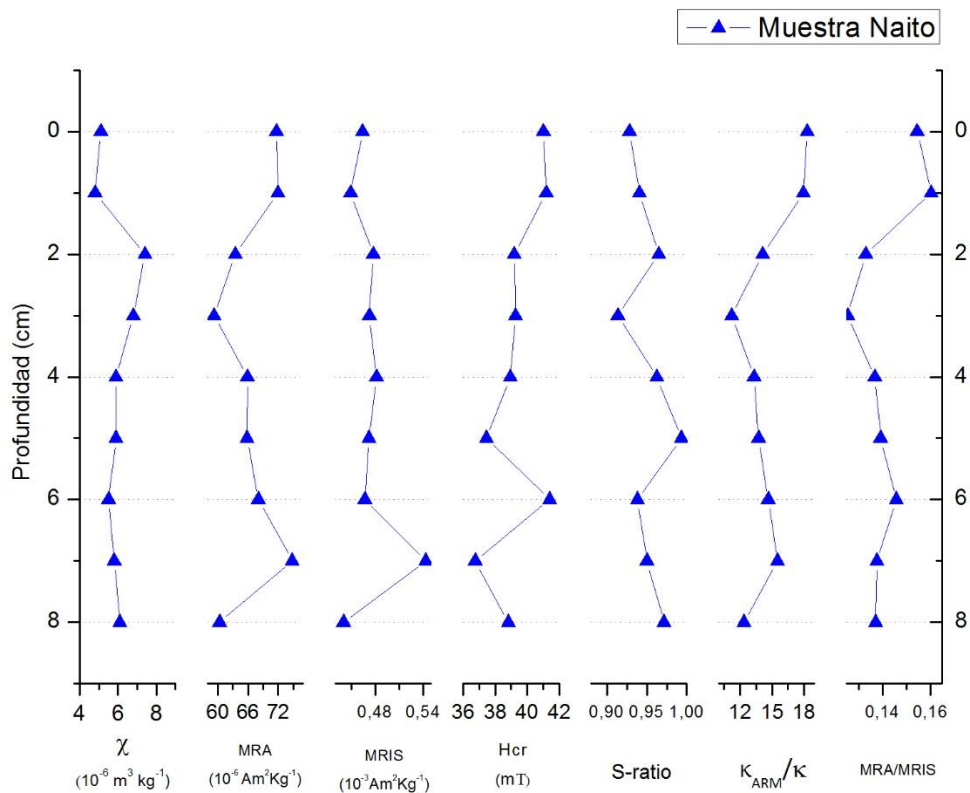


Figura 12. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Naito” versus profundidad (cm).

Los valores Hcr muestran a grandes rasgos una única fase magnética con valores entre 36 y 42 mT (Magnetita-Maghemita). Estos valores muestran predominancia los minerales “blandos” sobre los “duros”, sin embargo, los análisis MRI muestran la contribución de componentes antiferrimagnéticos en un 10% para el cm 2, con valores $B_{1/2}$ de 208 mT, el aporte de minerales “blandos” sobre el material magnético total de la muestra es del 81% (Fig.13).

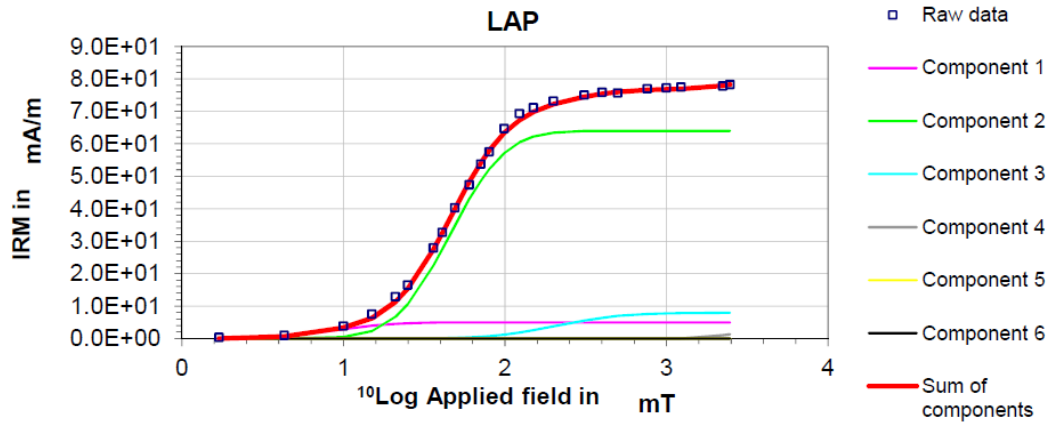


Figura 13. Curvas de MRI de adquisición Total y componentes para la muestra Naito cm 2. La Componente 2 corresponde a la contribución ferrimagnética, la Componente 3 a la antiferrimagnética.

5.4. CANAL PERIQUITOS

Este es el punto más cercano a arrecifes de coral en las islas de Rosario, sobre el costado oeste de punta Barú (Fig.1); además, es el sitio de muestreo más alejado de las desembocaduras del Río Magdalena tanto en Pasacaballos como en Lequerica. El núcleo de sedimento extraído, tiene una longitud de 18 cm.

Los estudios magnéticos del núcleo “Periquitos”, indican que los sedimentos de dicha sección, tienen un predominio de minerales paramagnéticos, con valores χ entre ~ 5 y 8 ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$). Aunque los valores de susceptibilidad magnética son bajos, las mediciones de MRA y MRI muestran la presencia de materiales ferrimagnéticos concentrados en los 10 cm más superficiales del núcleo.

El parámetro de concentración MRA, sugiere que a partir del centímetro 10 hacia arriba, hay un incremento de material ferrimagnético fino, marcado por valores de hasta 260 ($10^{-6} \text{ Am}^2 \text{ Kg}^{-1}$). A profundidad los parámetros MRA Y MRIS alcanzan sus valores mínimos de $12,1$ ($10^{-6} \text{ Am}^2 \text{ Kg}^{-1}$) para el primero y $0,42$ ($10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ Kg}^{-1}$) para el segundo (Fig.14).

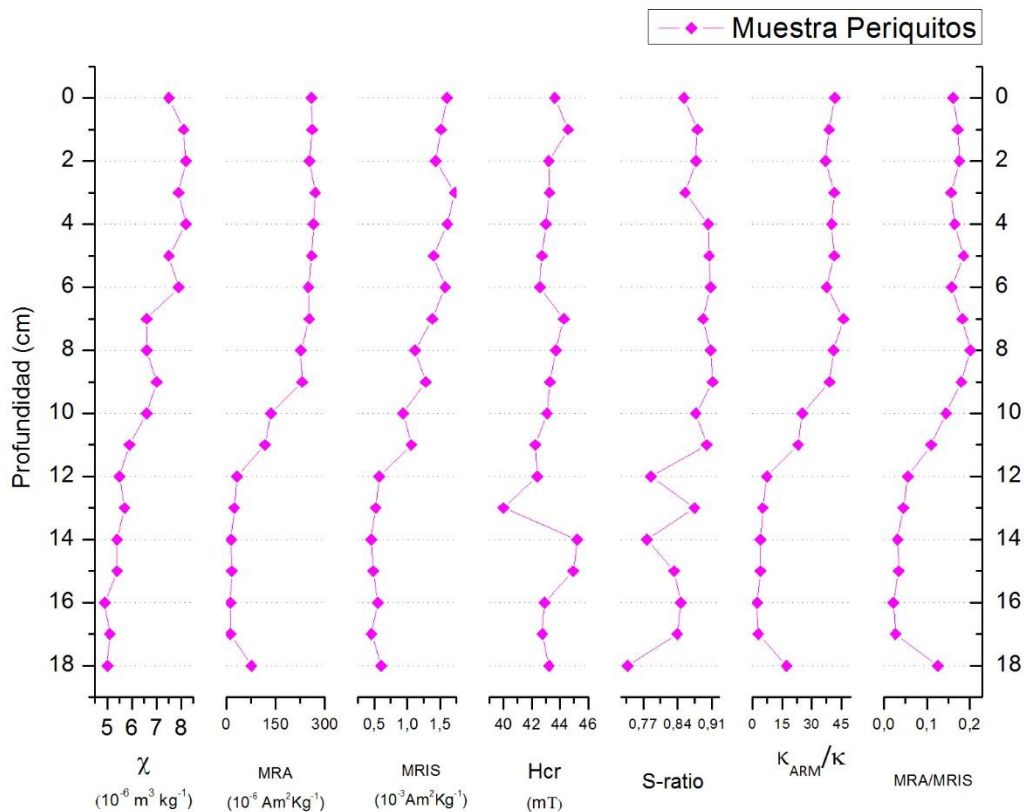


Figura 14. Representación de los diferentes Parámetros Magnéticos medidos para las muestras del núcleo “Periquitos” versus profundidad (cm).

Los parámetros Hcr y S-ratio, indican un componente predominante de la fase magnetita-maghemita, con valores Hcr entre 40 y 45 mT, y un S-Ratio promedio de 0,85; el cambio de estos valores a profundidad se debe a una posible mayor contribución de minerales antiferromagnéticos entre los centímetros 14 y 18 de la sección, comprobados en la deconvolución magnética MRI para el cm 2 de la sección con un aporte del 7.8% y del 13% en el cm 13, en la fase Hematita con $B_{1/2}$ de 562 mT, la contribución de ferrimagnéticos es del 88% en el cm 2 (Fig. 15)

En cuanto al tamaño de grano magnético (relación directa con el parámetro de concentración MRA) indicaría un incremento de este hacia la superficie, sugiriendo que las partículas magnéticas finas podrían estar concentradas en la parte superficial del núcleo y que a profundidad estas cambian tanto su tamaño como su concentración.

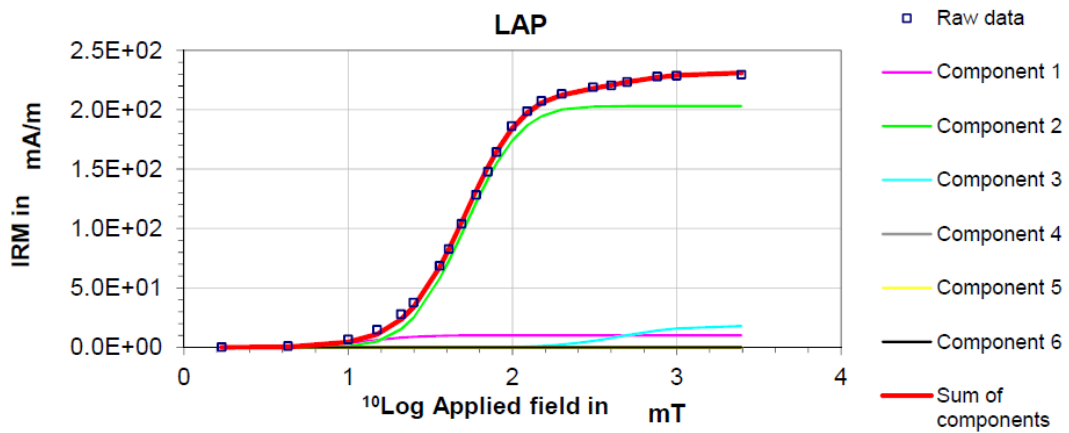


Figura 15. Curvas de MRI de adquisición Total y componentes para la muestra Periquitos cm 2. La Componente 2 corresponde a la contribución ferrimagnética, la Componente 3 a la antiferromagnética.

5.5. PUNTA BARÚ

Ubicado en la parte oeste de la zona de estudio, el núcleo “Barú” fue extraído cerca de Punta Barú (Fig.1) y presenta una longitud de 19 cm de material limo-arcilloso.

Los análisis magnéticos muestran que los sedimentos extraídos en Punta Barú presentan variaciones en la concentración a lo largo del núcleo, visibles en los parámetros χ , MRA y MRIS (Fig16). La χ , indica el predominio de minerales ferrimagnéticos, con valores entre 45 y 77 ($10^{-6}m^3Kg^{-1}$), que aumentan con la profundidad.

Aunque la curva χ muestra una disminución de los valores hacia la superficie, los valores de MRA presentan un comportamiento contrario, variando entre 230 y 275 ($10^{-6}Am^2Kg^{-1}$). Las diferencias entre estos dos parámetros pueden estar relacionadas con la abundancia de granos magnéticos finos, visibles en las mediciones MRA (Fig.16).

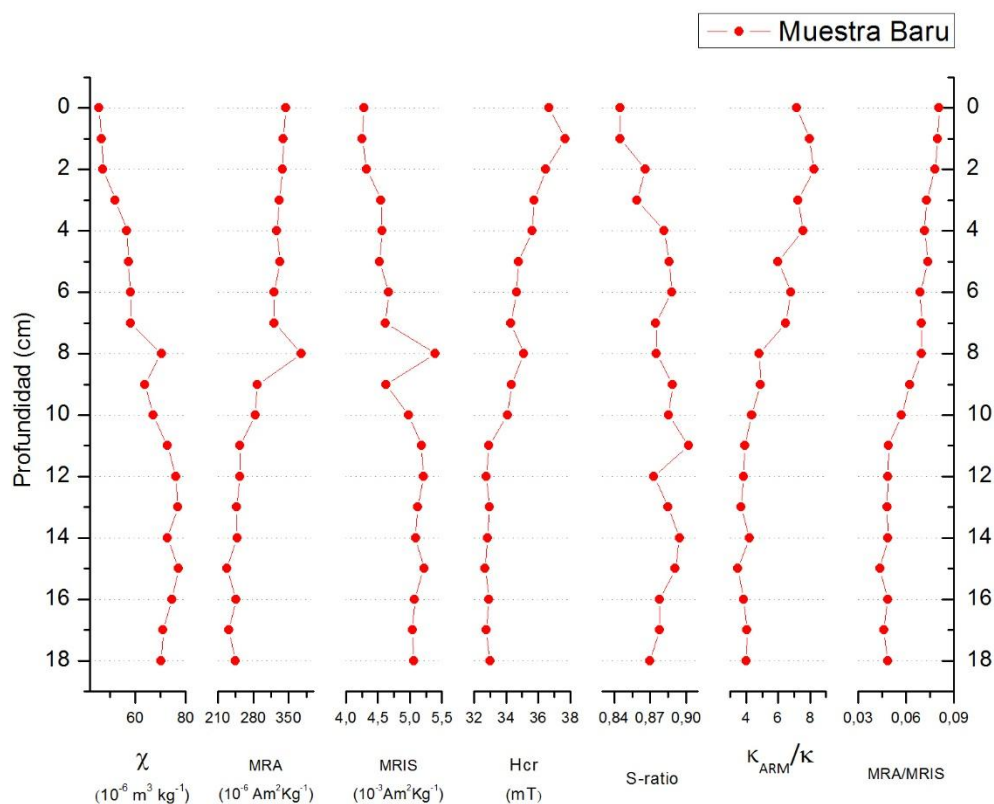


Figura 16. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos en las muestras del núcleo “Barú” versus profundidad (cm).

El parámetro de Hcr, confirma la fase magnetita-maghemita con valores Hcr entre 32 y 38 mT, sin variaciones importantes con la profundidad, este parámetro junto

con el S-ratio (0,84-0,90), representan el predominio de la componente ferrimagnética (Magnetita) sobre la antiferromagnética. Esto, es comprobado además, a través del análisis de componentes IRM, donde la contribución de minerales antiferromagnéticos para el cm 14 del núcleo “Barú”, es de un 8% con respecto a los demás minerales magnéticos; las fases ferrimagnéticas predominan con un 86% (Fig. 17).

Aunque el parámetro Hcr en esta sección no muestra variaciones considerables, si se compara con los demás puntos, se puede observar una diferencia composicional significativa, relacionada con la variación de minerales blandos y su concentración a través del tiempo.

A partir de los valores κ_{MRA}/κ y MRA/MRIS, se puede decir que el tamaño de grano magnético de la sección varía levemente a partir del cm 8 (Fig.22), presentando partículas más finas hacia la superficie. Los valores de MRA máximos hacia la superficie, indican que aunque la concentración de granos ferrimagnéticos en general ha disminuido hacia la superficie (χ y MRIS), las partículas magnéticas finas, se concentran en los primeros 8 cm.

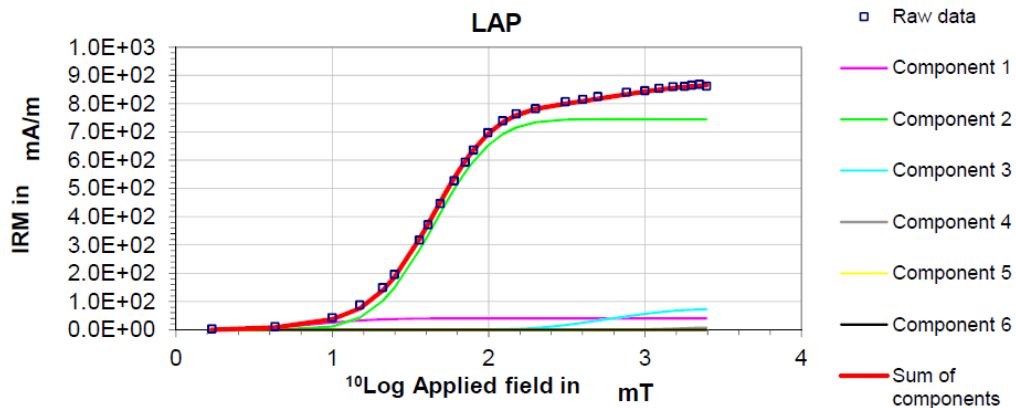


Figura 17. Curvas de MRI de adquisición total y componentes para la muestra Barú cm 14. La Componente 2 corresponde a la contribución ferrimagnética, la Componente 3 a la antiferromagnética.

5.6. BAHÍA BARBACOAS

Este punto es el más cercano a la desembocadura del Río Magdalena en la Bahía de Barbacoas, de todos los sitios analizados en el presente estudio, en Lequerica, fue extraído el núcleo “Barbacoas” con una longitud de 25 cm (Fig.7)

La caracterización magnética de los sedimentos del núcleo “Barbacoas”, muestra a grandes rasgos, que la señal está dominada por minerales ferrimagnéticos con valores χ de 20 a 30 ($10^{-6} \text{m}^3 \text{Kg}^{-1}$) y una MRIS de 4 a 7 ($10^{-3} \text{Am}^2 \text{Kg}^{-1}$) (Fig.18).

Los máximos valores de concentración de minerales magnéticos se encuentran entre los 12 y 20 cm de profundidad, visibles tanto en los valores de χ como en la MRA y MRIS. Esto indica que el núcleo “Barbacoas” tiene un comportamiento contrario a los sitios Dique, Vásquez, Portonaito y Periquitos, los cuales aumentan su concentración hacia la superficie (Fig.18)

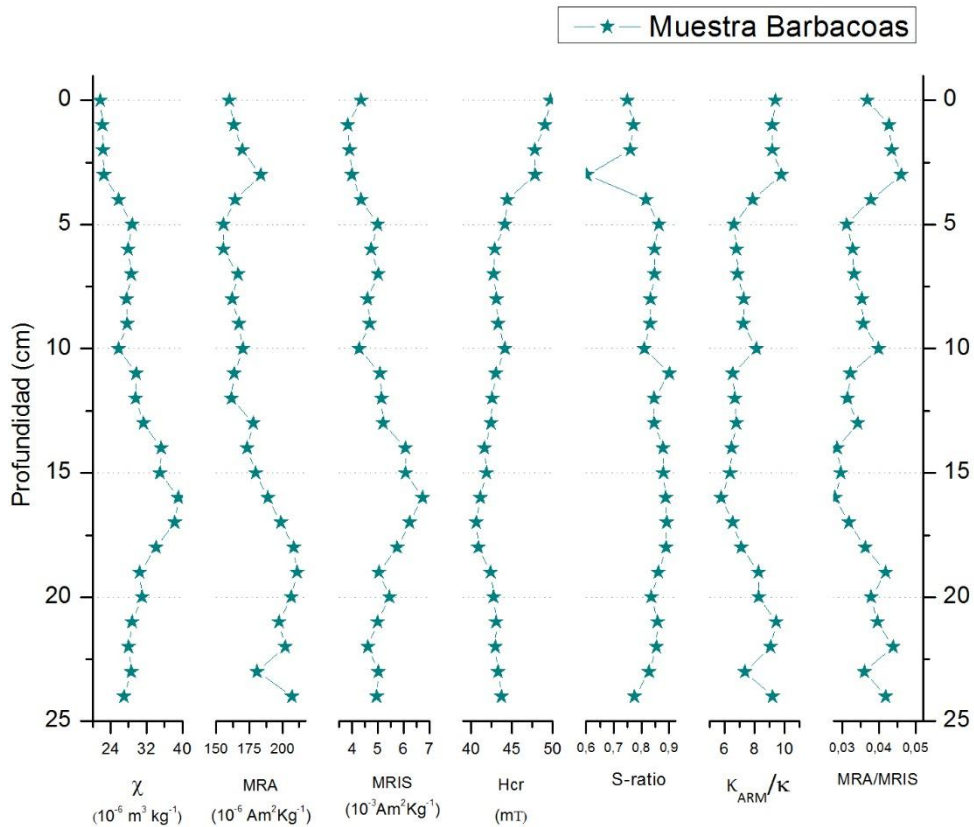


Figura 18. Representación de los diferentes parámetros magnéticos medidos en las muestras del núcleo “Barbacoas” versus profundidad (cm).

Analizando los valores Hcr y S-ratio, se observa que a lo largo del núcleo no hay variaciones composicionales y que en general, se podría decir que los valores caen dentro del campo de la fase Magnetita Maghemita, presente en la totalidad de los núcleos. Sin embargo, en los primeros 4 cm de la sección, se observa un incremento del Hcr, con valores que alcanzan los 50 mT, sugiriendo la presencia de una componente “dura” comprobada a través de los análisis MRI del cm 2 (Fig. 19), donde se observa una contribución de minerales antiferromagnéticos mayor al 10% con valores $B_{1/2}$ de 501 mT (Hematita), y aportes ferrimagnéticos predominantes del 81% con valores $B_{1/2}$ de 62 mT (Anexo 2).

El tamaño de grano magnético presenta pocas variaciones y la mayor parte de las muestras no supera los 0,1 μm , manteniendo una relación con el parámetro MRA que marca los granos ferrimagnéticos de tamaño fino.

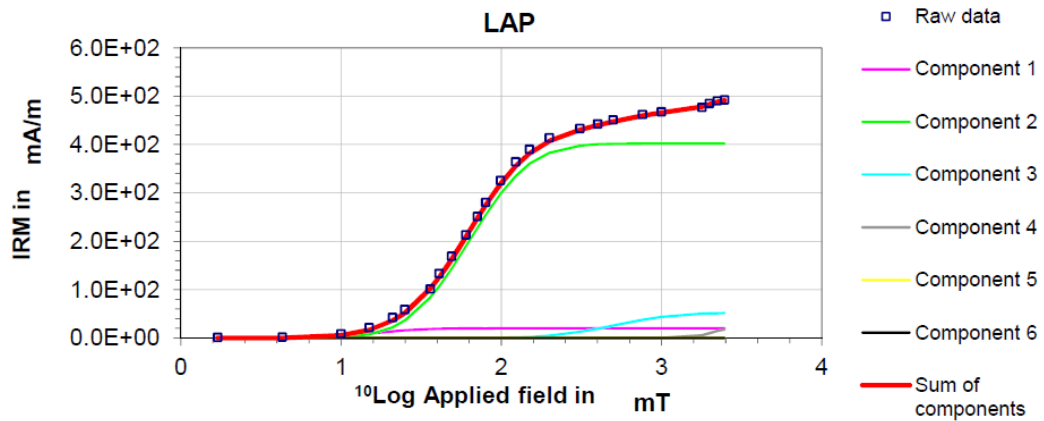


Figura 19. Curvas de MRI de adquisición Total y componentes para la muestra Barbacoas cm 2. La Componente 2 corresponde a la contribución ferrimagnética, la Componente 3 a la antiferrimagnética.

6. DISCUSION

Mediante el presente estudio, se pretende comparar las variaciones de componentes magnéticos en diferentes puntos dentro de la Bahía de Cartagena y Barbacoas (Fig. 20), y como esto puede relacionarse con la distribución y aporte de sedimentos desde el Canal del Dique, a diferentes puntos dentro de la zona de estudio.

Los componentes magnéticos de cada punto, fueron asumidos como sedimentos de origen continental por la ausencia de unidades geológicas con abundante mineralogía magnética en los cuerpos emergidos de la zona. Litologías como las Calizas arrecifales de la formación “La Popa”, presentan minerales del grupo de los carbonatos, silicatos o materia orgánica, de predominio diamagnético, y aportan una señal magnética débil en comparación con minerales paramagnéticos y ferromagnéticos. Por ejemplo, los valores de χ varían ampliamente de acuerdo al tipo de materiales magnéticos: diamagnéticos ($\sim -6 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$), paramagnéticos ($\sim 10^{-6} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$), antiferromagnéticos ($\sim 0,1-5,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$), y ferrimagnéticos ($\sim 0,3-5,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$, Maher et al., 1999; Chaparro et al., 2014).

A partir de los parámetros de concentración χ , MRA y MRIS, se observa que los sitios “Dique” y “Barbacoas”, ubicados en la parte más proximal de la desembocadura del Río Magdalena, presentan una mayor concentración de minerales ferromagnéticos, con valores χ entre 30 y 60 ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$), (Dearing, 1999; Peters y Dekkers, 2003).

Por su parte, los sitios “Periquitos”, “Vásquez” y “Portonaito”, que se encuentran más alejados del Canal del Dique o en sistemas cerrados dentro de la Bahía de Cartagena, presentan valores χ entre 1 y 9 ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$), reflejando una menor concentración de minerales ferrimagnéticos, a través de un dominio de minerales paramagnéticos (Fig.20). Aunque los valores χ de estos puntos son bajos, se comprueba que hay presencia de minerales ferrimagnéticos en todos los núcleos, con base en los valores H_{cr} entre 35 y 45 mT y una contribución menor al 10% para las fases antiferromagnéticas del grupo de la Hematita con valores $B_{1/2}$ entre 450 y 550 mT.

Sobre la bahía de Cartagena, se observa que la concentración de minerales ferrimagnéticos aumenta hacia la superficie en todos los puntos de muestreo, esto es visible en las gráficas de χ , MRA, y MRIS. El núcleo “Dique” por ejemplo, alcanza sus valores máximos de concentración en el centímetro más superficial con un χ de 60 ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$) y sus valores más bajos en los centímetros más profundos con un χ de 29 ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$). Lo mismo se observa en el punto “Vásquez”, donde los

valores MRA Y MRIS aumentan desde centímetro 5 hacia la superficie; Naito se comporta similar, con valores máximos de concentración en los primeros dos centímetros y “Periquitos” continua con la tendencia, incrementando todos sus parámetros de concentración desde el cm nueve hasta la superficie.

Esta tendencia de aumento en la concentración a través del tiempo, refleja el comportamiento de la sedimentación de la Bahía de Cartagena y Barbacoas en las últimas décadas, donde las tasas de sedimentación se han incrementado en un 27 y 50% (Restrepo y Correa, 2014). Así mismo, la presencia de minerales ferrimagnéticos y sus incrementos en la concentración dentro del núcleo “Periquitos”, refleja el alcance de los sedimentos aportados por el Río Magdalena, sobre zonas cercanas a las Islas del Rosario; lo que significa que hay llegada de sedimentos desde el Canal del Dique hasta las zonas coralinas y que a su vez, este material refleja el mismo comportamiento de aumento, de los demás puntos analizados sobre la Bahía de Cartagena.



Figura 20. Representación de la variación de los valores promedios de parámetros de concentración χ y MRA a través del tiempo, en los sedimentos superficiales y profundos de cada núcleo.

En la parte oeste de la zona de estudio, el núcleo “Barú” muestra un comportamiento diferente a los demás puntos, donde los parámetros de concentración, presentan una tendencia de disminución hacia la superficie, con valores de χ de 80 ($10^{-6} \text{m}^3 \text{Kg}^{-1}$) en la base disminuyendo hasta 45 ($10^{-6} \text{m}^3 \text{Kg}^{-1}$) en la superficie.

La Figura 21, relaciona los parámetros de concentración χ y MRIS, en el que se observa una tendencia similar para los núcleos ubicados sobre la Bahía de Cartagena aunque con diferentes magnitudes. Sobre el punto “Barú” la relación muestra una pendiente diferente al resto de las muestras, donde los sedimentos más profundos, marcados en el gráfico con colores más oscuros, muestran valores de concentración mayores para ambos parámetros (Fig. 21). Observando las características magnéticas del núcleo “Barú”, se podría pensar en procesos o condiciones específicas para este sitio, como lo es la presencia de contaminantes antropogénicos, producto de la actividad turística y los procesos intrínsecos de la población que habita Punta Barú. Aunque las diferencias en los parámetros magnéticos χ , MRA, MRIS y Hcr son evidentes, es necesario realizar análisis químicos y de microscopia, para confirmar la incidencia o no, de contaminación antropogénica en esta zona de estudio.

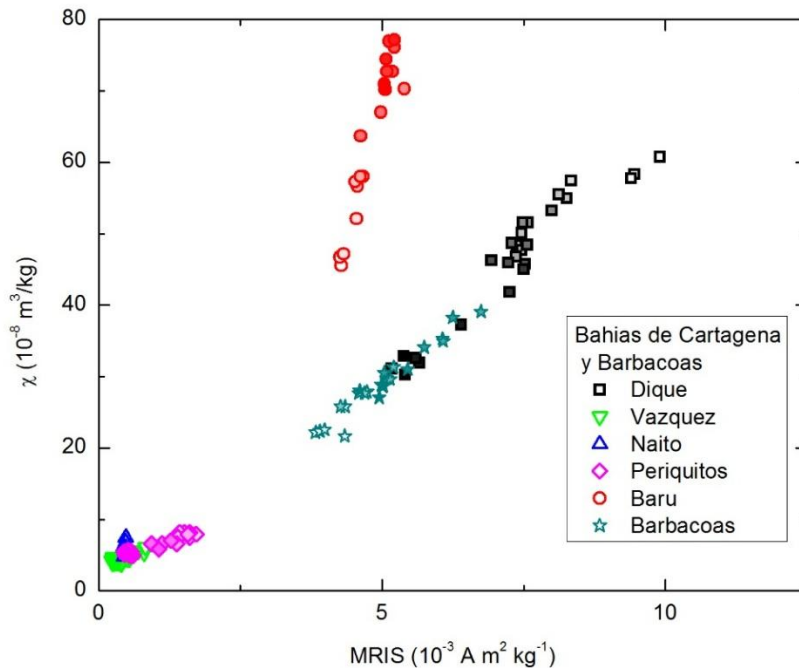


Figura 21. Susceptibilidad magnética versus magnetización remanente isotérmica de saturación. (Los colores oscuros representan las muestras más profundas y los claros las más superficiales).

A partir de los parámetros κ_{MRA}/κ y $MRA/MRIS$, se observaron las variaciones del tamaño de grano magnético en los diferentes puntos de muestreo y su distribución con relación al área fuente. Los puntos más cercanos a la desembocadura del Río Magdalena tanto en Pasacaballos como en Lequerica, “Dique” y “Barbacoas”, presentan un mayor tamaño de grano magnético con valores κ_{MRA}/κ entre 3,2 y 9; así mismo, el grafico de King et al., (1982, Fig. 22), indica un tamaño de partícula magnética entre 0,2 y 1 μm para “Dique” y menor a 0,1 μm en “Barbacoas”.

En los puntos “Vásquez”, “Naito” y “Periquitos”, los tamaños de grano más fino se concentran en la parte superficial del núcleo, donde los valores κ_{MRA}/κ y $MRA/MRIS$ tienden a aumentarse en los primeros 4 cm para “Vásquez”, y desde el cm 10 en “Periquitos”, esto a su vez, lo vemos reflejado en el parámetro de concentración MRA, sensible a partículas ferrimagnéticas especialmente finas, por las características de su adquisición.

Las diferencias en el tamaño de grano magnético entre los puntos estudiados, nos muestran la gradación típica de un sistema deltaico, donde los sedimentos de mayor tamaño, se depositan en la parte más proximal del delta; siendo este el caso de “Dique” y Barbacoas” con tamaños de grano magnético entre 0,1 y 1 μm . Las partículas de menor tamaño, se depositan en puntos más distales o de sistemas cerrados; tales como Vásquez, Naito y Periquitos, con concentraciones de minerales ferrimagnéticos muy finos en su superficie.

Del núcleo Barú, los parámetros κ_{MRA}/κ y $MRA/MRIS$ reflejan poca variación del tamaño de grano magnético, con dimensiones comparables con Dique y Barbacoas (Fig. 22), sin embargo, las tendencias contrarias en los parámetros de concentración y composición, sugieren que “Barú” podría tener aportes desde la población de Punta Barú, por actividades antrópicas (vertimiento de aguas residuales, polución, turismo). Para confirmar estas condiciones de contaminación son necesarios estudios detallados de química y microscopia de barrido electrónico (SEM).

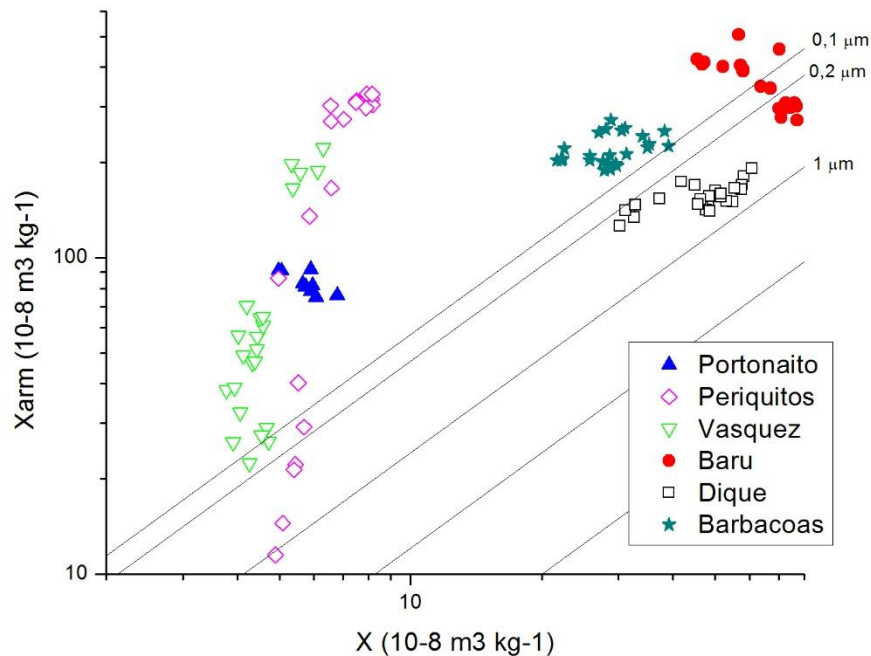


Figura 22. Gráfica de King (King et al., 1982). Este gráfico representa χ_{MRA} contra χ junto con rectas de calibración para distintos tamaños de granos magnéticos.

En la mineralogía magnética de las bahías, hay un dominio de minerales ferrimagnéticos en la fase Magnetita-Maghemita, con valores H_{cr} promedio de 43 mT, a pesar de esto, la contribución de minerales antiferromagnéticos es notoria a partir de los análisis de deconvolución de la señal magnética IRM, donde en ciertas muestras, se presentaron fases duras (de alta coercitividad magnética o antiferromagnéticas), con una contribución de hasta el 13%. Esto nos permite comparar las características de los componentes magnéticos en diferentes puntos, con relación al área fuente de sedimentos.

En la Figura 23, se representan los valores de χ vs. H_{cr} , mostrando las variaciones composicionales en relación a la concentración. El rango de valores H_{cr} , nos muestra como las bahías, presentan dominancia de fases ferrimagnéticas o “blandas” y que la poca contribución de minerales antiferromagnéticos o “duros” se observan principalmente en los sitios “Dique” y “Barbacoas”.

Aunque los valores de concentración de ferrimagnéticos entre “Dique” y “Periquitos” difieren en magnitud, el carácter composicional muestra que estos dos puntos se relacionan en su mineralogía magnética (Fig. 23), esto es visible en los parámetros H_{cr} y S-ratio, sugiriendo que tanto por su contenido magnético como por su comportamiento creciente en la concentración de minerales

ferrimagnéticos, Periquitos tiene aporte de sedimentos del Río Magdalena desde la Bahía de Cartagena.

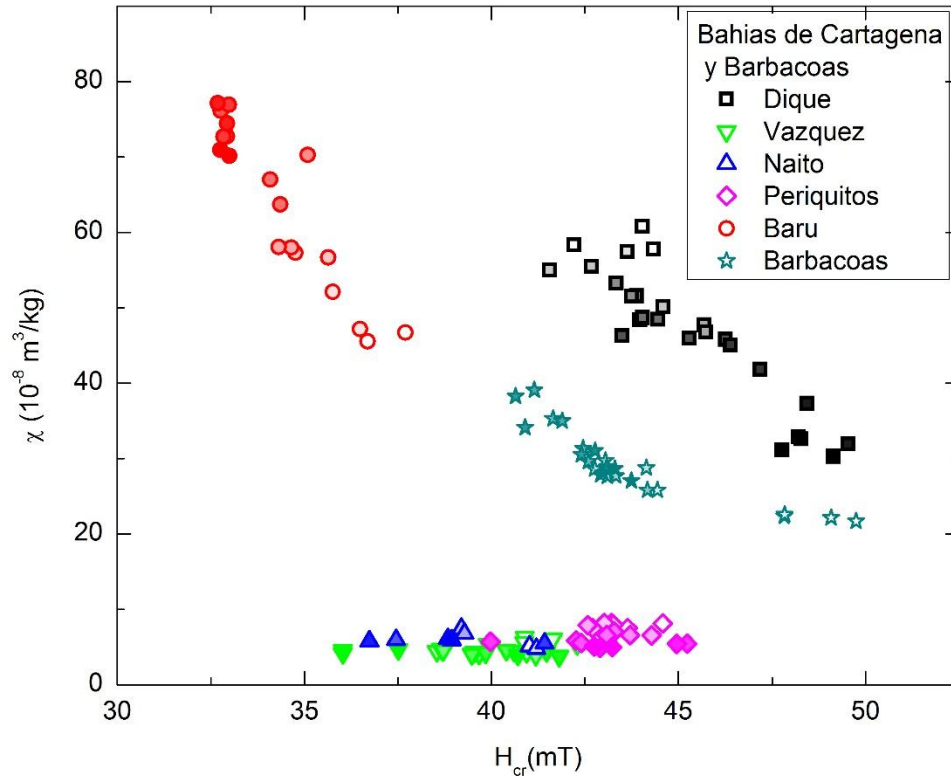


Figura 23. Valores de Susceptibilidad Magnética (χ) versus H_{cr} . (Los colores oscuros representan las muestras más profundas y los claros las más superficiales).

Una situación similar se observa en los sitios “Vasquez” y “Naito”, con rangos H_{cr} entre 36 y 42 mT, mostrando afinidad con las características composicionales de la Bahía de Cartagena, “Barú” sin embargo muestra una relación concentración-composición, muy diferente a los demás puntos, con valores H_{cr} más bajos y tendencias de χ contrarias a la tendencia de los demás sitios.

Según la contribución de las fases magnéticas de cada punto y el análisis de los parámetros H_{cr} y S-ratio, es posible relacionar entre los diferentes sitios de muestreo, la proveniencia de los sedimentos analizados; es el caso de la Bahía de Cartagena, donde todos sus puntos presentan rasgos composicionales similares. En la Bahía de Barbacoas sin embargo, “Barú” difiere mineralógicamente de “Barbacoas”, por la poca contribución de fases antiferromagnéticas, con un H_{cr} entre 32 y 36 mT.

7. CONCLUSIONES

A partir de los estudios magnéticos realizados para los sedimentos extraídos en la Bahía de Cartagena y Barbacoas, se puede concluir lo siguiente:

- A todos los puntos ubicados dentro de la bahía de Cartagena, llegan minerales magnéticos de posible origen continental, en concentraciones diferentes según la cercanía al área fuente. Esto incluye la zona “Periquitos” donde se pensaba, no llegaban aportes directos desde el Canal del Dique.
- Los aumentos en las concentraciones de minerales ferromagnéticos hacia la superficie, en todos los puntos analizados sobre la bahía de Cartagena, evidenciado en los parámetros de concentración MRA, MRI, reflejan el fenómeno creciente de la sedimentación de la Bahía en las ultimas décadas, documentado por diferentes investigadores del área de ciencias de la tierra.
- Las variaciones en el tamaños de grano magnético en los diferentes puntos de estudio, se deben a la gradación típica de sistemas de depositación de deltas, donde las partículas más gruesas, se depositan en la parte más proximal y las más finas en zonas más distales. Así, los puntos más alejados o de sistemas cerrados “Vásquez” “Naito” y “Periquitos”, presentaron tamaños de grano magnético muy fino, y los puntos más cercanos al Canal del Dique, “Dique” y “Barbacoas”, tienen tamaños de grano más grueso.
- Los sedimentos magnéticos depositados en toda el área de estudio, presentan un dominio de la fase Magnetita-Mahemita, con algunos aportes variables de minerales antiferrimagnéticos de contribuciones menores al 13 % en la mayoría de los puntos. Aunque la mineralogía magnética sea muy homogénea, los valores Hcr de toda la Bahía de Cartagena, muestran una misma fuente de sedimentos, con tendencias similares.
- En el núcleo “Barú”, se observan condiciones diferentes a los demás puntos, por el comportamiento de sus parámetros de concentración (decreciente a la superficie), menor contribución de minerales antiferrimagnéticos, y tamaños de grano comparables con los puntos más cercanos al Canal del Dique. Son necesarios estudios más detallados, para determinar las condiciones ambientales del sitio, y la posible incidencia de metales pesados sobre los análisis magnéticos.

- Aunque los parámetros magnéticos en los puntos estudiados, reflejan condiciones de sedimentación específicas, como los aumentos en la descarga de sedimentos dentro de la bahía de Cartagena y la llegada de los mismos hasta las áreas coralinas, sería pertinente un estudio que incluya más sitios de muestreo, para hacer evidente la gradación y llegada de sedimentos desde el Canal del Dique, a zonas arrecifales.

8. BIBLIOGRAFIA

- CHAPARRO, M. A. E., 2006. Estudio de parámetros magnéticos de distintos ambientes relativamente contaminados en Argentina y Antártida. *Geofísica UNAM*, pág. 13-28.
- CHENYIN DONG, WEIGUO ZHANG, QING HE, YAN DONG, LIZHONG YU., 2014. Magnetic fingerprinting of hydrodynamic variations and channel erosion across the turbidity maximum zone of the Yangtze Estuary, China. *Geomorphology*.
- DEARING, J., R. DANN, K. HAY, J. LEES, P. LOVELAND, B. MAHER, y K. O'GRADY, 1996. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys. J. Int.* 124, 228-240.
- DEARING J.A., 1999. Environmental Magnetic Susceptibility; Using the Bartington MS2 System. *Bartington Ltd*.
- DEEPTI V.G. DESSAI, G.N. NAYAK A, N. BASAVAI AH., 2009. Grain size, geochemistry, magnetic susceptibility: Proxies in identifying sources and factors controlling distribution of metals in a tropical estuary, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- DUNLOP, D. J. y S. XU, 1993. A comparison of methods of granulometry and domain structure determination (abstract). *Eos (Trans. Am. Geophys. Un.)*, 74, Fall Meeting suppl., 203.
- KING, J., S. K. BANERJEE, J. MARVIN y Ö. ÖZDEMİR, 1982. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: Some results from lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59, 404-419.
- KRUIVER, P., P., DEKKERS, M. J., HESLOP, D. 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *Earth and Planetary Science Letters*, 189, 269-276.
- PETERS, C. y M. DEKKERS, 2003. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Phys. Chem. Earth*, 28, 659-667.

- PRAJITH, A., PURNACHANDRA RAO V., PRATIMA M. KESSARKAR., 2015. Magnetic properties of sediments in cores from the Mandovi estuary, western India: Inferences on provenance and pollution. *Marine Pollution Bulletin*, abstract.
- RESTREPO JD., ALVARADO EM., 2011. Assessing Major Environmental Issues in the Caribbean and Pacific Coasts of Colombia, South America: An Overview of Fluvial Fluxes, Coral Reef Degradation, and Mangrove Ecosystems Impacted by River Diversion. 290-291.
- RESTREPO JD., CORREA I.D., 2014. Línea Base ambiental Argos Barú y resultados de interés Nacional. Informe técnico, *Area de Ciencias del Mar, Universidad EAFIT*.

ANEXO 1

DIQUE	CONCENTRACION				MINERALOGÍA				TAMAÑO			
	Muestra	χ	MRA	MRIS	χ MRA	Hcr	S-100	S-300	MRIS/ χ	κ FD%	κ MRA/ κ	MRA/MRIS
	Cm	$10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$10^6 \text{ Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-3}\text{Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	m T			KA/m	%		
1	58,3	150,6	9,5	180,2	42,2	0,612	0,922	16,2	1,07	3,09	0,016	
2	60,8	161,2	9,9	191	44,0	0,593	0,889	16,3	0,77	3,14	0,016	
3	57,8	130,7	9,4	169,9	44,3	0,563	0,881	16,3	4,08	2,94	0,014	
4	57,5	120,9	8,3	163,9	43,6	0,583	0,896	14,5	3,43	2,85	0,015	
5	48,3	112,5	7,4	150,3	44,0	0,572	0,879	15,3	0,49	3,11	0,015	
6	55,0	116,8	8,3	149,9	41,6	0,612	0,927	15,0	1,04	2,73	0,014	
7	55,5	122,1	8,1	165,7	42,7	0,576	0,878	14,6	0,19	2,99	0,015	
8	50,1	112,7	7,5	162,7	44,6	0,592	0,926	14,9	1,58	3,25	0,015	
9	47,7	110,1	7,5	141,5	45,7	0,570	0,924	15,6	6,28	2,97	0,015	
10	46,8	120,9	7,4	151,6	45,7	0,551	0,871	15,7	-0,41	3,24	0,016	
11	53,2	119,7	8,0	150,7	43,3	0,604	0,904	15,0	1,80	2,83	0,015	
12	51,6	125,5	7,6	155,5	43,9	0,582	0,902	14,7	6,37	3,02	0,017	
13	51,5	124,3	7,5	159	43,7	0,574	0,910	14,5	3,02	3,08	0,017	
14	48,4	125,6	7,6	156,3	44,5	0,562	0,877	15,6	0,00	3,23	0,017	
15	48,7	111	7,3	140,3	44,0	0,571	0,869	15,0	0,00	2,88	0,015	
16	46,0	117,8	7,2	148,1	45,3	0,559	0,880	15,7	1,86	3,22	0,016	
17	46,3	124,9	6,9	152,6	43,5	0,577	0,915	15,0	2,33	3,30	0,018	
18	45,8	118,4	7,5	147,3	46,3	0,560	0,888	16,4	0,69	3,22	0,016	
19	45,0	133,5	7,5	169,7	46,4	0,542	0,865	16,6	1,39	3,77	0,018	
20	41,8	134,9	7,3	173,6	47,2	0,534	0,870	17,3	0,00	4,15	0,019	
21	37,3	119	6,4	153,3	48,4	0,528	0,881	17,2	3,85	4,11	0,019	
22	31,9	110,3	5,7	140,6	49,5	0,515	0,863	17,7	-2,98	4,40	0,019	

23	32,6	105,8	5,6	133,8	48,3	0,523	0,873	17,2	9,37	4,10	0,019
24	30,3	97,5	5,4	125,8	49,1	0,510	0,848	17,8	2,79	4,16	0,018
25	31,1	109,7	5,2	141	47,8	0,545	0,890	16,6	7,89	4,53	0,021
26	32,9	112,7	5,4	146,5	48,2	0,548	0,883	16,4	1,32	4,46	0,021

VASQUEZ	CONCENTACION				MINERALOGÍA				TAMAÑO		
Muestra	χ	MRA	MRIS	χ MRA	Hcr	S-100	S-300	MRIS/ χ	κ FD%	κ MRA/ κ	MRA/MRIS
Cm	$10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$10^6 \text{ Am}^2 \text{ Kg}^{-1}$	$10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ Kg}^{-1}$	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	m T			KA/m	%		
1	6,3	172,7	1,1	221,9	40,9	0,785	0,977	16,8	8,62	35,18	0,163
2	5,3	156,5	0,8	197,8	42,3	0,781	0,942	15,0	-12,28	37,14	0,196
3	5,6	150,1	0,7	185,6	40,9	0,822	0,955	12,4	5,08	33,28	0,216
4	6,1	152,4	0,8	188	41,7	0,797	0,960	13,5	6,35	30,76	0,184
5	5,4	136,2	0,6	165,7	39,9	0,854	0,994	11,7	0,00	30,86	0,216
6	4,4	48,4	0,4	56,3	38,5	0,749	0,984	9,1	4,08	12,67	0,119
7	4,4	43,2	0,5	51,3	40,6	0,730	1,004	11,7	2,00	11,56	0,083
8	4,3	17,4	0,2	22,4	40,9	0,619	0,873	5,3	23,40	5,26	0,077
9	4,7	22,8	0,3	26,2	38,7	0,643	0,871	5,8	18,97	5,56	0,084
10	3,9	24,4	0,2	26,1	41,2	0,664	0,901	6,3	11,11	6,67	0,100
11	4,1	26,2	0,3	32,4	39,7	0,577	0,766	8,1	2,17	7,97	0,080
12	4,3	38,6	0,4	46,5	39,5	0,752	0,977	9,6	8,00	10,75	0,093
13	4,6	49,6	0,5	61	40,4	0,783	1,001	9,9	9,43	13,31	0,109
14	4,5	51,5	0,5	64,5	38,7	0,831	1,051	12,0	0,00	14,26	0,095
15	4,0	48,1	0,4	56,6	39,5	0,758	0,958	8,7	-6,25	14,07	0,137
16	4,6	51,6	0,5	65,1	40,4	0,748	0,959	10,8	7,27	14,20	0,105
17	4,2	56,1	0,4	70,4	39,8	0,750	0,949	9,2	-9,43	16,75	0,146
18	4,1	43,2	0,4	49,1	36,0	0,826	1,010	9,1	-14,58	11,90	0,116
19	4,4	39,4	0,4	47	41,5	0,695	0,927	9,2	11,11	10,71	0,097

20	3,8	32,4	0,4	38,2	41,8	0,697	0,944	10,7	-6,25	10,11	0,080
21	4,7	24,5	0,3	29,1	37,5	0,741	1,002	5,4	10,91	6,23	0,098
22	4,5	22,5	0,3	27,4	36,0	0,780	1,012	7,6	5,45	6,03	0,066
23	3,9	33,6	0,3	38,8	40,7	0,740	0,995	7,3	-6,00	9,85	0,117

NAITO	CONCENTACION				MINERALOGÍA				TAMAÑO			
	Muestra	χ	MRA	MRIS	χ MRA	Hcr	S-100	S-300	MRIS/ χ	κ FD%	κ MRA/ κ	MRA/MRIS
	Cm	$10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$10^6 \text{ Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-3}\text{Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	m T			KA/m	%		
	1	5,1	71,7	0,5	91,2	41,0	0,735	0,928	9,1	5,97	18,33	0,154
	2	4,8	72,0	0,4	90,8	41,2	0,740	0,941	9,4	-3,12	17,96	0,160
	3	7,4	63,5	0,5	81,0	39,2	0,783	0,965	6,4	10,87	14,12	0,133
	4	6,8	59,3	0,5	76,0	39,3	0,713	0,914	7,0	10,00	11,21	0,125
	5	5,9	65,9	0,5	78,5	38,9	0,771	0,963	8,2	1,33	13,30	0,137
	6	5,9	65,8	0,5	81,7	37,4	0,798	0,993	7,9	16,05	13,73	0,139
	7	5,5	68,1	0,5	82,9	41,4	0,713	0,938	8,5	-6,58	14,66	0,146
	8	5,8	74,8	0,5	91,7	36,7	0,764	0,950	9,4	-2,53	15,52	0,138

PERIQUITOS	CONCENTRACION				MINERALOGÍA				TAMAÑO			
	Muestra	χ	MRA	MRIS	χ MRA	Hcr	S-100	S-300	MRIS/ χ	κ FD%	κ MRA/ κ	MRA/MRIS
Cm	$10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$10^{-6} \text{ Am}^2 \text{ Kg}^{-1}$	$10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ Kg}^{-1}$	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	m T				KA/m	%		
1	7,5	258,7	1,6	313,5	43,6	0,686	0,852	21,3	-3,75	41,72	0,161	
2	8,1	261,3	1,5	316,3	44,6	0,699	0,880	18,6	-2,11	38,94	0,173	
3	8,2	252,3	1,4	303,7	43,2	0,709	0,877	17,5	0,00	37,15	0,176	
4	7,9	270,0	1,7	329,3	43,3	0,683	0,855	21,7	3,33	41,54	0,157	
5	8,2	265,6	1,6	328,3	43,0	0,728	0,902	19,7	6,59	40,21	0,165	
6	7,5	259,7	1,4	310,0	42,7	0,728	0,904	18,7	-2,78	41,36	0,185	
7	7,9	249,4	1,6	297,1	42,6	0,732	0,906	20,0	5,41	37,61	0,158	
8	6,6	251,9	1,4	302,3	44,3	0,723	0,891	21,1	-2,74	46,14	0,182	
9	6,6	226,0	1,1	269,7	43,7	0,763	0,907	17,1	5,56	41,10	0,202	
10	7,0	231,0	1,3	273,8	43,3	0,638	0,911	18,2	-7,14	38,99	0,180	
11	6,6	136,0	0,9	165,8	43,1	0,677	0,877	14,3	8,86	25,20	0,145	
12	5,9	116,9	1,1	135,4	42,3	0,303	0,899	18,1	-6,15	23,09	0,110	
13	5,5	32,1	0,6	40,3	42,4	0,552	0,785	10,4	1,79	7,29	0,056	
14	5,7	23,7	0,5	29,2	40,0	0,420	0,874	9,1	10,94	5,13	0,046	
15	5,4	14,4	0,5	22,3	45,2	0,542	0,777	8,3	6,67	4,09	0,032	
16	5,4	16,6	0,5	21,4	45,0	0,649	0,833	9,0	0,00	3,97	0,034	
17	4,9	12,1	0,6	11,5	42,9	0,529	0,846	11,3	0,00	2,35	0,022	
18	5,1	12,3	0,5	14,5	42,7	0,560	0,839	9,0	10,34	2,85	0,027	
19	5,0	76,2	0,6	86,1	43,2	1,620	0,738	12,2	-6,52	17,34	0,125	

BARU	CONCENTACION				MINERALOGÍA				TAMAÑO		
Muestra	χ	MRA	MRIS	χ MRA	Hcr	S-100	S-300	MRIS/ χ	κ FD%	κ MRA/ κ	MRA/MRIS
Cm	$10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$10^6 \text{ Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-3}\text{Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	m T			KA/m	%		
1	45,5	344,2	4,3	423,8	36,7	0,667	0,845	9,4	1,86	7,16	0,080
2	46,7	339,6	4,3	408,8	37,7	0,673	0,845	9,1	3,24	7,96	0,080
3	47,2	338,3	4,3	414,4	36,5	0,685	0,866	9,2	-1,31	8,25	0,078
4	52,1	331,8	4,5	401,7	35,8	0,683	0,859	8,7	2,37	7,25	0,073
5	56,7	326,7	4,6	505,5	35,6	0,707	0,882	8,1	1,36	7,56	0,072
6	57,3	333,5	4,5	404,8	34,8	0,710	0,886	7,9	1,04	6,01	0,074
7	58,0	322,1	4,7	392,6	34,7	0,710	0,888	8,1	1,00	6,80	0,069
8	58,0	321,1	4,6	388,8	34,3	0,718	0,875	8,0	1,03	6,49	0,069
9	70,3	375,9	5,4	455,2	35,1	0,702	0,875	7,7	1,93	4,84	0,070
10	63,7	288,0	4,6	347,6	34,4	0,719	0,889	7,3	0,88	4,91	0,062
11	67,0	283,9	5,0	342,5	34,1	0,712	0,885	7,4	0,38	4,35	0,057
12	72,7	254,0	5,2	308,7	32,9	0,728	0,902	7,1	0,65	3,91	0,049
13	76,1	253,3	5,2	308,5	32,8	0,705	0,873	6,8	0,60	3,85	0,049
14	76,9	246,9	5,1	300,6	33,0	0,710	0,885	6,7	3,10	3,68	0,048
15	72,7	247,8	5,1	298,2	32,8	0,722	0,895	7,0	0,78	4,22	0,049
16	77,1	227,7	5,2	272,0	32,7	0,735	0,891	6,8	1,90	3,48	0,044
17	74,4	245,9	5,1	297,8	32,9	0,707	0,878	6,8	0,81	3,86	0,048
18	71,0	232,0	5,0	277,3	32,8	0,701	0,878	7,1	-0,20	4,07	0,046
19	70,1	245,0	5,1	296,3	33,0	0,717	0,870	7,2	-0,22	4,02	0,048

BARBACOAS	CONCENTRACION				MINERALOGÍA				TAMAÑO		
	Muestra	χ	MRA	MRIS	χ MRA	Hcr	S-100	S-300	MRIS/ χ	κ FD%	κ MRA/ κ
Cm	$10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$10^6 \text{ Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-3}\text{Am}^2\text{Kg}^{-1}$	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	m T			KA/m	%		
1	21,7	159,9	4,3	203,2	49,7	0,464	0,749	20,0	5,21	9,38	0,037
2	22,2	163,4	3,8	203,3	49,1	0,491	0,771	17,3	3,18	9,18	0,043
3	22,3	169,6	3,9	205,2	47,8	0,496	0,759	17,5	3,69	9,18	0,043
4	22,5	183,5	4,0	220,7	47,8	0,512	0,603	17,7	1,35	9,79	0,046
5	25,8	164,3	4,3	203,3	44,4	0,567	0,816	16,9	2,92	7,88	0,038
6	28,8	155,6	5,0	190,4	44,1	0,768	0,863	17,4	3,32	6,62	0,031
7	27,9	155,6	4,7	189,2	42,9	0,597	0,848	17,0	1,00	6,79	0,033
8	28,6	166,5	5,0	196,1	42,8	0,609	0,848	17,5	1,61	6,86	0,033
9	27,6	162,1	4,6	201,2	43,1	0,593	0,833	16,6	0,32	7,28	0,035
10	27,7	167,3	4,7	200,2	43,3	0,600	0,832	16,9	3,17	7,24	0,036
11	25,8	170,2	4,3	209,4	44,2	0,577	0,811	16,5	1,98	8,12	0,040
12	29,7	163,7	5,1	194,9	43,0	0,642	0,901	17,1	3,53	6,55	0,032
13	29,6	161,5	5,1	198,1	42,6	0,607	0,846	17,4	3,28	6,69	0,031
14	31,3	178,0	5,2	212,4	42,5	0,604	0,846	16,6	2,83	6,78	0,034
15	35,3	173,4	6,1	228,3	41,6	0,636	0,877	17,2	3,08	6,47	0,029
16	35,0	179,7	6,1	222,7	41,9	0,634	0,880	17,4	0,32	6,37	0,030
17	39,1	189,0	6,7	225,3	41,2	0,651	0,888	17,3	1,83	5,77	0,028
18	38,3	198,7	6,2	250,7	40,6	0,657	0,892	16,3	1,39	6,55	0,032
19	34,1	208,4	5,7	242,2	40,9	0,659	0,889	16,9	0,30	7,11	0,036
20	30,5	210,9	5,0	252,1	42,4	0,616	0,861	16,5	2,80	8,26	0,042
21	31,0	206,5	5,5	256,7	42,8	0,616	0,836	17,6	0,95	8,28	0,038
22	28,8	197,5	5,0	272,3	43,1	0,624	0,858	17,3	1,06	9,44	0,040
23	28,0	202,0	4,6	254,5	43,0	0,622	0,855	16,4	2,88	9,07	0,044
24	28,6	180,8	5,0	210,9	43,3	0,594	0,828	17,5	2,33	7,36	0,036

25	27,0	207,1	5,0	248,8	43,7	0,560	0,774	18,3	5,18	9,20	0,042
----	------	-------	-----	-------	------	-------	-------	------	------	------	-------

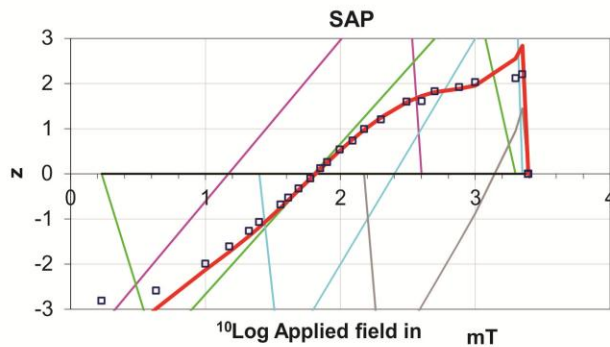
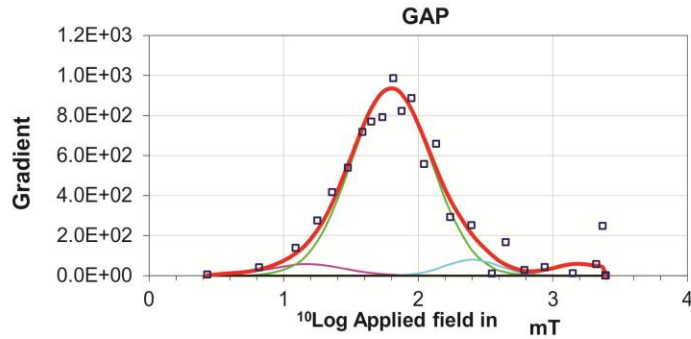
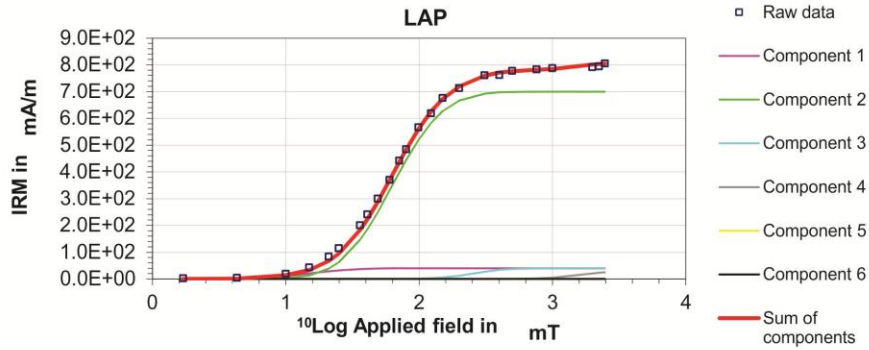
ANEXO 2

IRM COMPONENT ANALYSIS

Dique5

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	1.98E+03	$-IRM_{0.3T}/IRM_{1T}$	0.931	
GAP	1.47E+05	$(1-IRM_{0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.965	
SAP	2.53E+00			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	4.9	4.00E+01	1.17	14.8	0.28
2	86.4	7.00E+02	1.80	63.1	0.30
3	4.9	4.00E+01	2.40	251.2	0.20
4	3.7	3.00E+01	3.20	1584.9	0.20

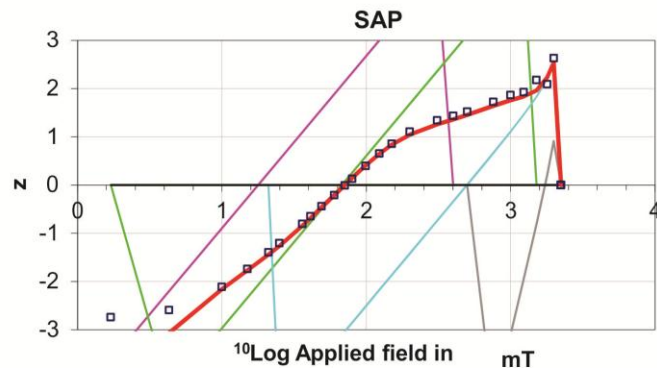
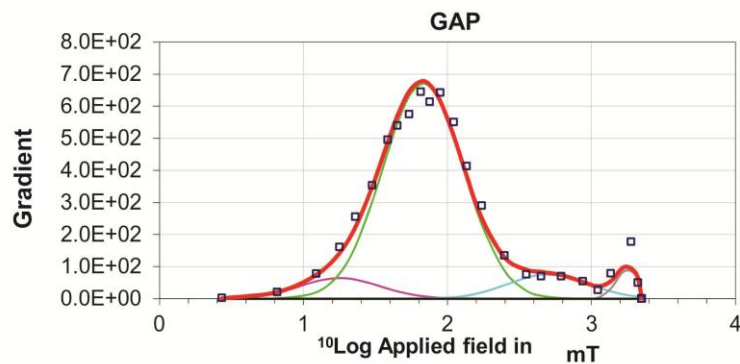
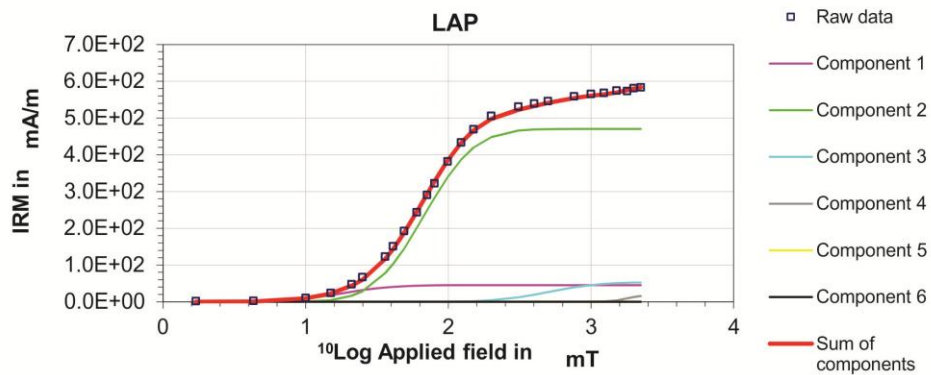


IRM COMPONENT ANALYSIS

Dique24

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	5.77E+02	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.861	
GAP	3.97E+04	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.930	
SAP	2.66E+00			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	7.7	4.50E+01	1.25	17.8	0.28
2	80.2	4.70E+02	1.83	67.6	0.28
3	9.0	5.30E+01	2.70	501.2	0.28
4	3.1	1.80E+01	3.25	1778.3	0.08

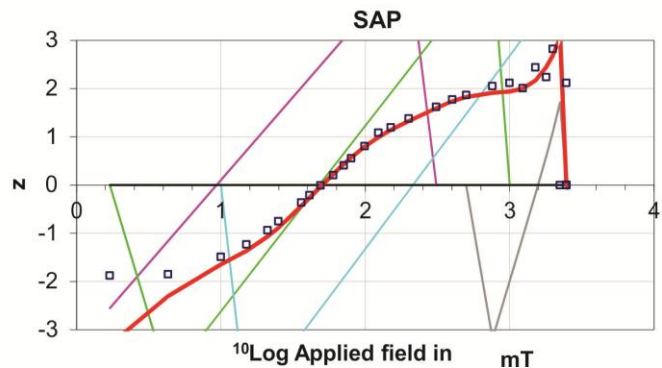
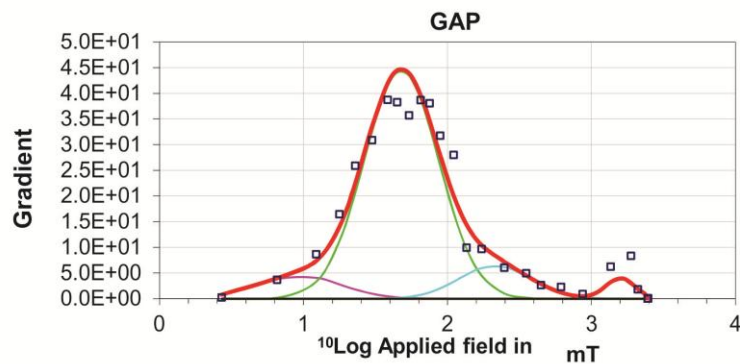
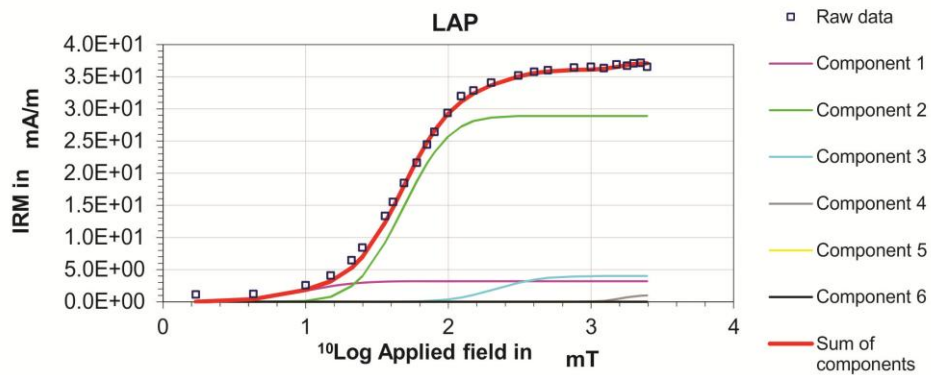


IRM COMPONENT ANALYSIS

Vazquez10

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	1.04E+01	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.936	
GAP	5.82E+02	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.968	
SAP	2.56E+00			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	8.6	3.20E+00	0.97	9.3	0.29
2	77.9	2.89E+01	1.68	47.9	0.26
3	10.8	4.00E+00	2.33	213.8	0.25
4	2.7	1.00E+00	3.20	1584.9	0.10

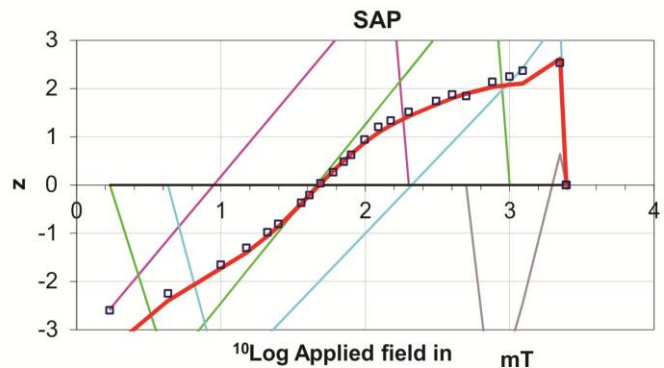
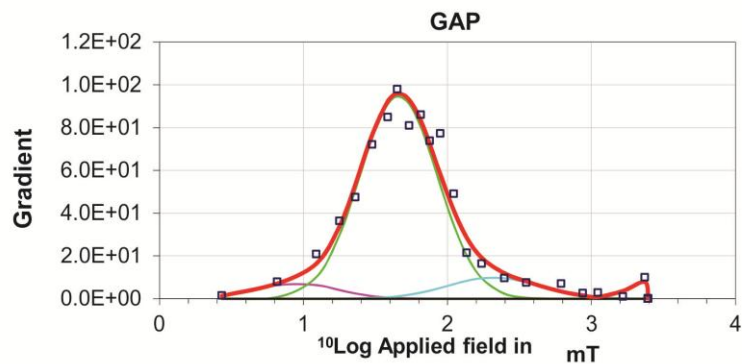
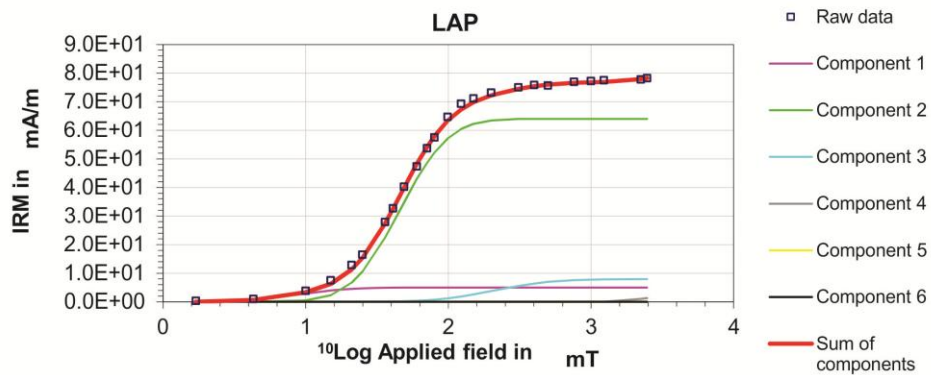


IRM COMPONENT ANALYSIS

Naito2

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	1.64E+01	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.937	
GAP	8.75E+02	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.969	
SAP	8.76E-01			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	6.3	5.00E+00	0.95	8.9	0.28
2	81.1	6.40E+01	1.66	45.7	0.27
3	10.0	7.90E+00	2.32	208.9	0.32
4	2.5	2.00E+00	3.35	2238.7	0.10

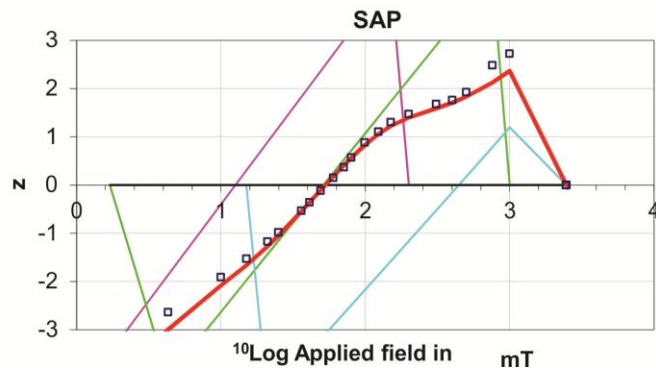
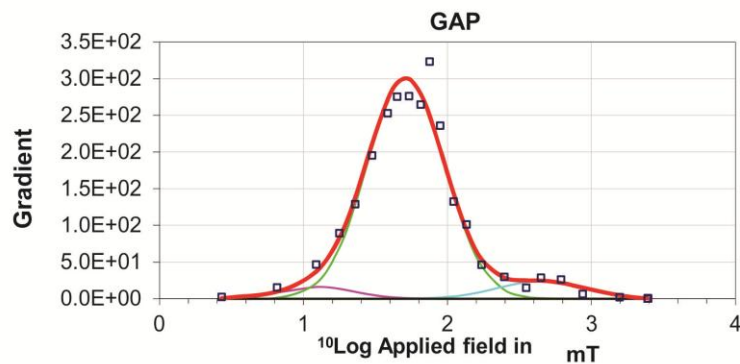
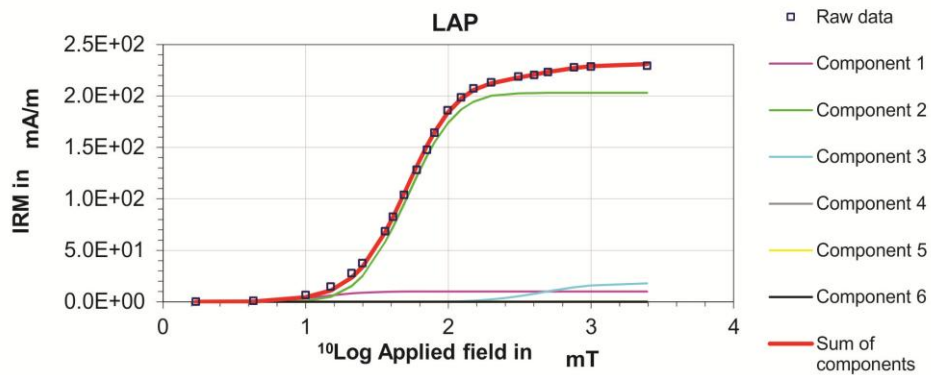


IRM COMPONENT ANALYSIS

Periquitos2

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	9.64E+01	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.902	
GAP	9.08E+03	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.951	
SAP	1.18E+00			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	4.3	1.00E+01	1.10	12.6	0.25
2	87.9	2.03E+02	1.71	51.3	0.27
3	7.8	1.80E+01	2.65	446.7	0.30

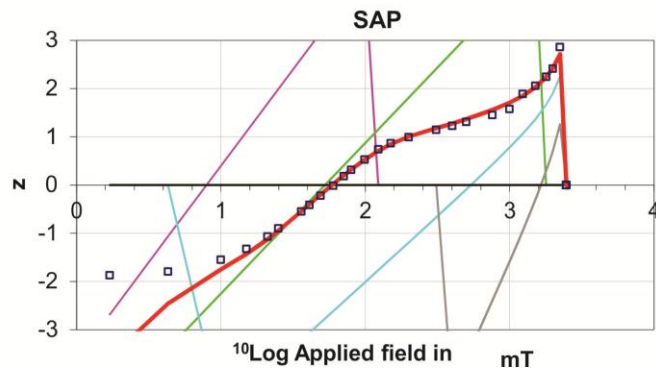
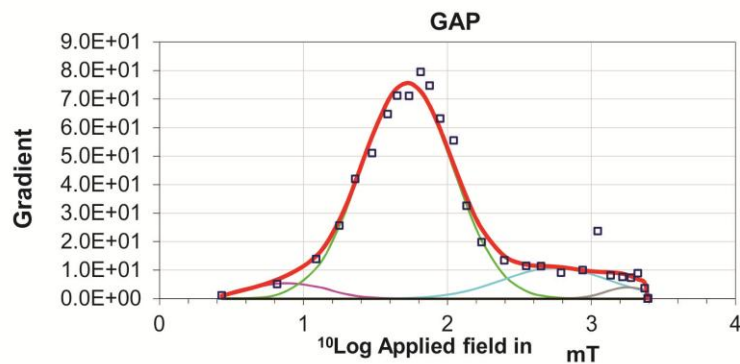
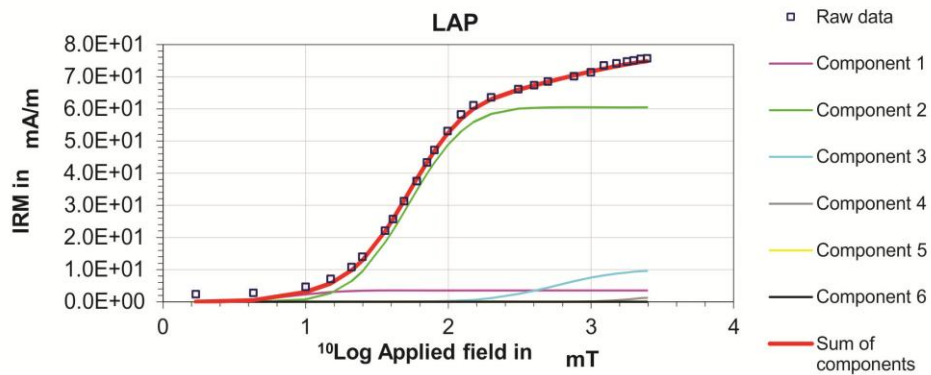


IRM COMPONENT ANALYSIS

Periquitos13

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	2.51E+01	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.838	
GAP	5.24E+02	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.919	
SAP	3.47E+00			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	4.6	3.50E+00	0.90	7.9	0.25
2	80.1	6.05E+01	1.72	52.5	0.32
3	13.2	1.00E+01	2.75	562.3	0.37
4	2.0	1.50E+00	3.25	1778.3	0.15

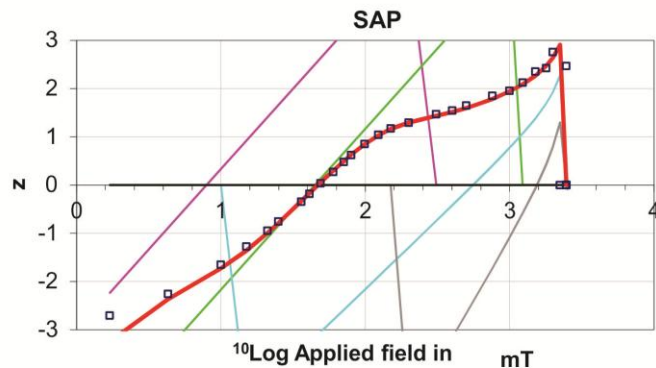
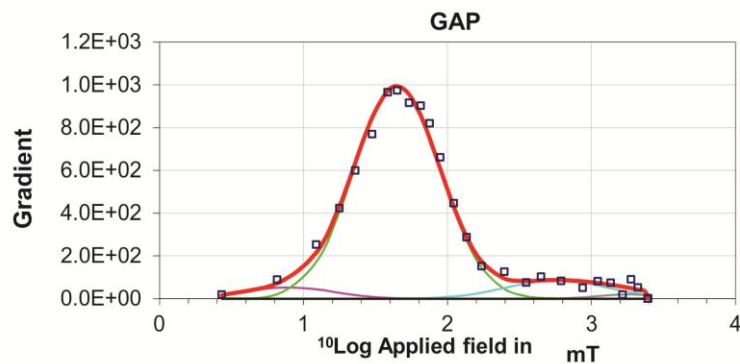
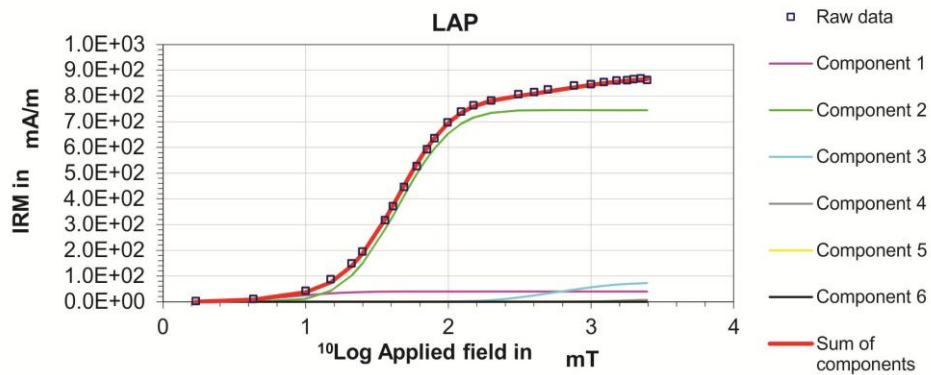


IRM COMPONENT ANALYSIS

Baru14

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	8.72E+02	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.895	
GAP	5.67E+04	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.948	
SAP	3.50E-01			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	4.6	4.00E+01	0.90	7.9	0.30
2	85.6	7.45E+02	1.65	44.7	0.30
3	8.6	7.50E+01	2.76	575.4	0.35
4	1.1	1.00E+01	3.25	1778.3	0.20

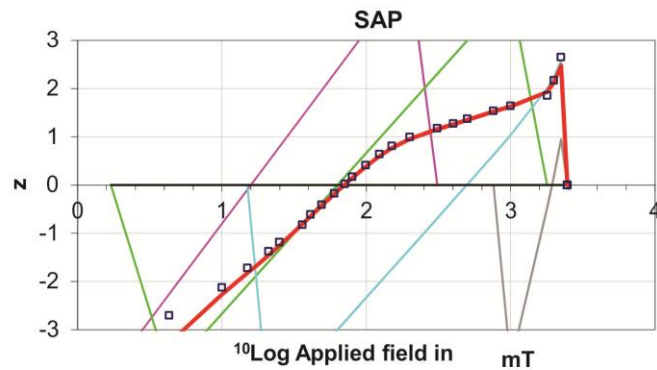
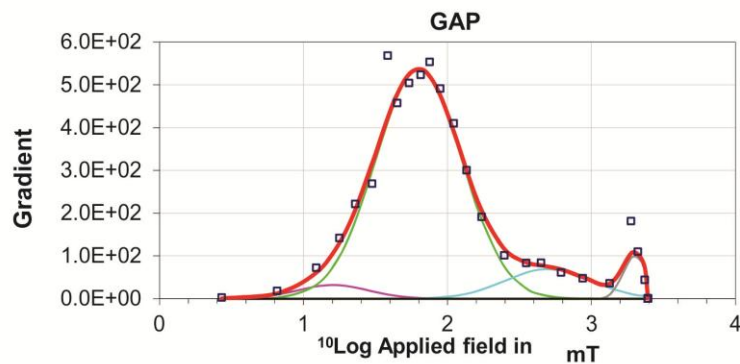
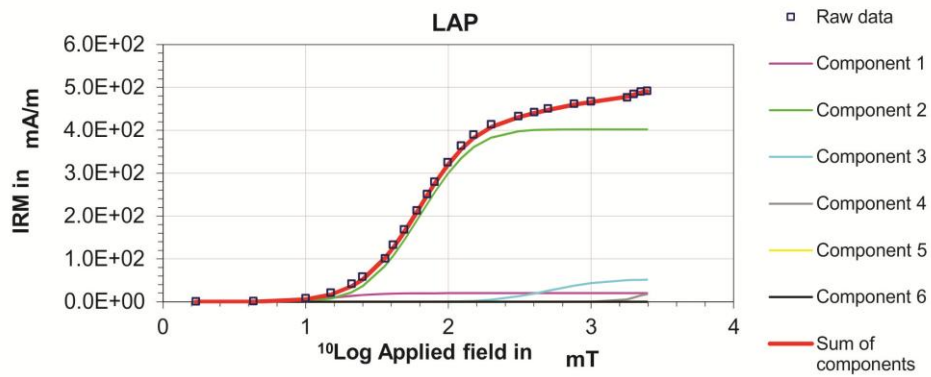


IRM COMPONENT ANALYSIS

Barbacoas2

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	4.75E+02	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.843	
GAP	3.38E+04	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.921	
SAP	2.96E+00			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	4.0	2.00E+01	1.20	15.8	0.25
2	81.4	4.02E+02	1.80	63.1	0.30
3	10.5	5.20E+01	2.70	501.2	0.30
4	4.0	2.00E+01	3.30	1995.3	0.08



IRM COMPONENT ANALYSIS

Barbacoas 17

	Squared residuals	S-ratio	calculated	measured
LAP	1.40E+03	$-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T}$	0.922	
GAP	6.72E+04	$(1-IRM_{-0.3T}/IRM_{1T})/2$	0.961	
SAP	8.11E-01			

component	contribution	SIRM	$\log(B_{1/2})$	$B_{1/2}$	DP
	%	mA/m	mT	mT	mT
1	91.2	6.70E+02	1.75	56.2	0.30
2	2.7	2.00E+01	2.40	251.2	0.22
3	6.1	4.50E+01	3.10	1258.9	0.25

