

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CALIBRACIÓN DEL SEPARADOR MAGNÉTICO DE ALTA
INTENSIDAD MAGNET-LIFT MLH (13)111-5 Y
COMPARACIÓN CON EL SEPARADOR ISODINÁMICO
FRANTZ, PARA LA CONCENTRACIÓN DE GRANDES
VOLÚMENES DE MINERALES ACCESORIOS
PERTENECIENTES A ROCAS SEDIMENTARIAS DE LAS
FORMACIONES ISNOTÚ Y BETIJOQUE DEL ESTADO
TRUJILLO.**

Trabajo Especial de Grado Presentado
ante la Ilustre Universidad Central de
Venezuela para optar al título de Ingeniero
Geólogo, por la Br. Anaya Orozco, Raquel
Cristina.

Caracas, Noviembre de 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CALIBRACIÓN DEL SEPARADOR MAGNÉTICO DE ALTA INTENSIDAD MAGNET-LIFT MLH (13)111-5 Y COMPARACIÓN CON EL SEPARADOR ISODINÁMICO FRANTZ, PARA LA CONCENTRACIÓN DE GRANDES VOLÚMENES DE MINERALES ACCESORIOS PERTENECIENTES A ROCAS SEDIMENTARIAS DE LAS FORMACIONES ISNOTÚ Y BETIJOQUE DEL ESTADO TRUJILLO.

Tutor Académico: MSc. Mauricio Bermúdez

Trabajo Especial de Grado Presentado
ante la Ilustre Universidad Central de
Venezuela para optar al título de Ingeniero
Geólogo, por la Br. Anaya Orozco, Raquel
Cristina.

Caracas, Noviembre de 2004

Caracas, Noviembre de 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller, titulado:

“Calibración del separador magnético de alta intensidad Magnet-Lift MLH (13)111-5 y comparación con el separador isodinámico Frantz, para la concentración de grandes volúmenes de minerales accesorios pertenecientes a rocas sedimentarias de las Formaciones Isnotú y Betijoque del Estado Trujillo”.

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. _____
Jurado

Prof. _____
Jurado

MSc. Mauricio A., Bermúdez C.
(Tutor)

A mis amados padres, por su amor y dedicación.

A mis apreciados hermanos por ser mis mejores amigos.

A Dios y a la Virgen por guiarme y darme fuerza para vencer todos los obstáculos.

A mi amor German, por su cariño y apoyo en la culminación de esta fase de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Ilustre Universidad Central de Venezuela. Recinto universitario donde me forme.

A mi tutor académico, Profesor Mauricio Bermúdez por sus consejos, apoyo y dedicación.

Al Profesor Santiago Marrero del Instituto de Ciencias de la Tierra, por su cariño y apoyo.

Al Profesor Jorge Mora por sus importantes sugerencias.

A mi querido hermano Alfimar por estar siempre a mi lado y ayudarme en todo momento.

A mi Amor German por creer en mi y darme lo mejor de si.

A los Profesores Franco Urbani, Sebastián Grande, José Centeno, Lenin González, Omar Godeliett, Manuel García, por su disposición sincera para prestarme ayuda durante las investigaciones previas a este trabajo.

A todos los profesores que ayudaron en mi formación.

A la Lic. Morella de Castillo y al Ing. Eduardo Castillo, gracias por su cariño y amable atención.

A mis amigos de la escuela de geología Carlos, Cristian, Diego, Edegma, Eudo, y a todos aquellos que me han brindado un gesto de amistad durante mi carrera.

Anaya O., Raquel C.

**CALIBRACIÓN DEL SEPARADOR MAGNÉTICO DE ALTA
INTENSIDAD MAGNET-LIFT MLH (13)111-5 Y
COMPARACIÓN CON EL SEPARADOR ISODINÁMICO
FRANTZ, PARA LA CONCENTRACIÓN DE GRANDES
VOLÚMENES DE MINERALES ACCESORIOS
PERTENECIENTES A ROCAS SEDIMENTARIAS DE LAS
FORMACIONES ISNOTÚ Y BETIJOQUE DEL ESTADO
TRUJILLO.**

**Tutor Académico: MSc. Mauricio A., Bermúdez C. Tesis. Caracas, U. C. V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica (Geología). 2004,**

122 páginas.

Palabras Claves: Método de huellas de fisión, minerales accesorios, separación magnética, susceptibilidad magnética, separador isodinámico, separador de alta intensidad.

Resumen

En Venezuela, el Laboratorio de Termocronología de la UCV durante los últimos cuatro años estudia los terrenos fuentes de las cuencas de Maracaibo y Barinas, mediante su reconstrucción tectotérmica. La clave de ésta, se encuentra en los sedimentos molásicos ubicados en dichas cuencas. Separando los minerales accesorios existentes en grandes volúmenes de sedimentos, se realizan los estudios de los terrenos fuentes, mediante la datación por el Método de Huellas de Fisión (MHF).

En la metodología convencional de preparación de muestras para el MHF, se usa el separador magnético isodinámico Frantz, el cual fue calibrado para este fin por Hess en 1959, pero este no tiene la capacidad de manejar grandes volúmenes (sólo

100 grs.) por sus características de construcción. En el diseño del Laboratorio de Termocronología, se adquirió el separador magnético de alta intensidad Magnet-lift MLH (13)111-5 el cual puede procesar un mayor volumen de muestra (>1Kgrs). El problema era que este equipo no se había calibrado para la separación magnética de minerales pesados.

El objetivo principal de este trabajo fue: utilizar los minerales (17) más importantes considerados por Hess para la calibración del Frantz, para calibrar el magnet-lift. Se construyeron tablas y curvas de calibración, obteniendo parámetros óptimos para la separación magnética en el caso de muestras monominerales, y en el caso de muestras formadas por mezclas de minerales distinguibles ópticamente. El resultado fue aplicado a un conjunto de sedimentos de las Formaciones Isnotú y Betijoque del Flanco Norte de Los Andes Venezolanos, los minerales fueron reconocidos por análisis de difracción de rayos X, obteniéndose resultados similares a los del separador Frantz, con la diferencia de que el tiempo de procesamiento en este fue de dos semanas y en el magnet-lift de tres días, esto optimiza el proceso de preparación de la muestra para el MHF del Laboratorio de Termocronología de la UCV.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN	1
1 MARCO INTRODUCTORIO	3
Introducción	3
Descripción de la problemática planteada.....	3
Objetivos	5
Objetivo General	5
Objetivos específicos	5
Importancia del trabajo y aporte	6
Metodología	6
<i>Oficina</i>	6
<i>Laboratorio</i>	7
2 MARCO GEOLOGICO.....	10
Introducción	10
Marco Estructural de Venezuela Occidental.....	11
Formación Isnotú (Mioceno medio a superior) Estado Trujillo.....	12
Formación Betijoque (Mioceno-Plioceno) Estado Trujillo.....	14
Miembro Vichú (Mioceno) Estado Trujillo	17
Miembro Sanalejos (Mioceno) Estado Trujillo.....	17
3 PROSPECCIÓN MAGNÉTICA.....	19
Introducción	19
Campo Magnético	19
Momentos Magnéticos	22
Los momentos magnéticos de átomos.....	23
4 SEPARACIÓN MAGNÉTICA.....	43
Introducción	43
Separación Magnética	43
<i>Equipos y Aplicaciones de la Separación Magnética</i>	44
PRINCIPIOS Y MECANISMOS DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA.....	49
<i>Fuerzas en competencia</i>	50
<i>Antecedentes del separador Frantz</i>	54
Preparación de las muestras para la separación	55

Aplicaciones del separador Frantz	56
Fundamentos de la separación magnética en el separador MAGNET LIFT	
CARPCO MODELO MLH (13)111-5:.....	62
Descripción del quipo Magnet- Lift.....	67
<i>Tolva</i>	67
<i>Bandeja o carril vibratorio (fedder)</i>	67
<i>Rodillo inducido</i>	68
<i>Electroimán</i>	70
<i>Separador manual (Splitter)</i>	71
5 RESULTADOS.....	75
Introducción	75
Calibración del separador magnético con muestras monominerales:	78
<i>Minerales Ferromagnéticos</i>	79
<i>Minerales Paramagnéticos</i>	86
<i>Minerales Diamagnéticos</i>	93
Calibración para muestras formadas por dos minerales.....	97
Aplicación de estos resultados a arenas de las Formaciones Isnotú y Betijoque del Estado Trujillo:.....	99
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
REFERENCIAS.....	104

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: (A) separador magnético isodinámico Frantz L-1 y (B) separador magnético de alta intensidad magnet-lift MLH (13)111-5.....</i>	4
<i>Figura 1.2: Diagrama de flujo de la metodología empleada en la calibración del separador Magnético Magnet-Lift.....</i>	8
<i>Figura 2.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio.....</i>	10
<i>Figura 2.2: Mapa geológico estructural de Venezuela occidental.....</i>	11
<i>Figura 2.3: Extensión geográfica de la Formación Isnotú.....</i>	13
<i>Figura 2.4: Extensión geográfica de la Formación Betijoque.....</i>	14
<i>Figura 3.1 a) Patrón de campo magnético que rodean a un imán de barra como se ve con limaduras de hierro. b) Patrón de campo magnético entre polos distintos de dos imanes de barra. c) Patrón de campo magnético entre polos iguales de dos imanes de barras.....</i>	20
<i>Figura 3.2 a) La fuerza magnética es perpendicular tanto a v como a B. b) Las fuerzas magnéticas F_B ejercidas sobre dos partículas cargadas opuestamente y que se mueven a la misma velocidad en un campo magnético están dirigidas de manera opuesta.....</i>	21
<i>Figura 3.3 Un electrón que se mueve en una órbita circular.....</i>	24
<i>Figura 3.4 Modelo clásico de un electrón girando en torno a su eje.....</i>	25
<i>Figura 3.5 a) Orientación aleatoria de momentos magnéticos atómicos en una sustancia desmagnetizada. b) Cuando se aplica un campo externo B_0, los momentos magnéticos atómicos se alinean con el campo, produciendo en la muestra un vector de magnetización neto M.....</i>	31
<i>Figura 3.6 Un arreglo de enrollado toroidal empleado para medir las propiedades magnéticas de un material. El toroide está hecho del material bajo estudio, y el circuito que contiene al galvanómetro mide el flujo magnético.....</i>	32
<i>Figura 3.7 Curva de magnetización para un material ferromagnético.....</i>	33
<i>Figura 3.8 Espiras de histéresis para a) un material ferromagnético duro y b) un material ferromagnético blando.....</i>	34
<i>Figura 3.9 Desmagnetización de un material ferromagnético mediante su transportación a través de espiras de histéresis sucesivas.....</i>	34
<i>Figura 3.10 Orientación de los momentos magnéticos en las sustancias ferromagnéticas.....</i>	36
<i>Figura 3.11 Magnetización versus temperatura absoluta para una sustancia ferromagnética.....</i>	37
<i>Figura 4.1: piezas que componen el separador isodinámico Frantz L-1.....</i>	54
<i>Figura 4.2 Determinación de la susceptibilidad magnética en el separador isodinámico Frantz.....</i>	58
<i>Figura 4.3: Tamaño del alimentador de la muestra del Frantz.....</i>	61
<i>Figura 4.4: Comportamiento de las partículas con susceptibilidad positiva.....</i>	63
<i>Figura 4.5: Comportamiento de las partículas con susceptibilidad negativa.....</i>	66

<i>Figura 4.6: Tolva y carril vibratorio.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.7 Rodillo inducido.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.8 Regletas de calibración del separador magnet-lift.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.9: Curva de calibración del equipo (Manual equipo Carpcó MLH (13) 111-5).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.10: Componentes del separador manual (Splitter).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.11: Partes de control y ajuste del separador magnet-lift.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.1: Gráfica esquemática de un patrón de difracción por rayos X.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.2 Difractograma de minerales.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.3: Curvas de calibración del mineral magnetita a 5 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.4: Curvas de calibración del mineral magnetita a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.5: Curvas de calibración del mineral pirrotita a 5 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.6: Curvas de calibración del mineral pirrotita a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.7: Curvas de calibración del mineral granate a 5 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.8: Curvas de calibración del mineral granate a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.9: Curvas de calibración del mineral hornblenda a 5 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.10: Curvas de calibración del mineral Hornblenda a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.11: Curvas de calibración del mineral apatito a diferentes rpm y a una abertura de 33°.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.12 curva de calibración del mineral corindón diferentes rpm a una abertura de 33°.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.13: Curvas de calibración del mineral esfena mezclada con diopsido a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.14: Imagen de la separación de minerales magnéticos a 0,8Amp.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.15: Difractograma generado para la muestra de arenas a 0,8 Amp....</i>	<i>101</i>

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Intensidad de campo magnético (H).....	22
Tabla 3.2: Magnitudes comunes en magnetismo.....	27
Tabla 3.3: Susceptibilidad magnética de algunas sustancias paramagnéticas y diamagnéticas a 300°K.....	28
Tabla 3.4: Temperaturas de Curie para varias sustancias ferromagnéticas.....	38
Tabla 3.5: Tipos de magnetismos.....	39
Tabla 4.1: Descripción de algunos equipos de baja intensidad para separación magnética en húmedo.....	45
Tabla 4.2: Descripción de algunos equipos de baja intensidad para separación magnética en seco.....	46
Tabla 4.3: Descripción de algunos equipos de alta intensidad para separación magnética en húmedo.....	47
Tabla 4.4: Descripción de algunos equipos de alta intensidad para separación magnética en seco.....	48
Tabla 4.5. : Susceptibilidad Magnética de masa (X_m) en 10^{-6} C.G.S.....	59
Tabla 4.6: Minerales pesados comunes en rocas sedimentarias ordenados según su susceptibilidad magnética.....	60
Tabla 5.1: Resultados de la calibración del mineral magnetita a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	80
Tabla 5.2: Resultados de la calibración del mineral magnetita a 50 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	81
Tabla 5.3: Resultados de la calibración del mineral pirrotita a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	83
Tabla 5.4: Resultados de la calibración del mineral pirrotita a 50 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	85
Tabla 5.5: Resultados de la calibración del mineral granate a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	87
Tabla 5.6: Resultados de la calibración del mineral granate a 50 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	89
Tabla 5.7: Resultados de la calibración del mineral hornblenda a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	91
Tabla 5.8: Resultados de la calibración del mineral hornblenda a 50 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.....	92
Tabla 5.9: Resultados de la calibración del mineral apatito a diferentes rpm y una abertura de 33°.....	94
Tabla 5.10 Resultados de la calibración del mineral corindón a diferentes rpm una abertura de 33°.....	96

Tabla 5.11: Resultados de la separación de la mezcla esfena-diopsido a 50 rpm y aberturas de 10°, 25° y 35°.	97
Tabla 5.12: Valores óptimos para la separación de minerales pesados comunes en rocas sedimentarias ordenados según su susceptibilidad magnética en el separador magnet-lift.....	98

INTRODUCCIÓN

El separador magnético de alta intensidad Magnet-Lift MLH (13) 111-5 fue adquirido de PDVSA Services, Inc para el Laboratorio de Termocronología, por el Profesor Jorge Mora en 1995, con la finalidad de separar magnéticamente grandes porciones de minerales magnéticos sedimentarios, para su posterior uso en la concentración de minerales pesados, con la finalidad de fecharlos por el Método de Huellas de Fisión (Wagner, 1992). Sin embargo este equipo no se había utilizado ya que no estaba calibrado.

Este separador forma parte de una combinación de equipos existentes en el Laboratorio de Termocronología para la separación y concentración de minerales accesorios: como lo son la mesa Wilfley, la tamizadora, trituradora, y centrifuga Magstream.

Según el manual de la compañía fabricante (Carpco, 1996), el Separador Magnético Magnet-Lift MLH (13) 111-5 de alta intensidad electromagnética, es de diseño compacto y posee una alta capacidad para la separación isodinámica. El cual consiste de un rodillo rotativo, constituido por una serie de discos alternos de material magnético y no magnético. El electroimán induce un campo magnético en las laminaciones del rodillo, originando regiones de altos gradientes de campo magnético.

El objetivo general de este trabajo es obtener los parámetros de calibración del separador magnético de alta intensidad Magnet-Lift MHL (13) 111-5 existente en el Laboratorio de Termocronología de la UCV, lo suficientemente óptimos como los establecidos por HESS (1959) para el separador isodinámico Frantz, ya que el separador Frantz es el comúnmente utilizado en la mayoría de los laboratorios de huellas de fisión. Pero este es menos eficiente que el separador magnético de alta intensidad Magnet-Lift MLH (13) 111-5

Para cumplir este objetivo, se ha dividido la presente investigación en cinco capítulos:

El primero trata acerca de los objetivos específicos realizados a fin de calibrar el separador magnético Magnet-Lift, y se hace una comparación entre este equipo y el separador Frantz. En el segundo capítulo se proporciona la ubicación geográfica de donde se tomaron las muestras, el marco estructural de la zona de estudio, para posteriormente hacer énfasis en el Estado Trujillo, específicamente en las Formaciones Isnotú y Betijoque.

En el tercer capítulo se hace referencia a los fundamentos teóricos de la prospección magnética terrestre, proporcionando un resumen de todo lo relacionado con el magnetismo; las definiciones básicas de campo magnético, fuerza magnética, momento magnético y susceptibilidad magnética entre otros. Se estudia la clasificación de la materia según su susceptibilidad magnética (ferromagnéticas, Ferrimagnéticas, antiferromagnéticas, paramagnéticas y diamagnéticas). Además se presentan los valores de susceptibilidad magnética, curva de magnetización y ciclo de histéresis de las sustancias. El capítulo dedica una parte a los imanes, definición, tipos, modo de producirlos y controlarlos, así como la utilidad de cada uno de estos.

En el cuarto capítulo se estudia la separación magnética, se presenta una breve reseña histórica de la separación magnética, así como algunos equipos utilizados y sus aplicaciones más comunes en la separación magnética, los métodos húmedos y secos, los separadores de alta y baja intensidad.

En el último capítulo se presentan los resultados, las tablas de calibración del equipo para minerales “puros”, los resultados y estimación estadística de parámetros para mezclas de minerales y los resultados de la aplicación de estas curvas de calibración a sedimentos de las Formaciones Isnotú y Betijoque.

CAPITULO I

MARCO INTRODUCTORIO

Introducción

En este capítulo se expone el planteamiento del problema, el objetivo general, los objetivos específicos, la importancia y el aporte de este trabajo, una breve descripción del equipo a calibrar, y la metodología utilizada para cumplir los objetivos.

Descripción de la problemática planteada

Se han realizado numerosos estudios matemáticos con el fin de optimizar los equipos de separación magnética, uno de ellos fue el trabajo de AKTAO en 1977, donde los resultados obtenidos fueron de gran utilidad a la industria, en este trabajo se realizó una metodología estadística para obtener parámetros ideales de separación magnética con los equipos de la época.

La separación de minerales pesados o accesorios es de gran importancia para la datación de eventos tectotérmicos por el método de huellas de fisión. Esta separación se hace por diferentes métodos, entre los más usados están: la separación por densidad, por gravedad y la separación magnética, esta última se puede hacer tanto en seco como en húmedo. Para la separación magnética en seco se utilizan varios aparatos que actualmente se encuentran en el mercado, siendo el Frantz uno de los más usados y existente en el Laboratorio de Termocronología. También existe el separador de alta intensidad Magnet-Lift, estos dos equipos son mostrados en la figura 1.1



(A)



(B)

Figura 1.1: (A) Separador Magnético Isodinámico Frantz L-1 y (B) Separador Magnético de Alta Intensidad Magnet-Lift MLH (13)111-5.

El separador magnético Frantz, en comparación con el separador magnético de alta intensidad Magnet-Lift MLH (13) 111-5 presenta algunas desventajas tales como la poca capacidad en el manejo de grandes volúmenes (aproximadamente 1 kilogramo de muestra en el Magnet Lift, en comparación con 100 gramos en el Frantz), y la baja intensidad, (máximo 2,2 Amperes, en comparación con 3 Amperes en el Magnet Lift)- El equipo a calibrar se encuentra en el Laboratorio de Termocronología de la UCV desde 1996 sin recibir mantenimiento, y fue utilizado en 1999 por Chiquito, D., para la disminución de hierro por métodos magnéticos en arenas silíceas, trabajo en la cual se alcanzaron las especificaciones requeridas para hacer fibra de vidrio y filtrado de aguas pero no para hacer vidrio. También se realizó una aplicación de separación magnética para la concentración de minerales pesados de areniscas pertenecientes a las Formaciones Trujillo y Misoa en el trabajo de Coronado y Rey (2001).

Para el reemplazo del separador Frantz por el Magnet-Lift es necesario que este último este calibrado, para ello se requiere la elaboración de tablas de calibración utilizando los mismos minerales que uso HESS en 1959 para la calibración del separador Frantz. En este último trabajo se presentan los distintos tipos de minerales, los amperajes a los cuales son separados y las pendientes laterales y frontales utilizadas. En contraste con el separador Magnet Lift, es necesario para realizar la misma tabla de calibración, considerar otras variables como por ejemplo: las

revoluciones del rodillo inducido, el amperaje requerido por el aparato, ángulo de abertura que posea el splitter y la tasa de alimentación.

Objetivos

Objetivo General

Obtener parámetros de calibración óptimos del separador magnético de alta intensidad Magnet-Lift MLH (13) 111-5 existente en el Laboratorio de Termocronología de la UCV, para la concentración de minerales pesados con el fin de fechar eventos tectotérmicos por el Método de Huellas de Fisión.

Objetivos específicos

- Describir el funcionamiento y los principios teóricos prácticos de los equipos Magnet-Lift y Frantz.
- Realizar análisis de difracción de Rayos X para la identificación de diecisiete (17) minerales magnéticos (ferromagnéticos, paramagnéticos) y no magnéticos (diamagnéticos) los mismos usados por Hess en 1959, para la calibración del Frantz.
- Procesar y calibrar el equipo Magnet-Lift con los minerales descritos anteriormente, tamizados previamente con intervalos de aberturas de: $60 < x < 80$ y $100 < x < 140$, donde x es el diámetro del grano.
- Elaborar tablas de calibración para muestras de un solo mineral.
- Procesar y calibrar muestras mezcladas de estos minerales que puedan ser fácilmente identificados por propiedades ópticas.
- Elaborar tablas de calibración para estas mezclas.
- Procesar 50 Kilogramos de areniscas pertenecientes a la formación Isnotú-Betijoque, con los parámetros obtenidos en las calibraciones realizadas.
- Realizar análisis de difracción de rayos X a cada separado magnético de la muestra por amperaje.

Importancia del trabajo y aporte

Este trabajo servirá para que el Laboratorio de Termocronología de la UCV, posea una mayor capacidad de desempeño en cuanto a la separación de minerales magnéticos, que en conjunto con el Separador Centrífugo Magnético Magstream permita concentrar grandes cantidades de minerales pesados, sin hacer uso de líquidos altamente tóxicos y cancerígenos como el Bromoformo. Todos estos minerales posteriormente serán utilizados como cronotermómetros para el fechado de eventos tectotérmicos por huellas de fisión.

Los resultados que de aquí se deriven podrán ser utilizados no sólo para la datación de minerales y rocas por el método de huellas de fisión (WAGNER, 1992) sino también para otras aplicaciones mineras. Además de esto, es importante que pueda contarse con las primeras referencias de la calibración de este equipo en la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV, ya que en la actualidad es casi nula esta información.

Metodología

Esta etapa fue dividida en dos sub-etapas: oficina y laboratorio

Oficina

La metodología implementada en esta sub-etapa consistió en:

- a) (Uso de las bases de datos: GeoRef (Termocronología de la UCV), Science Citation Index (IVIC), las bibliotecas nacionales (Intevp, PDVSA, ULA, UDO, LUZ, USB), Ministerio de Energía Minas, Instituto de Ingeniería (MCT) e Internet.
- b) Estudiar los principios físicos del magnetismo terrestre, y de la magnetización en rocas y minerales.

- c) Familiarizarse con técnicas convencionales como: Difracción de rayos X, e interpretar los espectros arrojados de tales técnicas para roca total y para el separado de minerales puros.
- d) Familiarizarse con cada uno de los equipos de laboratorio, lectura de cada uno de los manuales y aprender las medidas de seguridad en el laboratorio.
- e) Realizar una comparación entre las separaciones isodinámicas magnéticas estándar y las de altas intensidades.

Laboratorio

La metodología consistió en lo siguiente:

- a) Preparación, trituración, tamizado y separado visual de diecisiete minerales (17) puros, de acuerdo a la lista de minerales usadas por Hess (1959) para la calibración del separador magnético Frantz.
- b) Preparación de muestras para estudios de difracción de rayos X.
- c) Elaboración de tablas de calibración y producción del equipo.
- d) Elaboración de un procedimiento estándar para la separación magnética de minerales en el equipo Magnet-Lift.
- e) Concentración de minerales pesados de muestras de arenas provenientes de las Formaciones Betijoque e Isnotú.
- f) Separación magnética de estos minerales.
- g) Análisis de difracción de rayos X a estos minerales.

Toda esta metodología puede ser representada en forma de diagrama de flujo como sigue en la figura 1.2.

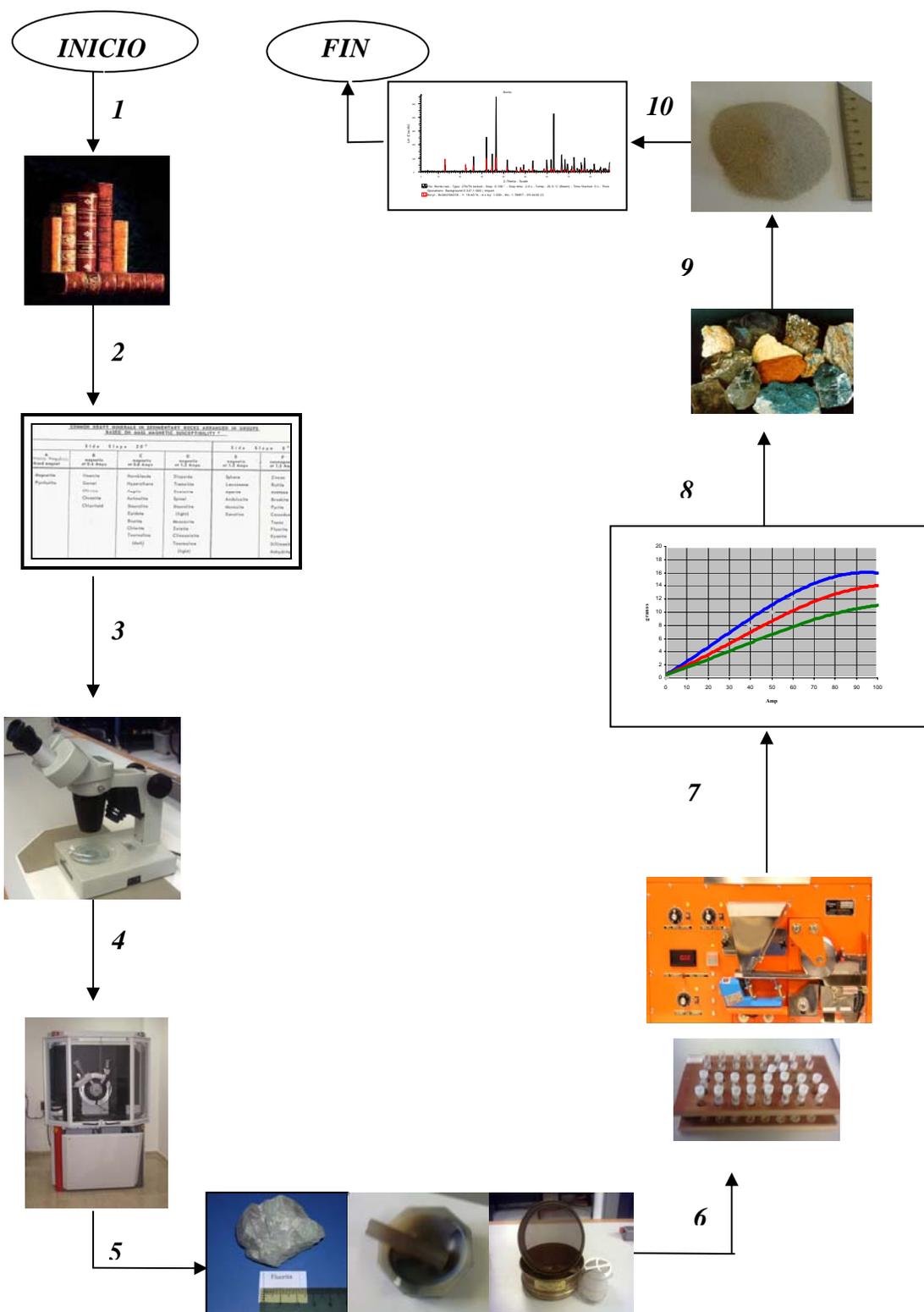


Figura 1.2: Diagrama de flujo de la metodología empleada en la calibración del separador Magnético Magnet-Lift.

Para la calibración del equipo *Magnet-Lift MLH (13)111-5* se efectuó una serie de pasos, que se han representado en el diagrama de flujo. Para ello se hizo un compendio de referencias bibliográficas y manuales del equipo, el paso siguiente fue recolectar el mayor número de minerales basándonos en la tabla empleada por HESS (1959), a esto minerales se le hizo reconocimiento en un microscopio óptico, para estar completamente seguros de que los minerales a utilizar eran los recomendados se les realizó difracción de rayos X, obtenido el reconocimiento se trituran y tamizan por separado en las mallas 60 y 80 cada uno de ellos recolectando el no pasante malla 80 y colocando en tubos de ensayo, seguidamente se lleva cada mineral al microscopio para recolectar 100 granos de cada uno de ellos, los cuales son puestos nuevamente en tubos de ensayo, para posteriormente pasarlo uno por uno por el separador a calibrar, para construir las curvas de calibración y estimación estadística de parámetros, una vez hecho esto se mezclaran los minerales y se pasan nuevamente por el separador con el propósito de validar las curvas y tablas de calibración. El paso siguiente es la aplicación de valores óptimos de calibración de las arenas de la Formación Isnotú y Betijoque, por último se realiza el reconocimiento de minerales sedimentarios por difracción de rayos X.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLOGICO

Introducción

Dado que las muestras de arenas utilizadas para la calibración del separador magnético de alta intensidad *Magnet-Lift MLH (13)111-5* fueron tomadas del estado Trujillo de los Andes Venezolanos, específicamente en la quebrada Vichú, la cual se ubica entre el cerro Pedro Felipe y la población las Trincheras en la figura 2.1 se puede apreciar dicha ubicación, este capítulo consiste en dar una breve descripción geológica del área.

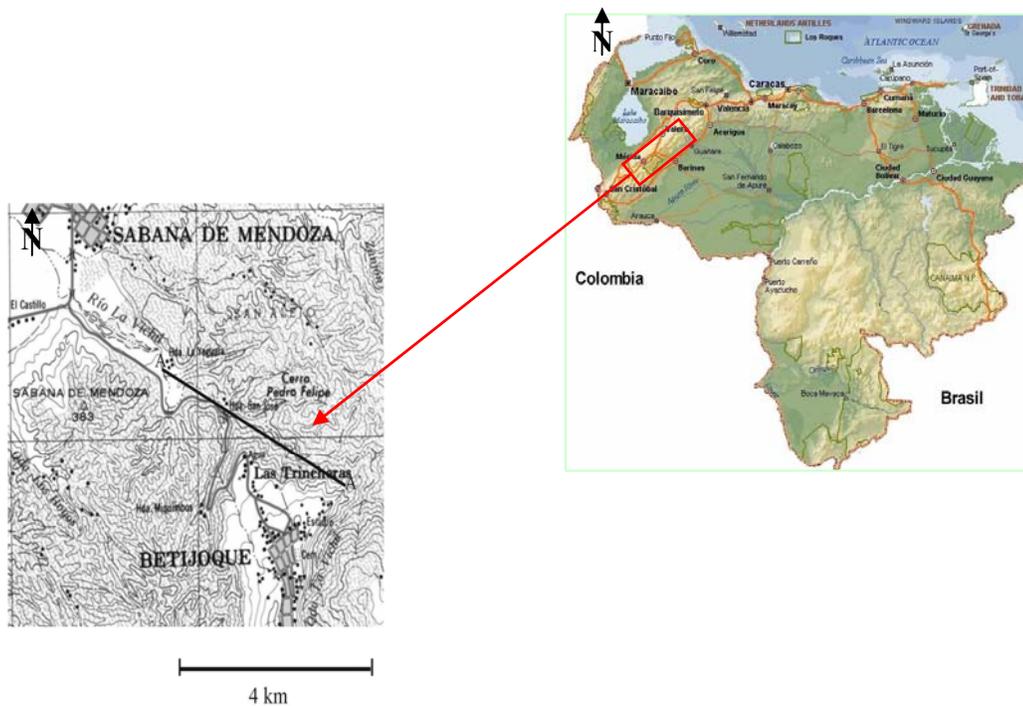


Figura 2.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio

Marco Estructural de Venezuela Occidental

Los Andes Venezolanos, comienzan al suroeste de la depresión de Táchira y termina al noroeste en la depresión de Barquisimeto. BUCHER (1952), establece que los Andes Venezolanos son producto de un levantamiento distorsionado, resultado de una deformación de dirección N-S del núcleo Paleozoico por orogénesis posteriores, particularmente por las fallas de Boconó, Valera, y sus sistemas de fallas complementarias. El marco estructural de Venezuela occidental, se puede observa en la Figura 2.2

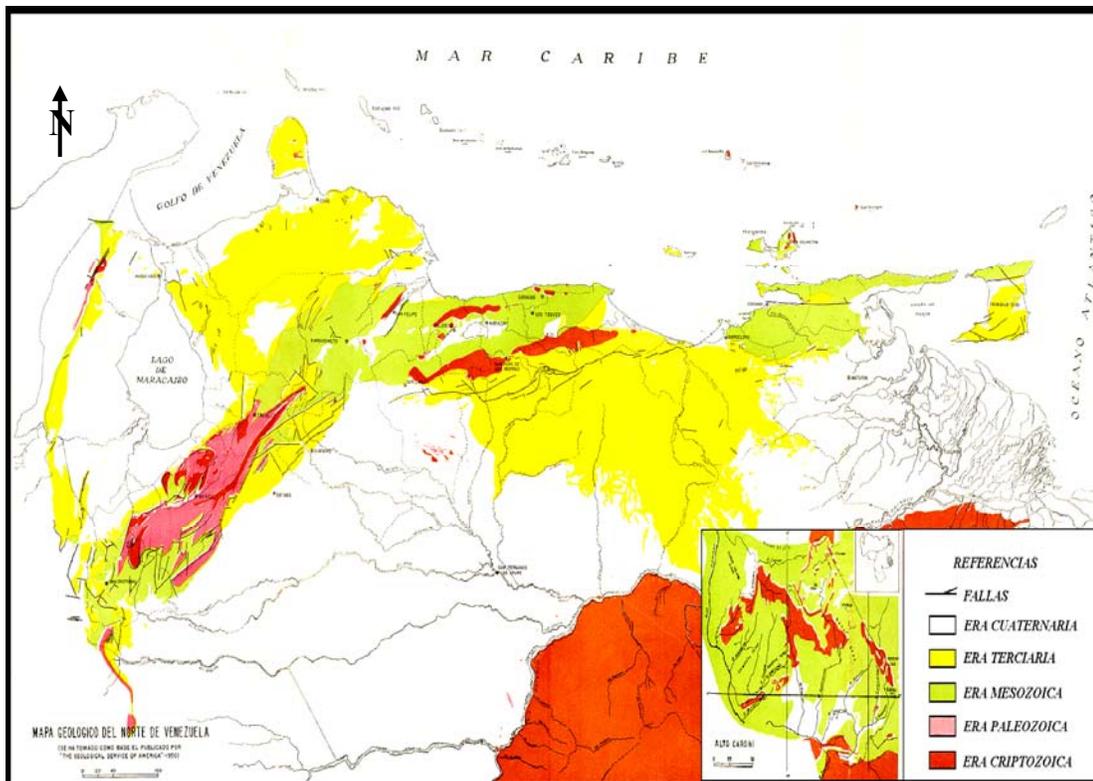


Figura 2.2: Mapa geológico estructural de Venezuela occidental.

Tomado de: <http://www.pdvsa.com/lexico/mapas/mapas-7.gif> (2002).

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

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

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

Formación Isnotú (Mioceno medio a superior) Estado Trujillo

Esta formación se ubica al oeste del pueblo de Isnotú, sobre la carretera Motatán Betijoque en el estado Trujillo. La formación aflora sobre una faja bastante continua a lo largo del flanco noroccidental de los Andes, desde Táchira hasta Trujillo (figura 2.3). También se reconoce en el subsuelo del lago de Maracaibo (BORGES Y LENERT, 1959); algunos autores se refieren al mismo intervalo con el nombre de la Formación la Puerta (YOUNG, 1960)

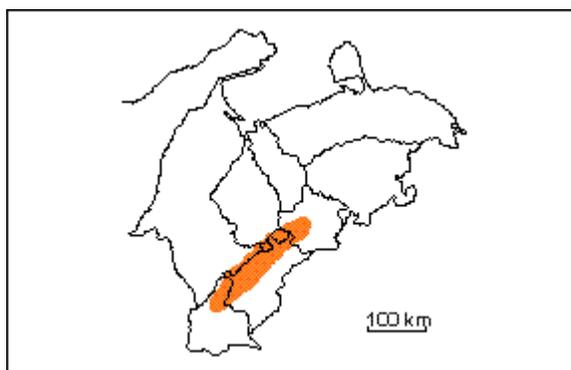


Figura 2.3: Extensión geográfica de la Formación Isnotú.
(Tomado de: www.pdv.com/lexico)

SUTTON (1946) describió los depósitos eocenos expuestos a lo largo del flanco noroccidental de Los Andes con los nombres de formaciones Palmar, Isnotú, y Betijoque; estos términos fueron empleados posteriormente en forma variable, por regla general en cuadros de correlación sin discusión textual. Hoy en día esta nomenclatura tiene aceptación general y todo el intervalo se ha designado con el nombre de Grupo Guayabo, especialmente donde su subdivisión es dudosa o imposible (MILLER *et al.*, 1958, 1963; Soc. Venez. Ing. Petrol.).

La Formación presenta alrededor de 65% de arcillas, con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar, carbón y conglomerado. Las arcillas son macizas pero blandas, de color gris claro, corrientemente abigarradas en rojo púrpura y amarillo y localmente carbonaceas; las areniscas son de color variable, principalmente blancas a gris claro y se presentan en capas de 2 a 3 metros de espesor.

La correlación de la unidad corresponde estrechamente, en edad y tipo sedimentario, a la mayor parte de la secuencia formacional Cuiba-Los Ranchos-La Villa en la Sierra de Perijà. Hacia el norte pasa a los estratos comparables de la Formación La Puerta en Falcón y Zulia nororiental, cuya demarcación no ha sido formalmente definida; algunos autores (SUTTON, 1946, H. H. RENZ, 1961-a) extienden este último nombre hacia el sur a la región donde se reconoce generalmente a la Formación Isnotú.

La formación carece casi totalmente de fósiles, Salvo restos indeterminados de plantas. SUTTON (1946) enumeró géneros indefinidos de foraminíferos y moluscos como provenientes de la Formación Isnotú en Táchira, pero la identidad de las capas es dudosa (SCHAUB, 1948; TRUMP Y SALVADOR, 1964).

En cuanto a los contactos la unidad es discordante sobre la Formación Paují y unidades más antiguas (SALVADOR, 1961). Más al sur es concordante y transicional sobre la Formación Palmar, que difiere de ella por su color y mayor contenido de areniscas y lutitas. Infrayace concordante y transicionalmente a la Formación Betijoque, que se diferencia por sus conglomerados conspicuos, areniscas parduscas y ausencia de colores abigarrados.

Formación Betijoque (Mioceno-Plioceno) Estado Trujillo

Esta Formación se ubica cerca del pueblo de Betijoque en el Estado Trujillo. GARNER (1926), definió esta Formación y especificó "las colinas bajas al oeste del pueblo". LIDDLE (1946), mencionó capas que forman "badlands" al sur del pueblo de Betijoque. La unidad aflora a lo largo del flanco occidental del los Andes, desde Trujillo hasta Táchira (Figura 2.4).

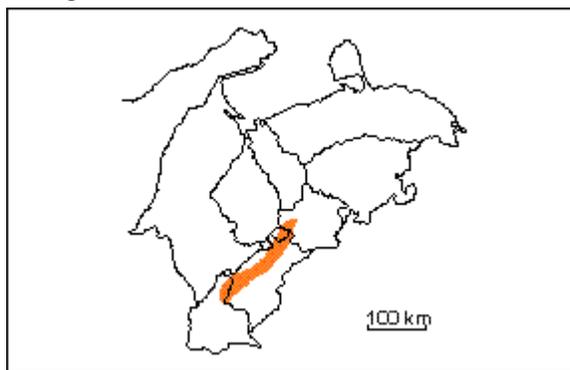


Figura 2.4: Extensión geográfica de la Formación Betijoque.

(Tomado de: www.pdv.com/lexico)

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

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

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

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

En cuanto al ambiente, la Formación Betijoque según GONZALEZ DE JUANA *et al.*,

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

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

El espesor de la Formación según SUTTON (1946), tiene un espesor máximo de 4.365 metros para la unidad en la localidad tipo, que corresponde estrechamente a los espesores sumados de los Miembros Vichú y Sanalejos, de 2.135 y 2.385 metros, respectivamente. SALVADOR (1961), menciona unos 2.000 metros en el valle de Monay. RAMÍREZ y CAMPOS (1972, p 522), Señalan un espesor de 650 metros en el estado Táchira. ZAMBRANO *et al.* (1972), sugiere que los 5.000 metros que rellenan la antefosa de los Andes corresponden en gran parte a la Formación Betijoque.

En cuanto al contacto de la Formación Betijoque hacia la base es concordante y, transicional por encima de la Formación Isnotú, SUTTON (1946), cuya litología dominante es de arcillas abigarradas y areniscas blancas. El tope está extensamente truncado, e infrayace con discordancia angular a las gravas de la Formación Carvajal.

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

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

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

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

Miembro Vichú (Mioceno) Estado Trujillo

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

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

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

Miembro Sanalejos (Mioceno) Estado Trujillo

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

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

CAPITULO III

PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

Introducción

El magnetismo es un fenómeno en el cual los materiales muestran una fuerza atractiva o repulsiva, capaz de influir en otros materiales; este fenómeno ha sido conocido por cientos de años. Sin embargo, los principios y mecanismos que explican el fenómeno magnético, son complejos, refinados, y su entendimiento ha sido eludido hasta tiempos relativamente recientes. El hierro y la magnetita son ejemplos bien conocidos de minerales que exhiben propiedades magnéticas. Para que el lector se familiarice con algunos conceptos básicos sobre magnetismo y electromagnetismo se presenta el siguiente capítulo.

Campo Magnético

Un campo magnético es el resultado del movimiento de cargas eléctricas, incluyendo el movimiento orbital y rotacional de los electrones en la materia. Estos campos suelen representarse mediante líneas de flujo magnético que indican la dirección del campo, en cualquier punto. La dirección del campo magnético es igual a la dirección de las líneas de flujo, y la intensidad del campo es inversamente proporcional al espacio entre las líneas de flujo, en la figura 3.1 se presentan tres patrones formados por el campo magnético que rodea a un imán cuando alrededor de este existen limaduras de hierro.

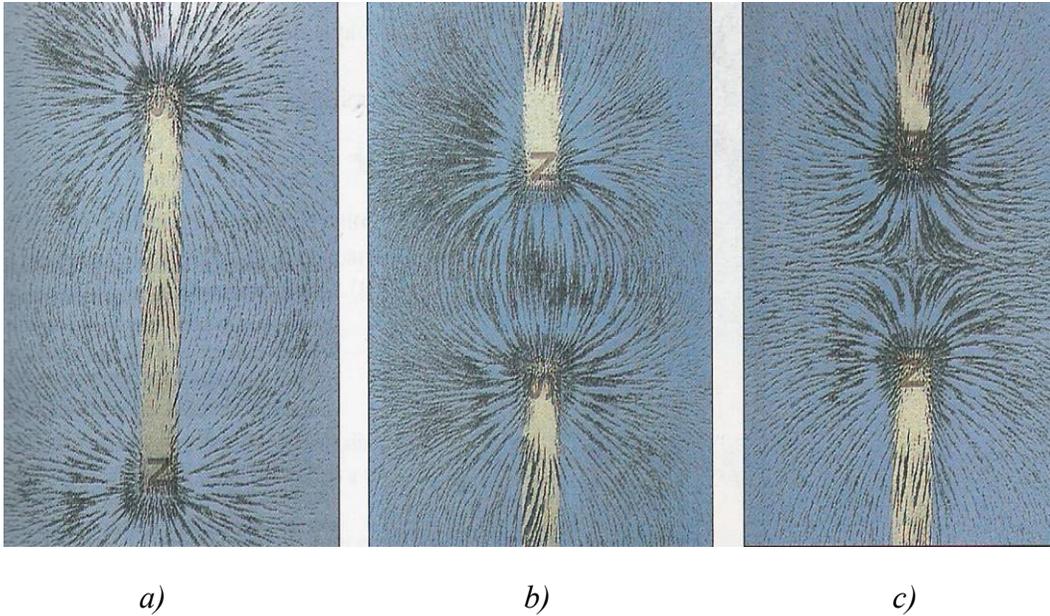


Figura 3.1: a) Patrón de campo magnético que rodean a un imán de barra con limaduras de hierro. b) Patrón de campo magnético entre polos distintos de dos imanes de barra. c) Patrón de campo magnético entre polos iguales de dos imanes de barras.

(Tomado de: SERWAY & BEICHNER)

Cuando una partícula con carga q se desplaza a través de un campo magnético B , ésta experimenta una fuerza F_B que forma un ángulo recto con la velocidad v de la partícula y con la dirección del campo. Como la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad, las partículas se mueven en trayectorias curvas. En la figura 3.2 se aprecia la dirección de esta fuerza F_B sobre la partícula cargada.

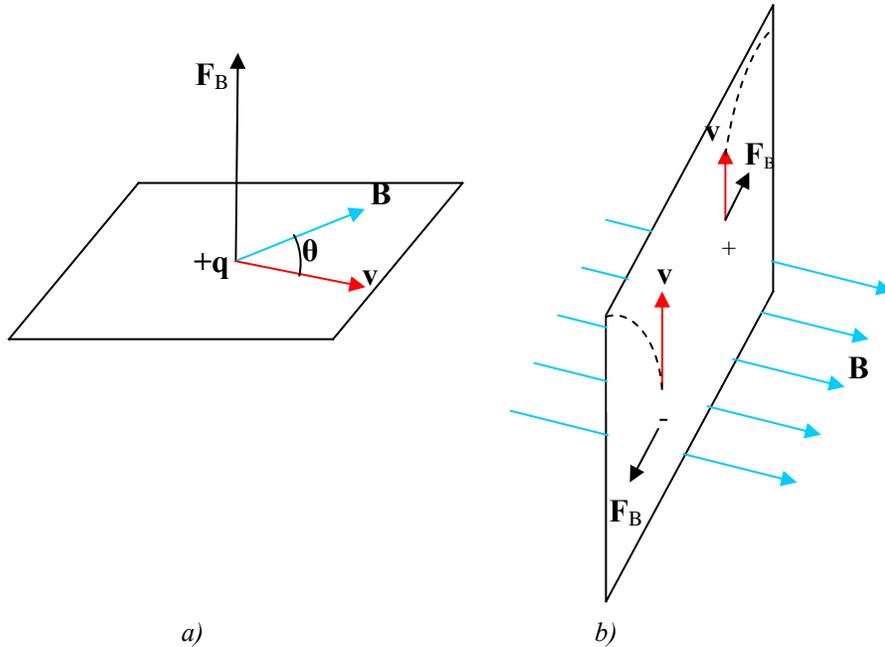


Figura 3.2: a) La fuerza magnética es perpendicular tanto a v como a B . b) Las fuerzas magnéticas F_B ejercidas sobre dos partículas cargadas opuestamente y que se mueven a la misma velocidad en un campo magnético están dirigidas de manera opuesta.

(Tomado y modificado de: SERWAY & BEICHNER)

Del estudio de estos campos se concluye que:

- La fuerza es proporcional al valor de la carga.
- La fuerza es proporcional al módulo de la velocidad v .
- El valor, la dirección y sentido de F_B depende de la dirección y sentido de v .
- Si la velocidad está dirigida a lo largo de una línea determinada del espacio, la fuerza es cero.
- Si la velocidad no está dirigida según esta línea, existe una fuerza que es perpendicular a v .
- Si la velocidad forma un ángulo β con esta línea, la fuerza es proporcional al $\text{sen } \beta$.
- La fuerza sobre una carga negativa es de sentido opuesto a la ejercida sobre una positiva y de igual velocidad.

Si despreciamos la presencia de otro campo que no sea el magnético se puede expresar la fuerza magnética como:

$$\vec{F}_B = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.1)$$

Por razones históricas, el vector B se denomina normalmente vector de inducción magnética (SERWAY & BEICHNER 2002) aunque aquí podamos utilizar también la expresión campo magnético. La unidad en el sistema Internacional (S.I) para el campo magnético es el tesla. (1Tesla = 10^4 Gauss) a continuación en la tabla 3.1 se muestran otras unidades.

Tabla 3.1: Intensidad de campo magnético (H)

<i>Magnitud</i>	<i>Unidad SI.</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Múltiplos y Submúltiplos más comunes</i>	<i>Otras unidades</i>
Intensidad de campo magnético (H)	Amperio por metro	A/m T tesla	A/cm. A/mm KA/m	Gauss Oersted gamma

Momentos Magnéticos

El campo magnético producido por una corriente en una bobina de alambre proporciona una idea de lo que podría provocar que ciertos materiales muestren fuertes propiedades magnéticas. En general cualquier espiral de corriente tiene un campo magnético y, por tanto, un momento de dipolo magnético, incluyendo las espiras de corriente a nivel atómico descritas en algunos modelos del átomo. De esta manera, el momento magnético de un objeto es una cantidad vectorial que expresa la intensidad y orientación del campo magnético del objeto.

Los momentos magnéticos de átomos

Considerando el modelo clásico del átomo en el cual los electrones se mueven en órbitas circulares alrededor del núcleo mucho más masivo, es posible ilustrar los momentos magnéticos de una forma más didáctica. En este modelo un electrón orbital constituye una delgada espira de corriente (debido a que es una carga en movimiento) y el momento magnético del electrón se asocia con su movimiento orbital.

Supóngase que existe un electrón que se mueve a rapidez constante v en una órbita circular de radio r alrededor del núcleo, como se muestra en la figura 3.3. Puesto que el electrón recorre una distancia de $2\pi r$ en un período T , su rapidez orbital viene dada por:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

La intensidad de corriente I asociada con este electrón orbital es su carga e dividida por T . Utilizando las siguientes expresiones para el período y para la velocidad angular: $T = \frac{2\pi r}{v}$ y $\omega = \frac{v}{r}$ Se tiene:

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{ev}{2\pi r} \quad (3.2)$$

El momento magnético asociado con esta espira de corriente es $\mu = I.A$, donde $A = \pi.r^2$ es el área denotada por la órbita. Así:

$$\mu = I.A = \left(\frac{e.v}{2.\pi.r} \right) \pi.r^2 = \frac{e.v.r}{2} \quad (3.3)$$

Puesto que la magnitud del momento angular orbital del electrón es $L = m.v.r$, donde m es la masa del electrón, así el momento magnético puede escribirse como:

$$\mu = \left(\frac{e}{2m} \right) L \quad (3.4)$$

Este resultado demuestra que el momento magnético del electrón es proporcional a su momento angular orbital. En la figura 3.3 se puede observar que como el electrón está cargado negativamente, los vectores μ y L apuntan en direcciones opuestas, siendo ambos vectores perpendiculares al plano de la órbita.

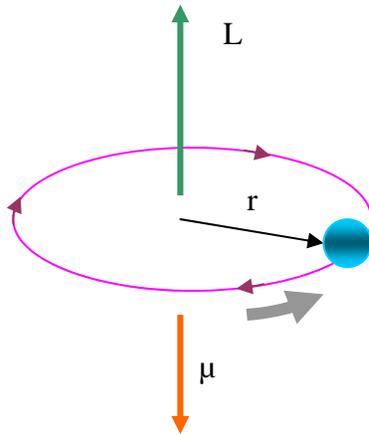


Figura 3.3: Un electrón que se mueve en una órbita circular.

(Tomado y modificado de: SERWAY & BEICHNER)

Un resultado fundamental de la física cuántica es que el momento angular orbital está cuantizado y es igual a múltiplos de $\hbar = h/2\pi = 1.05 \times 10^{-34}$ Joule·seg, donde h es la constante de Planck, ($h = 6,62606876 \times 10^{-34}$ Joules·seg) El valor más pequeño (y distinto de cero) del momento magnético del electrón que resulta de su movimiento orbital es:

$$\mu = \frac{\sqrt{2}e}{2m} \hbar \quad (3.5)$$

En virtud de que todas las sustancias contienen electrones, surge la pregunta del ¿por qué no todas son magnéticas? La principal razón es que en la mayor parte de las sustancias, el momento magnético de un electrón en un átomo se cancela por el de otro electrón orbitando en la dirección opuesta. El resultado neto es que, en la mayor parte de los materiales, el efecto magnético producido por el movimiento orbital de los electrones es cero o muy pequeño.

En adición a su momento magnético orbital, un electrón tiene otra propiedad intrínseca llamada *espín* (SERWAY & BEICHNER 2002), que también contribuye a su momento magnético. A este respecto el electrón puede verse como girando en torno a su eje, mientras orbita al núcleo, como se muestra en la figura 3.4. La magnitud del momento angular S asociada con el espín es del mismo orden de magnitud que el momento angular L debido al movimiento orbital. La magnitud del momento angular del espín predicha por la teoría cuántica es:

$$S = \sqrt{\frac{3}{2}} \hbar \quad (3.6)$$

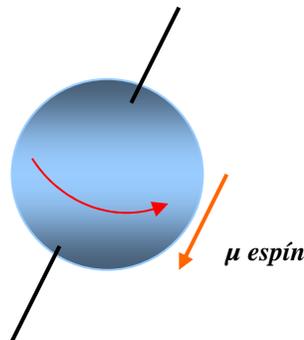


Figura 3.4: Modelo clásico de un electrón girando en torno a su eje.
(Tomado y modificado de: SERWAY & BEICHNER)

En virtud de que todas las sustancias contienen electrones, surge la pregunta de ¿por qué no todas son magnéticas? La principal razón es que en la mayor parte de las sustancias, el momento magnético de un electrón en un átomo se cancela por el de otro electrón orbitando en la dirección opuesta. El resultado neto es que, en la mayor parte de los materiales, el efecto magnético producido por el movimiento orbital de los electrones es cero o muy pequeño.

En adición a su momento magnético orbital, un electrón tiene otra propiedad intrínseca llamada *espín* (SERWAY & BEICHNER 2002), que también contribuye a su momento magnético. A este respecto el electrón puede verse como girando en torno a su eje, mientras orbita al núcleo, como se muestra en la figura 3.4. La magnitud del momento angular S asociada con el espín es del mismo orden de magnitud que el momento angular L debido al movimiento orbital. La magnitud del momento angular del espín predicha por la teoría cuántica es:

$$S = \sqrt{\frac{3}{2}} \hbar \quad (3.6)$$

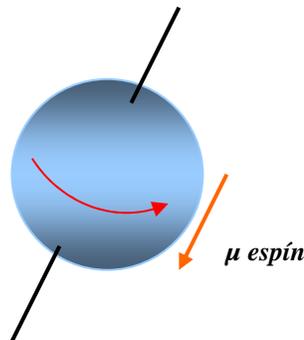


Figura 3.4: Modelo clásico de un electrón girando en torno a su eje.
(Tomado y modificado de: SERWAY & BEICHNER)

El momento magnético asociado característicamente al espín de un electrón tiene el valor:

$$\mu_{\text{espín}} = \frac{e\hbar}{2m} = 9.27 \times 10^{-24} \frac{\text{Joule}}{\text{Tesla}} \quad (3.7)$$

Esta última expresión también es llamada magnetón de Bohr (SERWAY & BEICHNER 2002). De esta forma, los momentos magnéticos atómicos pueden expresarse como múltiplos del magnetón de Bohr. El momento magnético total de un átomo es la suma vectorial de los momentos magnéticos del orbital y del espín.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNETICO

El estado magnético de una sustancia se describe mediante el *vector de magnetización* M , siendo la magnitud de éste, el momento magnético por unidad de volumen de la sustancia. En cualquier punto de sustancia, el campo magnético total (B) depende tanto del campo externo aplicado B_0 como de la magnetización de la sustancia.

Considerando una región en la que existe un campo magnético B_0 producido por un conductor por el que circula corriente, si esa región es ocupada con una sustancia magnética, el campo magnético total B en esa región es $B = B_0 + B_m$, donde B_m es el campo producido por la sustancia magnética. Esta contribución puede expresarse en términos del vector de magnetización de la sustancia como $B_m = \mu_0 M$; por tanto, el campo magnético total en la región viene dado por la expresión:

$$B = B_0 + \mu_0 M \quad (3.8)$$

Cuando se analizan campos magnéticos provenientes de magnetización, es importante estudiar la intensidad del campo magnético H de una sustancia. Esta última representa el efecto de la conducción de corriente en alambres sobre la sustancia. Para distinguir entre intensidad de campo H y el campo B , se le suele

llamar a B : *densidad de flujo magnético* o *inducción magnética*. La intensidad de campo magnético es un vector definido por medio de la siguiente relación:

$$H = \frac{B_0}{\mu_0} = \left(\frac{B}{\mu_0} \right) - M$$

Por lo tanto, la ecuación (3.8) puede ser escrita en términos de la intensidad del campo como:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.9)$$

Las cantidades H y M tienen las mismas unidades, en particular, en el sistema inglés, puesto que M es momento magnético por unidad de volumen, las unidades son Ampere/metro.

En la siguiente tabla se muestran algunas magnitudes utilizadas en el tema de magnetismo:

Tabla 3.2: Magnitudes comunes en magnetismo

<i>Magnitud</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidades S.I</i>	<i>Unidades CGS</i>	<i>Conversión</i>
Inducción magnética	B	Tesla (Wb m^{-2}) $\text{kg s}^{-1}\text{C}^{-1}$	gauss	$1\text{Wb m}^{-2} = 10^4 \text{ gauss}$
Intensidad de campo magnético	H	Am^{-1} $\text{C m}^{-1} \text{s}^{-1}$	oersted	$\text{Am}^{-1} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ oersted}$
Magnetización	M	Am^{-1} $\text{C m}^{-1} \text{s}^{-1}$	maxwell cm^{-2}	$\text{Am}^{-1} = 10^{-3} \text{ maxwell cm}^{-2}$
Permeabilidad del vacío	μ_0	henrio m^{-1} ($\text{Wb A}^{-1} \text{m}^{-1}$) Kg m C^{-2}	sin unidades (uem)	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 1 \text{ uem}$
Permeabilidad relativa	μ_r $\mu' \text{ (cgs)}$	sin unidades	sin unidades	$\mu_r = \mu'$
Susceptibilidad	X_m $X'_m \text{ (cgs)}$	sin unidades	sin unidades	$X_m = 4\pi X'_m$

Clasificación de sustancias magnéticas

Las sustancias se pueden clasificar como pertenecientes a una de tres categorías: paramagnéticos, ferromagnéticos y diamagnéticos; dependiendo de sus propiedades magnéticas. Los dos primeros son aquellos formados por átomos que tienen momentos magnéticos permanentes a diferencia de los materiales diamagnéticos.

Para las sustancias paramagnéticas y diamagnéticas, el vector de magnetización M es proporcional a la intensidad de campo magnético H . Para dichas sustancias, colocadas en un campo magnético externo, se puede escribir:

$$M = X.H \quad (3.11)$$

Donde X es un factor adimensional llamado susceptibilidad magnética. Para sustancias paramagnéticas, X es positiva y M está en la misma dirección que H . Para sustancias diamagnéticas, X es negativa y M es opuesto a H . En sustancias ferromagnéticas no existe una relación lineal entre M y H . En la tabla 3.3 se proporcionan las susceptibilidades de algunas sustancias.

Tabla 3.3: Susceptibilidad magnética de algunas sustancias paramagnéticas y diamagnéticas a 300°K.

<i>Sustancias Paramagnéticas</i>	X	<i>Sustancias Diamagnéticas</i>	X
Aluminio	$2,3 \times 10^{-5}$	Bismuto	$-1,66 \times 10^{-5}$
Calcio	$1,9 \times 10^{-5}$	Cobre	$-9,8 \times 10^{-6}$
Cromo	$2,7 \times 10^{-4}$	Diamante	$-2,2 \times 10^{-5}$
Litio	$2,1 \times 10^{-5}$	Oro	$-3,6 \times 10^{-5}$
Magnesio	$1,2 \times 10^{-5}$	Plomo	$-1,7 \times 10^{-5}$
Niobio	$2,6 \times 10^{-4}$	Mercurio	$-2,9 \times 10^{-5}$
Oxígeno	$2,1 \times 10^{-6}$	Nitrógeno	$-5,0 \times 10^{-9}$
Platino	$2,9 \times 10^{-4}$	Plata	$-2,6 \times 10^{-5}$
Tungsteno	$6,8 \times 10^{-5}$	Silicio	$-4,2 \times 10^{-6}$

La sustitución de la ecuación (3.11) para M en la ecuación (3.9) da como resultado:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (H + XH) = \mu_0 (1 + X) H$$

$$B = \mu_m H \quad (3.12)$$

Donde la constante μ_m recibe el nombre de *permeabilidad magnética* de la sustancia y está relacionada con la susceptibilidad mediante la expresión:

$$\mu_m = \mu_0 (1 + X) \quad (3.13)$$

Las sustancias pueden clasificarse en términos de la relación de orden entre la permeabilidad magnética μ_m con la permeabilidad del espacio libre μ_0 como sigue:

Paramagnética $\mu_m > \mu_0$

Diamagnética $\mu_m < \mu_0$

Puesto que X es muy pequeña para sustancias paramagnéticas y diamagnéticas (según la tabla 3.3), μ_m es casi igual a μ_0 para estas sustancias. Sin embargo, para las sustancias ferromagnéticas, μ_m generalmente es varios órdenes de magnitud mayor que μ_0 , esto significa que X es muy grande para sustancias ferromagnéticas.

Aunque la ecuación (3.12) proporciona una relación simple entre B y H , ésta debe interpretarse con cuidado al momento de trabajar con sustancias ferromagnéticas, debido a la no linealidad de la relación, esta no linealidad se debe a que el valor de μ_m no es sólo una característica de la sustancia ferromagnética, sino que también depende del estado previo de la sustancia y de los procesos que fue sometida desde su movimiento inicial hasta el final.

Ferromagnetismo

Un reducido grupo de sustancias cristalinas, cuyos átomos tienen momentos magnéticos permanentes, muestran intensos efectos magnéticos que reciben el nombre de ferromagnetismo. Algunos ejemplos de sustancias ferromagnéticas son: hierro, cobalto, níquel, gadolinio y disprosio. Dichas sustancias contienen momentos magnéticos atómicos que tienden a alinearse paralelos entre sí, incluso en un campo magnético externo débil. Una vez que los momentos están alineados, la sustancia permanece magnetizada después de que es retirado el campo externo. Este alineamiento permanente se debe a un intenso acoplamiento entre momentos vecinos, lo cual se rige por los fundamentos de la mecánica cuántica.

Los materiales ferromagnéticos están constituidos por regiones microscópicas llamadas dominios, los cuales corresponden a regiones que tienen volúmenes de aproximadamente 10^{-12} a 10^{-8} m³ y contienen de 10^{17} a 10^{21} átomos dentro de las cuales se alinean todos los momentos magnéticos.

En una muestra desmagnetizada, los dominios están orientados al azar de modo que el momento magnético neto es nulo, como se muestra en la figura 3.5 (a). Cuando la muestra se pone en un campo magnético externo, los momentos magnéticos de los átomos tienden a alinearse con el campo, lo cual produce una muestra magnetizada, como en la figura 3.5 (b). Las observaciones muestran que los dominios inicialmente orientados a lo largo del campo externo aumentarán de tamaño a expensas de los dominios menos orientados. Cuando se elimina el campo externo, la muestra puede retener una magnetización neta en la dirección del campo original.

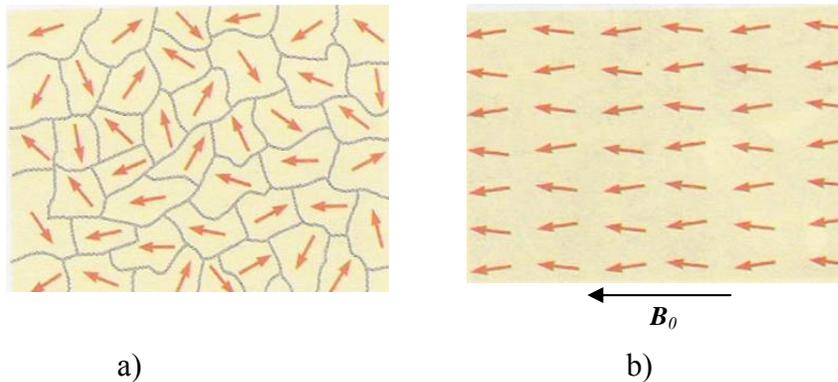


Figura 3.5: a) Orientación aleatoria de momentos magnéticos atómicos en una sustancia desmagnetizada. b) Cuando se aplica un campo externo B_0 , los momentos magnéticos atómicos se alinean con el campo, produciendo en la muestra un vector de magnetización neto M .

(Tomado y modificado de: SERWAY & BEICHNER)

Un arreglo experimental característico para medir las propiedades magnéticas de un material ferromagnético se compone de un toro hecho del material enrollado con N vueltas de alambre, como se muestra en la figura 3.6, donde los bobinados son representados en negro y se refieren como la *bobina primaria*. Este aparato se conoce a veces como *anillo Rowland*. Una bobina secundaria (los alambres rojos en la Fig. 3.6) conectada a un galvanómetro se usa para medir el flujo magnético total a través del toro. El campo magnético B en el toro se mide aumentando la corriente en el toroide desde cero hasta I . A medida que la corriente cambia, el flujo magnético a través de la bobina secundaria cambia por una cantidad $B.A$, donde A es el área de la sección transversal del toroide, se induce una fuerza electromotriz (1 fem) en la bobina secundaria que es proporcional a la rapidez de cambio del flujo magnético. Si el galvanómetro se calibra de manera apropiada, es posible obtener un valor B correspondiente a cualquier valor de la corriente en la bobina primaria. El campo magnético B se mide primero en la ausencia del toro y luego con el toro en su lugar. Las propiedades magnéticas del material del toro se obtienen luego de una comparación de las dos mediciones.

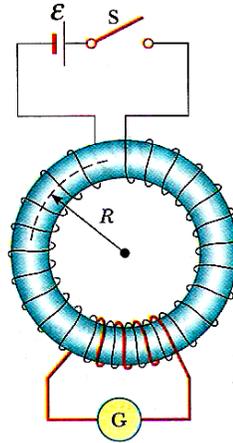


Figura 3.6: Un arreglo de enrollado toroidal empleado para medir las propiedades magnéticas de un material. El toroide está hecho del material bajo estudio, y el circuito que contiene al galvanómetro mide el flujo magnético.

(Tomado de: SERWAY & BEICHNER)

Considérese ahora un toro hecho con hierro desmagnetizado. Si la corriente en la bobina primaria aumenta de cero hasta cierto valor I , la magnitud de la intensidad del campo magnético H aumenta linealmente con I de acuerdo con la expresión $H = nI$. Además, la magnitud del campo total B se incrementa también con el aumento de la corriente, como se muestra por la curva desde el punto o al punto a en la figura 3.7. En el punto o , los dominios en el hierro están orientados al azar; lo que corresponde a $B_m = 0$. Conforme la corriente aumenta en la bobina primaria, este induce a que el campo externo B_0 se incremente, los dominios se alinean cada vez más hasta que todos están casi alineados en el punto a . En este punto el núcleo de hierro se acerca a la *saturación*, que es la condición en la cual todos los dominios en el hierro están alineados.

Supóngase ahora, que la corriente se reduce a cero, por lo que se elimina el campo externo. La curva B versus H , denominada *curva de magnetización*, sigue ahora la trayectoria ab indicada en la figura 3.7. Sin embargo, en el punto b , B no es cero, aun cuando el campo externo es $B_0 = 0$. La razón es que el hierro está ahora magnetizado debido al alineamiento de un gran número de sus dominios (esto es, $B =$

B_m). En este punto se afirma que el hierro tiene una *magnetización remanente*, la cual ocurre en algunos minerales magnéticos constituyentes de rocas.

Si la corriente en la bobina primaria se invierte de modo que la dirección del campo magnético externo se invierte, los dominios se reorientan hasta que la muestra esté otra vez desmagnetizada en el punto c , donde $B = 0$. Un aumento en la corriente inversa provoca que el hierro se magnetice en la dirección opuesta, acercándose a la saturación en el punto d en la figura 3.7. El efecto que se acaba de describir, es llamado histéresis magnética, esto muestra que la magnetización de una sustancia ferromagnética depende de la historia de la sustancia, así como de la magnitud del campo aplicado. A menudo se afirma que una sustancia ferromagnética tiene "memoria", pues permanece magnetizada después de que se elimina el campo externo. La espira cerrada en la figura 3.7 se conoce como una espira de histéresis o ciclo de histéresis.

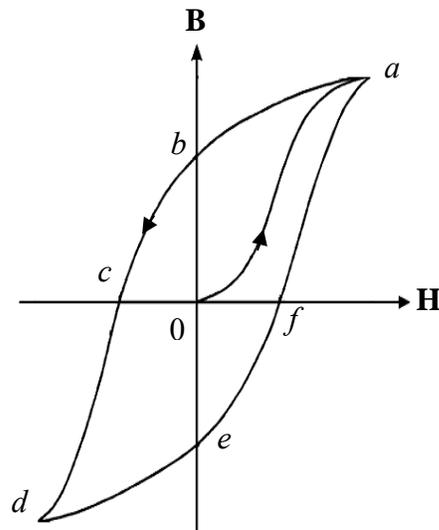


Figura 3.7: Curva de magnetización para un material ferromagnético.

(Tomado y modificado de: SERWAY & BEICHNER)

Su forma y tamaño dependen de las propiedades de la sustancia ferromagnética y de la intensidad del campo aplicado. La espira de histéresis para materiales ferromagnéticos "duros" es característicamente ancha, como la mostrada en la figura 3.8a, lo que corresponde a una gran magnetización remanente. Los materiales ferromagnéticos "blandos", como el hierro, tienen una espira de histéresis muy estrecha y magnetización remanente pequeña (Fig. 3.8b) Estos materiales se magnetizan y desmagnetizan fácilmente.

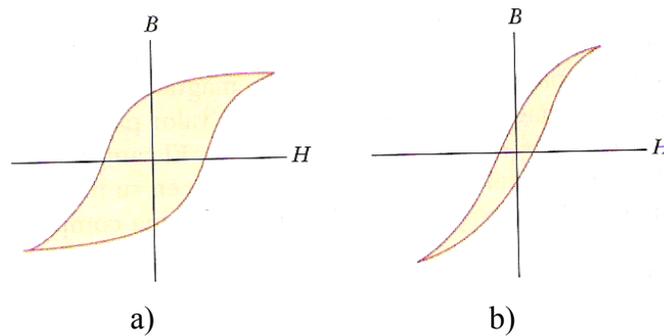


Figura 3.8: Espiras de histéresis para a) un material ferromagnético duro y b) un material ferromagnético blando.

(Tomado de: SERWAY & BEICHNER)

Una sustancia ferromagnética se puede desmagnetizar llevándola por espiras de histéresis sucesivas, debido a la reducción aplicada al campo magnético, como se muestra en la figura 3.9

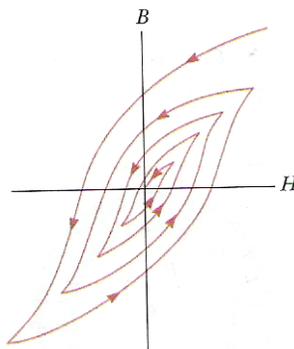


Figura 3.9: Desmagnetización de un material ferromagnético mediante su transportación a través de espiras de histéresis sucesivas.

(Tomado de: SERWAY & BEICHNER)

La curva de magnetización es útil por otra razón: el área encerrada por la curva de magnetización representa el trabajo requerido para llevar el material por el ciclo de histéresis.

En los materiales antiferromagnéticos los momentos magnéticos de los átomos vecinos son de la misma magnitud, pero antiparalelos (ver figura 3.10). Cada una de estas subredes recuerda un estado de un cuerpo ferromagnético. Las dos subredes ordenadas y orientadas en sentido opuesto entre sí se anulan mutuamente resultando en un momento magnético total igual a cero. La susceptibilidad magnética de un material antiferromagnético es relativamente baja a temperaturas debajo del punto de Curie. Entre los materiales antiferromagnéticos se tienen: la hematita (Fe_2O_3 , $T_{\text{Curie}} = 675^\circ\text{C}$), los óxidos de manganeso, de hierro, de cobalto y níquel, entre otros.

Los materiales ferrimagnéticos tienen dos subredes de iones metálicos con momentos magnéticos orientados antiparalelamente, pero de magnitud diferente dando lugar a un momento resultante diferente de cero, incluso en ausencia de un campo exterior (ver figura 3.10). La magnetita Fe_3O_4 es un material ferrimagnético y es el mineral más importante en contribuir al magnetismo de las rocas. Otros minerales ferrimagnéticos son la ilmenita FeTiO_3 , Titanomagnetita $\text{Fe}(\text{Fe}, \text{Ti})_2\text{O}_4$, la pirotina Fe_{1-x}S y los óxidos de la fórmula general $X\text{OFe}_2\text{O}_3$, donde X puede ser ocupado por Mn, Co, Ni, Mg, Zn y Cd. El magnetismo de las rocas se debe a magnetita y a otros minerales del sistema ternario $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$.

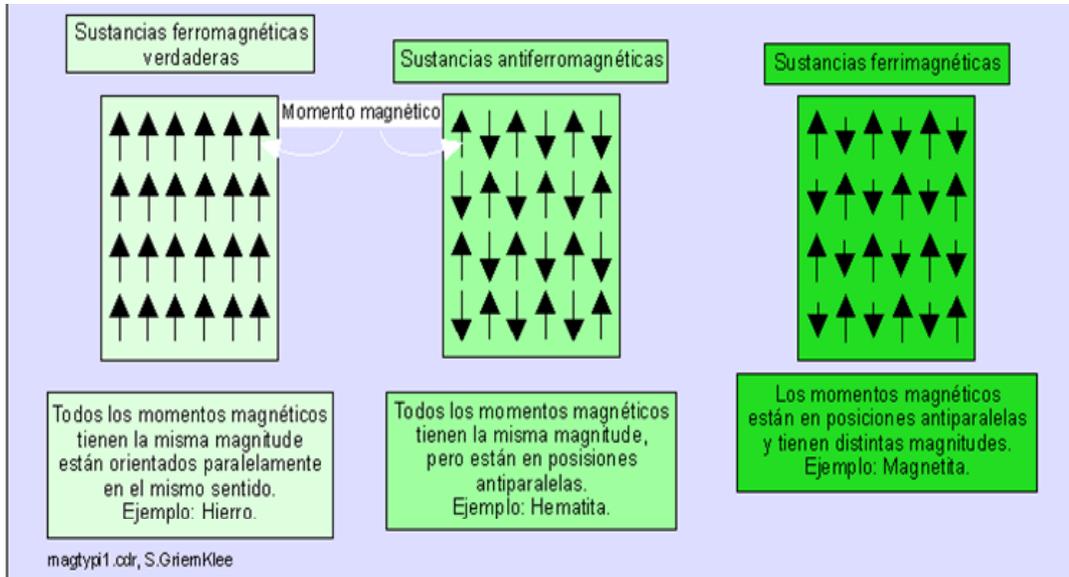


Figura 3.10: Orientación de los momentos magnéticos en las sustancias ferromagnéticas.

(Tomado de: <http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/05001magnet.html>)

Paramagnetismo

Las sustancias paramagnéticas tienen una susceptibilidad magnética positiva aunque pequeña ($0 < X \ll 1$), lo cual se debe a la presencia de átomos (o iones) que tienen momentos magnéticos permanentes. Estos momentos interactúan sólo débilmente entre sí y se orientan al azar si no hay campo magnético externo. Cuando una sustancia paramagnética se pone en un campo magnético externo, sus momentos atómicos tienden a alinearse con el campo.

Pierre Curie (1859-1906) y otros después de él encontraron experimentalmente que, bajo una amplia gama de condiciones, la magnetización de una sustancia paramagnética es proporcional al campo magnético aplicado e inversamente proporcional a la temperatura absoluta:

$$M = C \frac{B_0}{T} \quad (3.14)$$

Esta relación se conoce como ley de Curie, y la constante C se denomina constante de Curie. Esta ley muestra que, cuando $B_0 = 0$, la magnetización es cero, lo que

corresponde a una orientación aleatoria de los momentos magnéticos. Conforme a la proporción del campo magnético, al incrementarse la temperatura la magnetización se aproxima a su valor de saturación, que corresponde a un alineamiento completo de sus momentos, y por lo tanto, la ecuación (3.14) ya no es válida.

Cuando la temperatura de una sustancia ferromagnética alcanza o sobrepasa la temperatura de Curie, la sustancia pierde su magnetización residual y se vuelve paramagnética, tal como se muestra en la figura 3.11. Debajo de la temperatura de Curie, los momentos magnéticos se alinean y la sustancia es ferromagnética. Por encima de la temperatura de Curie, la agitación térmica es suficientemente grande para provocar una orientación al azar de los momentos, convirtiendo la sustancia en paramagnética. En la tabla 3.4 se proporcionan las temperaturas de Curie de diferentes sustancias ferromagnéticas.

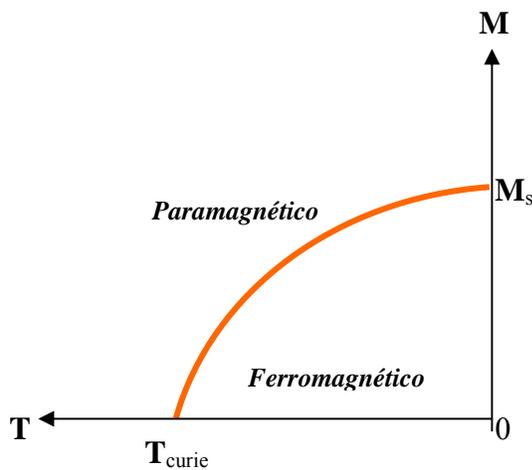


Figura 3.11: Magnetización versus temperatura absoluta para una sustancia ferromagnética.

(Tomado y modificado de: SERWAY & BEICHNER)

Tabla 3.4: Temperaturas de Curie para varias sustancias ferromagnéticas.

<i>Sustancias</i>	<i>T_{curie} (k)</i>
Hierro	1043
Cobalto	1394
Níquel	631
Gadolinio	317
Fe ₂ O ₃	893

Diamagnetismo

Cuando un campo magnético externo se aplica a una sustancia diamagnética, se induce un débil momento magnético en la dirección opuesta al campo aplicado. Esto provoca que las sustancias diamagnéticas sean repelidas por un imán. Si bien el diamagnetismo está presente en toda la materia, sus efectos son mucho más pequeños que los del paramagnetismo o el ferromagnetismo, y son evidentes sólo cuando estos otros efectos no existen.

Se puede obtener cierta comprensión del diamagnetismo considerando el modelo clásico de dos electrones de un átomo orbitando el núcleo en direcciones opuestas pero con la misma rapidez. Los electrones permanecen en sus órbitas circulares debido a la fuerza electrostática atractiva ejercida por el núcleo cargado positivamente. Debido a que los momentos magnéticos de los dos electrones son iguales en magnitud y opuestos en dirección, se cancelan entre sí y el momento magnético del átomo es cero.

En la tabla 3.5 se presenta de manera resumida las características de cada tipo de magnetismo.

Tabla 3.5: Tipos de magnetismos.

Tipo	Magnitud de la susceptibilidad	Dependencia en Temperatura	Ejemplos
<i>Diamagnético</i>	Pequeña, negativa Intermedia, negativa Grande, negativa	Independiente Varía con el campo ($T < 20^\circ \text{K}$) Existe sólo bajo T críticas	Materiales orgánicos, elementos livianos Tierras alcalinas, bismuto Metales superconductores
<i>Paramagnético</i>	Pequeña, positiva Grande, positiva	Independiente $X = C / T - \Theta$	Metales alcalinos, metales transición Tierras raras
<i>Ferromagnético</i>	Muy grande, positiva	$T > T_c$: $X = T - \Theta$. $T < T_c$	Algunos metales raros y de transición.
<i>Antiferromagnético</i>	Pequeña, positiva	Cuando $T > T_N$: $X = C / T + \Theta$ Cuando $T < T_N$: $X \propto T_c$	Salas de metales de transición.
<i>Ferrimagnético,</i>	Muy grande positiva	Cuando $T > T_N$: $X = C / T \pm \Theta$ $T < T_N$	Ferritas

GENERACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS PARA LA SEPARACIÓN DE MINERALES.

Como se mencionó anteriormente existen varias formas de generar un campo magnético, a los sistemas de generación de campo magnético suelen llamárseles imanes, estos sistemas tiene gran utilidad en la separación de minerales, el cual es el objetivo de este trabajo. Una de las aplicaciones de los campos magnéticos es el de poder separar minerales según su susceptibilidad magnética, pero en general para cada forma de separación existe un tipo de imán que mejor se ajusta a los requerimientos de esta, a continuación se expondrán los tipos de imanes utilizados.

Imanes permanentes

Inicialmente los imanes permanentes se han utilizado en la separación de materiales fuertemente magnéticos. No obstante, con el desarrollo de poderosos electroimanes, el interés por los separadores de imanes permanentes disminuyó a favor de los anteriores, pero en los últimos años, ha aumentado este interés gracias al desarrollo de los imanes permanentes de tierras raras, que le han permitido a esta tecnología competir dentro de la alta intensidad de campo. Las aleaciones más utilizadas dentro de esta tecnología están constituidas a base de Sm-Co o más frecuentemente Nd-Fe-B.

Aunque la inducción magnética generada por los imanes permanentes en raras ocasiones excede 1 Tesla, ofrecen las siguientes ventajas frente a los electroimanes:

- No requieren ni fuente de alimentación de energía ni fluido de refrigeración.
- La inducción magnética es muy estable en el tiempo, fluctuando en un intervalo de 10 - 3 Teslas por año.

Por otro lado, dichos imanes permanentes presentan las desventajas siguientes:

- Es muy difícil variar su inducción magnética.
- La magnitud de la inducción magnética es sensible a la temperatura.

Electroimanes

Para conseguir una separación efectiva de partículas débilmente magnéticas y de un tamaño limitado, es preciso emplear unos valores de inducción magnética y de gradiente, que no son alcanzables con los imanes permanentes. Por otro lado, como el

campo magnético disminuye muy rápidamente con la distancia a la superficie de los imanes permanentes, el volumen efectivo en el que puede ser creada una fuerza magnética suficiente, es limitado en este tipo de equipos.

Para alcanzar un campo magnético suficientemente alto en un volumen grande que garantice una elevada producción, debe emplearse un electroimán, en el cual la corriente que circula a través de una bobina, magnetice una gran masa de hierro, la cual produce un campo en el volumen de trabajo.

Las disposiciones adecuadas del hierro y de la bobina pueden incrementar considerablemente la eficacia del imán. Aunque la intensidad del campo creado está limitada por la saturación magnética del hierro, la fuerza magnética generada por tales electroimanes es usualmente suficiente, para la mayoría de las aplicaciones de separación magnética de minerales débilmente magnéticos y con un tamaño de tan solo unas pocas micras.

Imanes de solenoide

La inducción magnética obtenida con los electroimanes con núcleo de hierro, está limitada por la saturación del hierro, para obtener campos todavía mayores, es preciso emplear solenoides. En vez de hacer uso de la magnetización del hierro, el campo creado es obtenido directamente a partir de la corriente que circula por la bobina, de aquí que el imán deba construirse de forma que el arrollamiento sea tan cerrado como sea posible, y que la intensidad de la corriente a través del conductor sea suficientemente alta. Generalmente la bobina se dispone revestida de un armazón de acero que facilita la circulación del flujo magnético.

Imanes superconductores

La superconductividad es un fenómeno por el cual ciertos metales, cuando son sometidos a muy bajas temperaturas, se convierten en conductores perfectos de la electricidad.

El estado superconductor aparece a una temperatura crítica que es característica de cada metal. En la práctica, la temperatura usual de operación es de 4,2°K, siendo esencial para lograr ese objetivo el empleo de helio líquido. Aunque son conocidos más de 2.000 superconductores, sólo unos pocos han sido producidos a escala industrial.

Actualmente, uno de los materiales más utilizados con este fin son las aleaciones de Nb- Ti, que permiten alcanzar inducciones magnéticas de hasta 8,8 Teslas. No obstante, parece que es posible que en un futuro próximo puedan existir materiales superconductores que permitan alcanzar campos magnéticos que superen los 25 Teslas.

CAPÍTULO IV

SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Introducción

En este capítulo se presentan los fundamentos teórico-prácticos de la separación magnética de minerales, se presentaran los equipos usados para este fin, haciendo énfasis en dos de estos equipos, el primero: separador isodinámico Frantz, utilizado comúnmente en la preparación de las muestras con la finalidad de fecharlas por el método de huellas de fisión, y el segundo: separador de alta intensidad Magnet-Lift, equipo a calibrar en este trabajo de investigación, para usarlo de igual manera en la separación de minerales para la técnica de datación nombrada anteriormente.

Separación Magnética

La separación magnética según KELLY & SPOTTISWOOD, se basa en colocar una mezcla de partículas en un campo magnético en condiciones ideales, donde queden todas ellas sometidas a la influencia de dicho campo y a la de otras fuerzas cuya dirección formen un ángulo con la de la fuerza de campo. Estas fuerzas accesorias son: magnéticas, gravitacionales, centrífugas, de fricción o inercia, y de atracción o de repulsión interparticular. La fuerza resultante concreta que se emplea y la dirección de la aplicación del campo magnético con respecto a aquellas, es lo que diferencia a los aparatos comerciales empleados para este tipo de separación.

Los físicos (KELLY & SPOTTISWOOD 1990) sustentan el criterio de que la propiedad magnética de los cuerpos se debe a una alineación direccional de algunos de sus átomos o grupos de átomos bajo la influencia de un campo magnético externo; que los cuerpos alineados agregan, por lo tanto, el efecto magnético que se registra dentro de cada partícula al del campo establecido y que, como resultado de esta concentración de efecto magnético dentro de las partículas, se establecen fuerzas

mecánicas entre dichas partículas y el campo.

La separación magnética es un método de concentración (KELLY & SPOTTISWOOD 1990) que se utiliza en aquellos casos donde los diversos componentes de un mineral responden de manera diferente a un campo magnético aplicado. Esta no solo es útil para concentrar o recuperar menas de un mineral, sino también para purificar o limpiar materias primas que pudieran contener impurezas, entre otras aplicaciones.

Equipos y Aplicaciones de la Separación Magnética

Los equipos para la separación magnética se dividen (KELLY & SPOTTISWOOD 1990) con toda propiedad según la magnitud del campo en dos categorías: separadores magnéticos de baja intensidad y separadores magnéticos de alta intensidad, usándose los primeros primordialmente para minerales ferromagnéticos, aunque también para minerales paramagnéticos de alta susceptibilidad magnética, y los segundos, para minerales de más baja susceptibilidad magnética. Ambos sistemas de baja y alta intensidad magnética, tienen un medio de transporte por el cual se pueden llevar a cabo en húmedo o en seco las separaciones.

En las operaciones de baja intensidad predomina el procesamiento en húmedo, a pesar de que existan plantas de procesamiento en seco de gran capacidad. Los separadores de alta intensidad magnética han sido tradicionalmente de proceso seco y de baja capacidad. Con base en los adelantos logrados en el diseño de imanes, ha sido posible construir separadores de gran capacidad para procesos húmedos, de alta intensidad magnética, y se han aplicado con éxito en la concentración de minerales paramagnéticos.

Separadores magnéticos de baja intensidad

Los separadores de baja intensidad de campo generalmente tienen valores máximos de intensidad de campo e inducción magnética no sobrepasan los 2000 Oersted y 2000 Gauss respectivamente, lo cual corresponde al máximo campo producido por imanes permanentes de ferrita y bario.

A continuación, se presentan en la tabla 4.1 algunos equipos disponibles para la separación magnética en húmedo de baja intensidad:

Tabla 4.1: Descripción de algunos equipos de baja intensidad para separación magnética en húmedo.

HÚMEDO DE BAJA INTENSIDAD			
Tipo de separador	Tasa de alimentación (m ³ /min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
Rotación inversa	50-250	0.05- 0.06	760-1200(Diámetro) 1525.3050(Ancho)

Descripción: La pulpa de alimentación se hace pasar por el canalón en dirección contraria a la de rotación del tambor. Las partículas magnéticas captadas por el tambor son descargadas casi inmediatamente. Producen alta recuperación pero concentrado de baja ley en vista de que hay poca oportunidad para que las partículas no magnéticas atrapadas sean separadas por lavado. La recuperación es alta porque las partículas pueden ser captadas más adelante corriente abajo por el tambor, y regresadas como concentrado.

Aplicaciones: Son adecuados cuando deben manejarse variaciones en la alimentación, en donde deben minimizarse las pérdidas magnéticas y en donde no se requiere alta ley. Se emplean a menudo para tratar por segunda vez colas procedentes de un tambor de corriente de igual dirección que la de rotación, como en la recuperación en medio pesado en la que debe obtenerse recuperación máxima de la magnetita o del ferrosilicio. Con las taconitas se emplean en el producto de molinos de bolas. Se emplean a menudo tanques dobles.

Tipo de separador	Tasa de alimentación (m ³ /min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
A contracorriente	20-250	0.05 a 0.06	760-1200 (Diámetro) 1525-3050 (Ancho)

Descripción: La pulpa de alimentación se introduce aproximadamente en el punto medio de la sección magnética, por lo que tienen características tanto de corriente de igual dirección que la de rotación como de rotación inversa. El agua de lavado incrementa la agitación de las partículas magnéticas para remover las partículas atrapadas y proporcionar concentrado limpio. Las colas pasan por un imán opuesto a la rotación para incrementar la recuperación.

Aplicaciones: Se usan a menudo para efectuar la separación final. Dan buena recuperación y concentrados extremadamente limpios.

En la tabla 4.2, se muestran algunos separadores secos de baja intensidad:

Tabla 4.2: Descripción de algunos equipos de baja intensidad para separación magnética en seco.

SECO DE BAJA INTENSIDAD			
Tipo de separador	Tasa de alimentación (m³/min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
Tambor de alta velocidad	0,05- 0,45	0,04 a 0,05	400 – 916 (Diámetro) 300 - 3000 (Ancho)

Descripción: Separador de alta velocidad con gran número de imanes permanentes (hasta 44) Situados en un yugo estacionario de 210° dentro del tambor rotatorio (polos alternados). Las partículas no magnéticas son lanzadas hacia afuera por la fuerza centrífuga. Las partículas magnéticas son atraídas al tambor hasta que quedan fuera de la región del campo. La agitación, se debe al gran número de polos y da un Producto limpio.

Aplicaciones: Se usa para concentrar magnetita cuando no se dispone de agua fácilmente. Se incorporan en circuitos con molienda en seco. Puede usarse con reciclado de intermedios.

Tipo de separador	Tasa de alimentación (m³/min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
Ball-Norton	0,13 – 0,5	0,02 a 0,04	760 (diámetro) 1525 (ancho)

Descripción: Utiliza un campo magnético de más alta intensidad que el tipo de alta velocidad pero, tiene sólo 8-10 polos alternados.

Aplicaciones: Concentrado de magnetita gruesa en diagrama de proceso en seco. Da concentrado de alta ley.

Separadores magnéticos de alta intensidad

Los separadores de alta intensidad de campo generan inducciones magnéticas comprendidas entre 5000 y 25.000 Gauss, los cuales son empleados para tratar minerales con susceptibilidad magnética mayor que cero (minerales paramagnéticos), con el avance de la tecnología de los materiales superconductores, actualmente se encuentran disponibles separadores magnéticos que alcanzan inducciones magnéticas de 50.000 Gauss.

A continuación, se presentan en la tabla 4.3 algunos equipos disponibles para la separación magnética en húmedo de alta intensidad:

Tabla 4.3: Descripción de algunos equipos de alta intensidad para separación magnética en húmedo.

HÚMEDO DE ALTA INTENSIDAD			
Tipo de separador	Tasa de alimentación (m³/min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
De carrusel	0,01 – 10	< 2,0	3000 (diámetro)

Descripción: El carrusel consiste en una caja que contiene una matriz ferromagnética. La matriz puede ser de esferas de acero, placas ranuradas, acero desplegado o virutas de acero. El carrusel gira a través de un campo magnético de alta intensidad que induce un campo magnético de alto gradiente en la matriz. La alimentación entra al carrusel en el campo magnético en el que son retenidas, las partículas magnéticas; la rotación arrastra a las partículas magnéticas hacia afuera del campo y allí son ahogadas en una canal.

Aplicaciones:

Se usa para minerales paramagnéticos. Concentraciones de hematita y cromita. Se usa en la separación de pequeñas cantidades de minerales ferrieros, el caolín y de los concentrados de casiterita, schelita e ilmenita. Uso potencial en la separación de piritita del carbón mineral.

Tipo de separador	Tasa de alimentación (m³/min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
De cartucho	0,07 -0,3	2,0	2130 (diámetro)

Descripción: Matriz fija de viruta de acero desplegado dentro del campo magnético. La pulpa alimentación va seguida por el agua del lavado con el imán conectado; las partículas magnéticas se desprenden por lavado con el imán desconectado.

Aplicaciones: Se usa primordialmente en la separación de minerales finos de hierro, del caolín; usos similares a los del tipo de carrusel.

En la tabla 4.4, se muestran algunos separadores secos de alta intensidad

Tabla 4.4: Descripción de algunos equipos de alta intensidad para separación magnética en seco.

SECO DE ALTA INTENSIDAD			
Tipo de separador	Tasa de alimentación (m³/min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
De rodillo inducido	0,01 -0,10	< 2,1	250 – 1000 (diámetro)

Descripción: Consiste en una serie de rodillos Giratorio laminados formados por discos alternados magnéticos y no magnéticos. Los rodillos se magnetizan por inducción procedente de un electroimán estacionario de alta intensidad. Las partículas no magnéticas siguen una trayectoria natural producida por la acción centrifuga. Las partículas Magnéticas son desviadas por el campo. La práctica general es tener tres rodillos sucesivos de intensidad de campo magnético creciente, que se logra reduciendo el entrehierro. Es deseable tener alimentación clasificada por tamaños.

Aplicaciones: Concentraciones de materiales paramagnéticos secos. Se emplea mucho en la industria de las arenas de playa. También se emplean para procesar wolframita, monadita, casiterita y en la limpieza de arenas silicea y feldespato.

Tipo de separador	Tasa de alimentación (m³/min)	Intensidad del campo (T a 5 cm.)	Tamaño (mm)
De banda transversal	0,02	2,0	450 (ancho)

Descripción: Electroimán con polos separado por bandas. El imán levanta las Partículas magnética de la capa delgada que va sobre la banda de alimentación a la banda transversal contra el polo superior. El polo superior termina en un borde Agudo, y el polo inferior es plano; esto propicia un gradiente de campo alto en el entrehierro.

Aplicaciones: Uso similar al equipo de rodillo inducido, pero limitado a minerales de alto valor como la casiterita, la columnita, la monazita y los minerales de tungsteno. Puede usarse para separar simultáneamente varios minerales con una gama de susceptibilidades. Se usa cuando se requiere una separación en extremo selectiva.

Tipo de separador	Tasa de alimentación (Kg/h)	Intensidad del campo (T a 5 mm)	Tamaño de alimentador (cc³)
Magnet-Lift (13)111-5	50	2,0	1060

Descripción: estas se darán en las paginas siguientes

Aplicaciones: estas se darán en las paginas siguientes

Tipo de separador	Tasa de alimentación (kg /h)	Intensidad del campo T	Tamaño de alimentador (cc³)
Frantz L-1	0,150	1	100

Descripción: estas se darán en las paginas siguientes

Aplicaciones: estas se darán en las paginas siguientes

PRINCIPIOS Y MECANISMOS DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Los principios de la separación magnética que constituyen la base del diseño y la operación del separador magnético se describen en seguida

La separación magnética es una separación física de partículas por separado que se basa en una competencia triple entre:

1. Fuerzas magnéticas.
2. Fuerzas gravitacionales, centrífugas, de fricción o de Inercia. .
3. Fuerzas de atracción o de repulsión interparticular.

Estas fuerzas magnéticas, en competencia, e inter-partícula determinan el rendimiento del separador y dependen tanto de la naturaleza de la alimentación como del carácter del separador. La naturaleza de la alimentación abarca su distribución de tamaños, la susceptibilidad magnética y otras propiedades físicas y químicas que puedan afectar a las diversas fuerzas que intervienen.

La fuerza magnética

Es difícil determinar la fuerza magnética que es aplicada sobre una partícula. Sin embargo, pueden hacerse por lo general suposiciones simplificadas que permitan calcular la fuerza con suficiente exactitud en casos específicos. Si la partícula es suficientemente pequeña para que el campo magnético producido externamente sea aproximadamente uniforme dentro de la partícula, ésta puede considerarse como un dipolo magnético puntual situado en el centro de masa de la partícula. La fuerza magnética que suprayace sobre una partícula situada en un campo magnético aplicado se expresa entonces por la ecuación vectorial

$$\vec{F}_m = (\vec{V}M \cdot \vec{V})\vec{B} \quad (4.1)$$

Donde:

$V\vec{M}$ = Momento magnético de la partícula de volumen V

\vec{B} = Campo magnético producido externamente o la inducción magnética en el centro de masa de la partícula.

Fuerzas en competencia

Las fuerzas presentes en los separadores magnéticos que compiten con las fuerzas magnéticas y actúan sobre todas las partículas que existen en el separador son:

La gravedad, el arrastre hidrodinámico (si la separación se efectúa en húmedo este juega un papel importante), la fricción y la inercia. Si la separación se efectúa en la superficie de un tambor rotatorio, la fuerza centrífuga puede también ser un factor de importancia. En la separación en seco la fuerza que cobra importancia es la fuerza de gravedad por lo que se le dedica aquí la mayor atención.

En una partícula esférica de densidad ρ_s , la fuerza neta de gravitación se expresa por

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_0^3 (\rho_s - \rho_f) g \quad (4.2)$$

Donde:

g = Aceleración debida a la gravedad.

ρ_f = Densidad del medio fluido en uso.

ρ_s = Densidad del sólido.

d_0 = Diámetro de la partícula.

Como la separación es en seco la ρ_f pasa a ser el aire, el cual es tan pequeño en comparación con ρ_s , entonces es posible despreciarla, así: la ecuación (4.2) se reduce a:

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_0^3 (\rho_s) g \quad (4.3)$$

En consecuencia, la fuerza gravitacional depende de la tercera potencia del diámetro de la partícula, y es significativa para las partículas grandes. Por tanto, para tratar partículas grandes en un separador magnético seco, las fuerzas magnéticas deben ser suficientes para mantener las partículas magnéticas contra la fuerza de gravedad en competencia.

Como el tamaño de partícula no es un factor, los separadores magnéticos secos pueden procesar con éxito una amplia gama de tamaños de partículas.

Fuerza hidrodinámica

La fuerza de arrastre hidrodinámico depende de la primera potencia del radio de la partícula cuando existen condiciones de flujo laminar, por lo que es más significativa para partículas pequeñas. En un separador magnético húmedo para partículas pequeñas, la fuerza magnética tiene que ser mayor que la de arrastre hidrodinámico ejercido por la pulpa en corriente. La ecuación de la fuerza hidrodinámica viene dada según (MENÉNDEZ 1998) por:

$$F_d = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R (\nu_p - \nu_f) \quad (4.4)$$

Donde:

η = Viscosidad dinámica del fluido

R = Radio de la partícula

v_p = Velocidad de la partícula

v_f = Velocidad del fluido

Fuerza de Empuje

La fuerza de empuje (MENÉNDEZ 1998) es la fuerza que se le imprime a la partícula debido a la aceleración que el alimentador ejerce sobre ella. La ecuación de fuerza de empuje viene dada por:

$$F_e = \frac{1}{2} \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{d_1 - d_2} \right) \quad (4.5)$$

Donde:

V = Velocidad de la partícula en dos puntos distintos.

d = Distancia recorrida por la partícula.

Fuerza Centrifuga

Esta fuerza es la más importante en un separador magnético seco de tambor de baja intensidad, esta fuerza es la encargada de desprender las partículas del tambor. La ecuación de la fuerza centrifuga viene dada por:

$$F_c = V_p \cdot \rho_p \cdot \omega^2 \cdot R \quad (4.6)$$

Donde:

V_p = Velocidad de la partícula

ρ_p = Densidad de la partícula

ω = Velocidad angular del tambor

R = Radio del tambor o cilindro de separación

RELACIÓN DE ATRAPAMIENTO (R_a)

Esta claro que una condición necesaria, pero no suficiente para que ocurra la separación de una partícula fuertemente más magnética de otra menos magnética, en un campo magnético producido en un determinado separador, es que la fuerza de atracción magnética $F_{\text{mag}}^{(m)}$ que actúa sobre la partícula más fuertemente magnética (m), sea mayor que la suma de todas las otras fuerzas que se oponen a ella, $F_c^{(m)}$. Simultáneamente, las fuerzas magnéticas actuando sobre las partículas menos magnéticas (n), $F_{\text{mag}}^{(n)}$, debe ser menor que la suma del resto de las fuerzas que se oponen a aquella, $F_c^{(n)}$. Así, en un separador magnético deben cumplirse las siguientes condiciones:

$$F_{\text{mag}}^{(m)} \geq \Sigma F_c^{(m)} \quad (4.7)$$

$$F_{\text{mag}}^{(n)} \leq \Sigma F_c^{(n)} \quad (4.8)$$

La relación de atrapamiento (R_a) en un separador magnético Viene representada como el cociente de la fuerza de atrapamiento (magnética) y las fuerzas de desprendimiento (gravitacional, centrífuga, hidrodinámica, empuje y otras). De acuerdo a esta relación, se producirá separación si la relación de atrapamiento es mayor o igual a 1.

Antecedentes del separador Frantz

Desde la década de los treinta Samuel Frantz estudió los diferentes tipos de separadores magnéticos que se estaban usando en el departamento de geología de la Universidad de Princeton y concluyó que se podría fabricar un separador de mayor precisión aplicando un campo magnético uniforme a la muestra. Esto derivó en la construcción de un modelo piloto de separador isodinámico que fue probado en esta universidad, resultando ser altamente exitoso. A partir de ese momento, el separador Frantz ha estado casi en continuo uso en el departamento de geología y se han realizado decenas de miles de separaciones, así como diferentes adaptaciones a este equipo.

Partes del separador isodinámico Frantz L-1

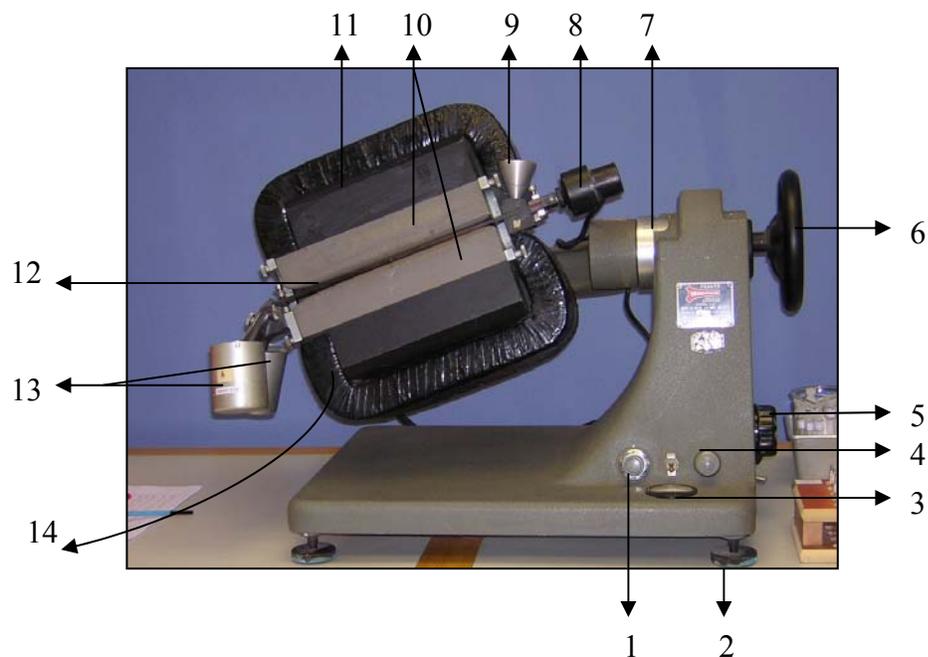


Figura 4.1: piezas que componen el separador isodinámico Frantz L-1.

1. control de Vibración
2. Base ajustable para calibrar el equipo
3. Amperímetro

4. Indicador de encendido del equipo
5. Control de amperaje
6. Control de la pendiente lateral
7. Indicador de grados para la pendiente lateral
8. Vibrador
9. Tolva
10. Polos del imán
11. Núcleo
12. Riel separador
13. Contenedores de material
14. Control de la pendiente frontal (este se encuentra en la parte de atrás)

Preparación de las muestras para la separación

- (a) Se hace la trituración de la muestra.
- (b) Se tamiza las muestras entre las mallas 30 y 400 puesto que estos son los rangos en los que se obtienen óptimas separaciones.
- (c) Se remueven las posibles partículas de magnetita y fibras de hierro presentes, esto se logra fácilmente con un imán de mano envuelto en papel (servilleta) o en una bolsa plástica y pasado sobre la muestra hasta que no se recojan más virutas de magnetita o hierro.
- (d) Se lava la muestra antes de ser pasada por el separador para remover el polvo adherido a los granos. Esto se efectúa sumergiendo la muestra en un recipiente con agua, y dejándolo por 20 segundos para luego ser secada. Este paso es primordial puesto que de no realizarse la calidad de la separación no será buena

Aplicaciones del separador Frantz

- Separación de minerales en rocas ígneas.
- Separación de los componentes de una roca para determinar la cantidad de los diversos constituyentes.
- Separación en concentrados de minerales pesados de arenas o rocas y residuos insolubles de limos.
- Concentrados magnéticos de arenas y rocas sedimentarias.
- Separaciones diamagnéticas usando el conducto inclinado
- Separaciones de sulfatos
- Separación de magnetita de menas complejas de hierros o rocas.

Determinación de la susceptibilidad magnética de masa

Una determinación aproximada de la susceptibilidad de la masa de cualquier material pasado a través del separador Frantz (HESS), puede ser hecha por la aplicación de la siguiente expresión:

$$X_m = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{sen}(\alpha)}{I^2} \quad (4.9)$$

Donde:

X_m = susceptibilidad de masa = susceptibilidad magnética/densidad.

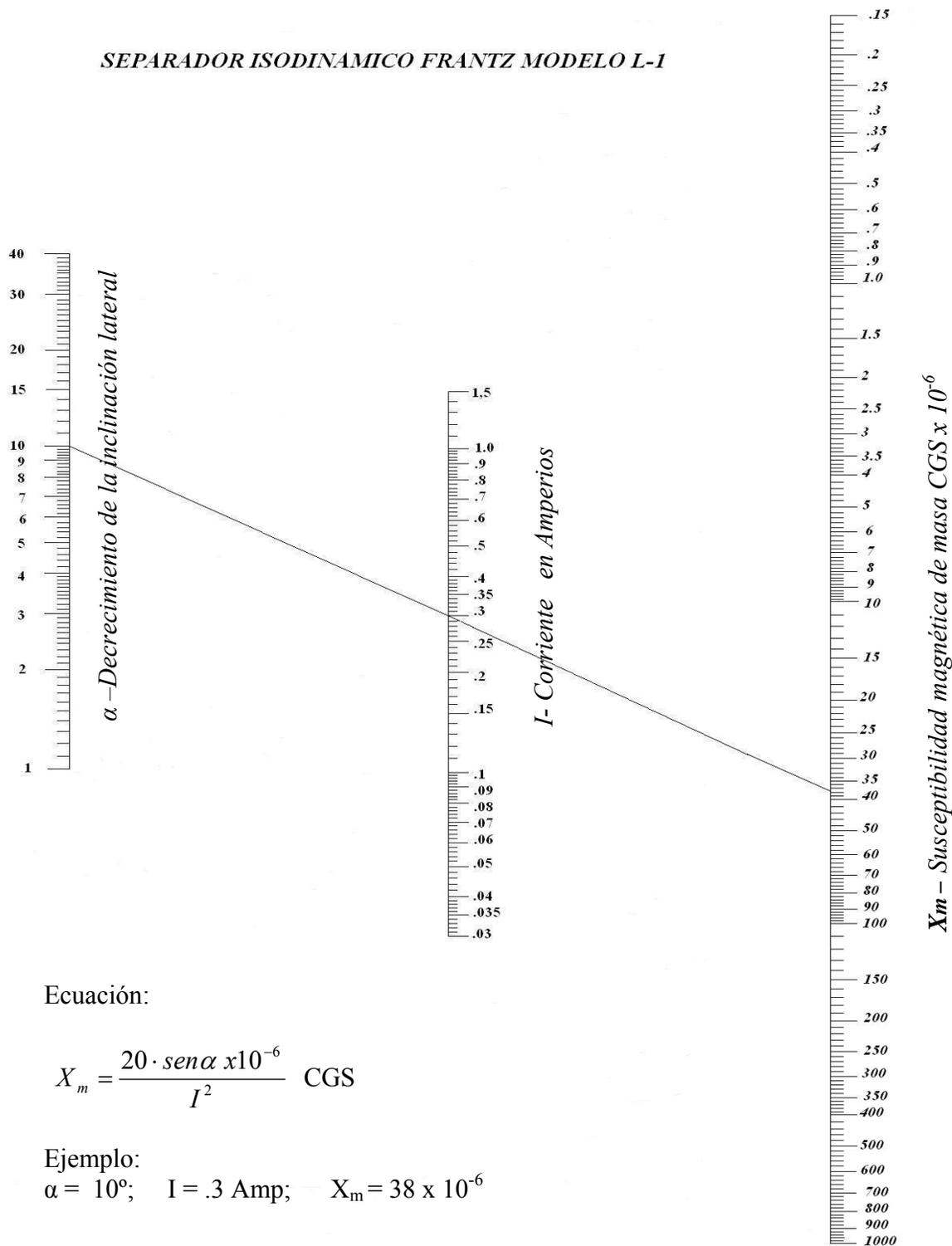
α = Ángulo de inclinación lateral.

I = corriente en amperios.

Esta fórmula puede ser aplicada en los casos donde $X_m \ll 1$, no debe ser usado para magnetita u otras sustancias con un valor de X_m muy elevado.

Por encima de una corriente de 1.3 Amps existirá saturaciones, por lo que las determinaciones de X_m deben ser hechas a corrientes menores que este valor. La ecuación anterior puede ser explicada observando la figura 4.2, como vemos con el ejemplo para obtener la susceptibilidad magnética de masa solo necesitamos el ángulo de decrecimiento de la inclinación lateral y la corriente aplicada, gráficamente esta se halla prolongando la línea que une a estos dos puntos.

SEPARADOR ISODINAMICO FRANTZ MODELO L-1



Ecuación:

$$X_m = \frac{20 \cdot \text{sen} \alpha \times 10^{-6}}{I^2} \text{ CGS}$$

Ejemplo:

$$\alpha = 10^\circ; \quad I = .3 \text{ Amp}; \quad X_m = 38 \times 10^{-6}$$

Figura 4.2: Determinación de la susceptibilidad magnética en el separador isodinámico Frantz.

(Tomado y modificado de Hess, 1959)

Estimación del comportamiento magnético a partir de los resultados conocidos

Según FLINTER en sus trabajos realizados con el separador magnético Frantz modelo L-1 para separar minerales en los concentrados aluvionales en Malaya se encontró que la susceptibilidad magnética de masa (X_m) de un mineral esta dada por:

$$X_m = \frac{\text{Susceptibilidad Magnética}}{\text{Densidad}} \quad (4.10)$$

Un valor aproximado de X_m puede ser obtenido de la ecuación. (4.9)

Una importante aplicación de esta regla es que una vez que el valor de X_m para cualquier mineral es conocido, la corriente en la cual es atraído puede ser calculada con cualquier otra inclinación lateral o debido a cualquier variación en composición que afecte la gravedad específica. El valor de X_m para los distintos amperajes, en inclinaciones laterales de 15°, 20°, 25° y 30° están dadas en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Susceptibilidad Magnética de masa (X_m) en 10^{-6} CGS

Tomado de Flinter 1959

a I Amp	INCLINACIÓN LATERAL			
	15°	20°	25°	30°
0,1	517,64	684,04	845,24	1000,00
0,2	129,41	171,01	211,31	250,00
0,3	57,52	76,00	93,92	111,11
0,4	32,35	42,75	52,83	62,50
0,5	20,71	27,36	33,81	40,00
0,6	14,38	19,00	23,48	27,78
0,7	10,56	13,96	17,25	20,41
0,8	8,09	10,69	13,21	15,63
0,9	6,39	8,44	10,44	12,35
1,0	5,18	6,84	8,45	10,00
1,1	4,28	5,65	6,99	8,26
1,2	3,59	4,75	5,87	6,94
1,3	3,06	4,05	5,00	5,92
1,4	2,64	3,49	4,31	5,10

Como uno de los aportes (FLINTER 1959) importantes en las separaciones de minerales con el separador isodinámico Frantz se determinó que el factor más importante que influye en la susceptibilidad magnética de un mineral es el porcentaje de hierro ferroso Fe^{2+} presente en su composición, entre ellas tenemos la ilmenita y siderita, ambas con alto porcentaje de Fe^{2+} . El granate Rosado con su alta susceptibilidad magnética de masa, es una alta variedad ferrosa (almandita): Incrementado el amperaje necesario para atraer ilmenita cuando esta alterada la arizonita puede ser no visto por el bajo valor de X_m resultante de una pérdida de contenido de Fe^{2+} mientras que la gravedad específica permanece similar.

El separador Isodinámico Frantz modelo L-1 fue calibrado por Hess, tomando en consideración una lista de minerales de diferentes susceptibilidades magnéticas, esta lista junto con los valores óptimos para la pendiente lateral puede ser apreciada en la tabla 4.6

Tabla 4.6: Minerales pesados comunes en rocas sedimentarias ordenados según su susceptibilidad magnética.
(Tomado de Hess, 1959)

Pendiente Lateral equipo 20°	Pendiente Lateral equipo 20°	Pendiente Lateral equipo 20°	Pendiente Lateral equipo 20°	Pendiente Lateral equipo 5°	Pendiente Lateral equipo 5°
A Altamente magnéticos	B Magnéticos a 0,4 Amps	C Magnéticos a 0,8 Amps	D Magnéticos a 1,2 Amps	E Magnéticos a 1,2 Amps	F Magnéticos a 1,2 Amps
Magnetita Pirrotita	Ilmenita Granate Olivino Cromita Cloritoide	Horblenda Hipersteno Augita Actinolita Estaurolita Epidoto Biotita Clorita Turmalina (Oscura)	Diopsido Tremolita Enstantita Espinela Estaurolita (Clara) Moscovita Zoisita Clinozoisita Turmalina (Clara)	Esfena Leucoxeno Apatito Andalucita Monacita Xenotina	Circón Rutilo Anatasa Brookita Pirita Corindón Topacio Fluorita Cianita Silimanita Anhidrita Berilo

Cualquier mineral puede ser encontrado en otro grupo de los que aparecen en el listado anterior. La tabla únicamente indica la susceptibilidad que es usualmente encontrada.

El Separador Magnético Isodinámico Frantz es el más utilizado en la preparación de la muestra para su datación por el Método de Huellas de Fisión (Garver 2004). Sin embargo, la aplicación de este equipo en el Laboratorio de Termocronología, posee la desventaja de ser muy lento, debido a que los minerales a separar provienen de muestras de más de 40 kilogramos de peso, en este caso en particular, el alimentador de la muestra es muy pequeño, y el electroimán necesita grandes intervalos de tiempo para poder procesar esta última. El tamaño del alimentador puede ser apreciado en la figura 4.3.



Figura 4.3: Tamaño del alimentador de la muestra del Frantz.

Por tal razón, es necesaria la calibración para este fin del separador magnético MAGNET LIFT CARPCO MODELO MLH (13)111-5.

Fundamentos de la separación magnética en el separador MAGNET LIFT CARPCO MODELO MLH (13)111-5:

En el instante de realizar una separación, la muestra a ser procesada está en el carril vibratorio y dispuesta a pasar por el entre hierro, en ese momento es cuando se analiza el principio de la separación magnética, recordando que las fuerzas que actúan sobre una partícula dependen en mayor o menor medida del tipo de equipo a utilizar, en el caso del separador Carpcó MLH(13) 111-5 las fuerzas que operan son Fuerza magnética (F_m), Fuerza gravitacional (F_g), Fuerza centrífuga (F_c) y la Fuerza de empuje (F_e). Los componentes de estas fueron estudiadas en el capítulo IV. Otros puntos que se deben tener presentes es la existencia del campo magnético de alta intensidad generado en el entre hierro y el cual es producido por una serie de discos magnéticos y no magnéticos aunado a esto tenemos otra variable a considerar la susceptibilidad magnética puesto que con esta se entiende el comportamiento de los granos en el separador magnético, se deben reconocer dos tipos de partículas, las primeras que presentan susceptibilidad magnética $X_m \geq 1$ y las segundas con susceptibilidad magnética $X_m < 1$.

En las figuras 4.4 se presenta el comportamiento de una partícula dentro un campo magnético con susceptibilidad magnética mayor o igual a uno.

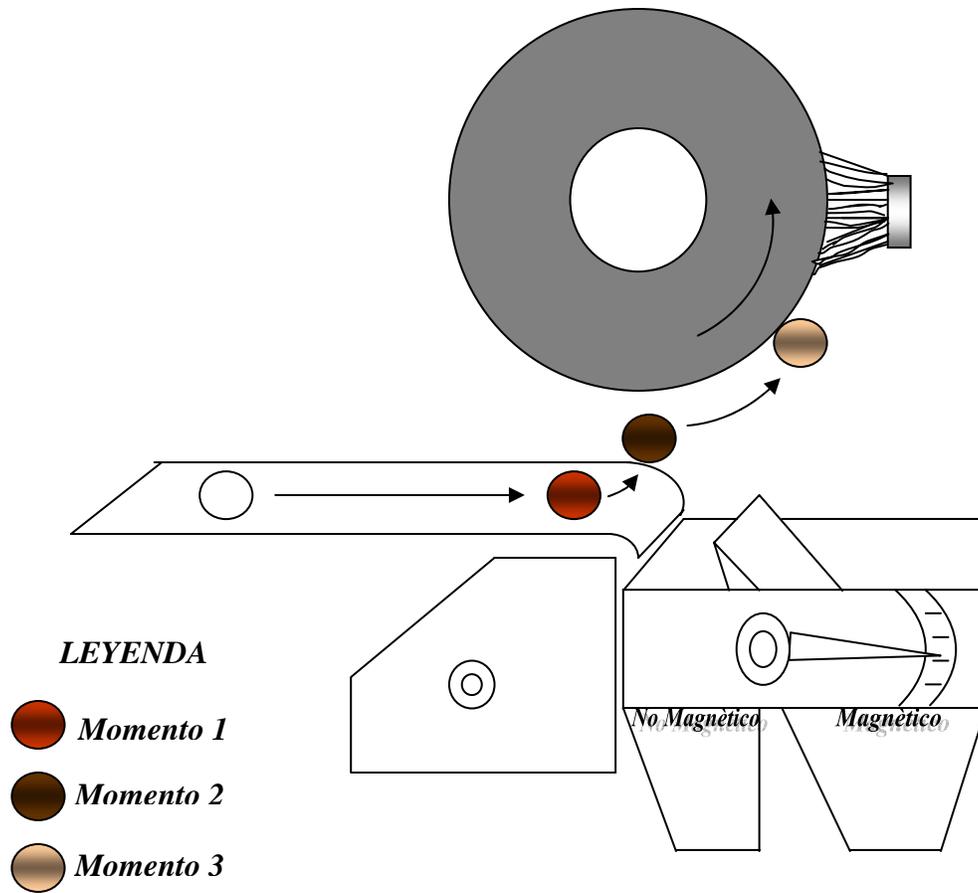
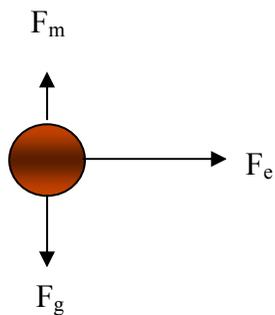


Figura 4.4: Comportamiento de las partículas con susceptibilidad positiva

Momento 1

En este momento la acción de la fuerza magnética no consigue vencer las fuerzas en competencia, pero la fuerza de empuje vence a la fuerza de roce haciendo que se desplacen las partículas.

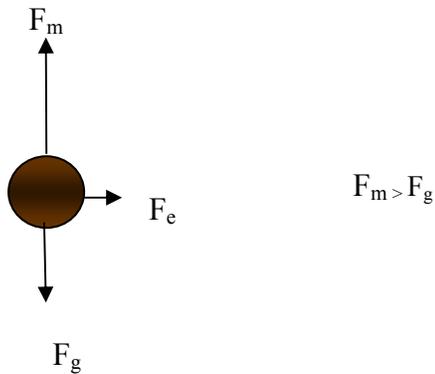


$$F_g > F_m$$

Nótese que en este momento $Ra < 1$

Momento 2

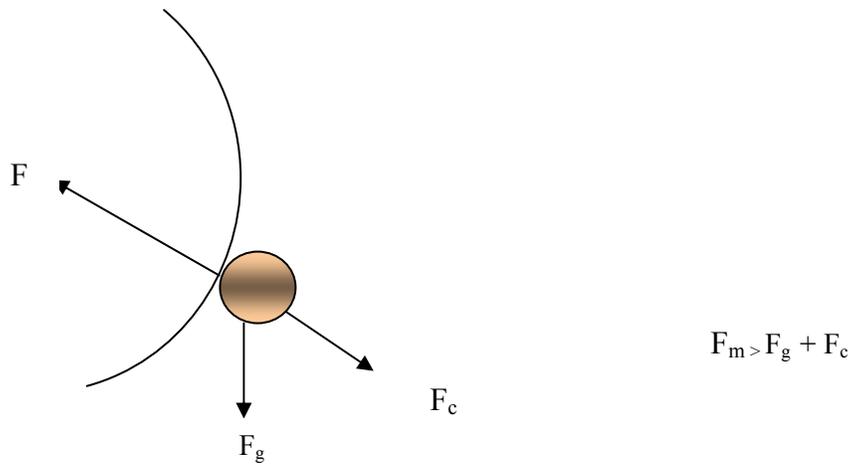
En el momento 2, $Ra > 1$ por consiguiente la partícula se dispone a seguir la trayectoria magnética lo que implica que las fuerzas en competencia fueron vencidas por la fuerza magnética.



Momento 3

En este instante $Ra > 1$, nótese que las partículas están adheridas al rodillo lo cual indica una mayor fuerza magnética logrando vencer la fuerza gravitacional. En este momento entra en juego la fuerza centrífuga, por lo tanto para que ocurra la separación, la fuerza magnética tiene que ser mayor a la suma de las fuerzas gravitacional y centrífuga.

Si la fuerza magnética es menor a la suma de la fuerza gravitacional y centrífuga, los granos se despegarán de rodillo inducido ($Ra < 1$) antes de pasar por la escobilla que es la encargada de desprender las partículas, tomando en cuenta que la pureza de la separación se puede graduar por medio del separador manual (splitter).



Anteriormente se observaba del comportamiento dentro de un campo magnético de sustancias que presentan susceptibilidad magnética mayor o igual a uno, entre este rango se encuentran los ferromagnéticos y paramagnéticos respectivamente, a continuación se presenta el comportamiento de las sustancias con susceptibilidad magnética negativa los cuales están representados por los diamagnéticos. Entre las sustancias con susceptibilidad muy baja tenemos la pirita, la Fluorita y el cuarzo entre otros. En la figura 4.5 se presenta el comportamiento de una partícula dentro un campo magnético con susceptibilidad magnética negativa.

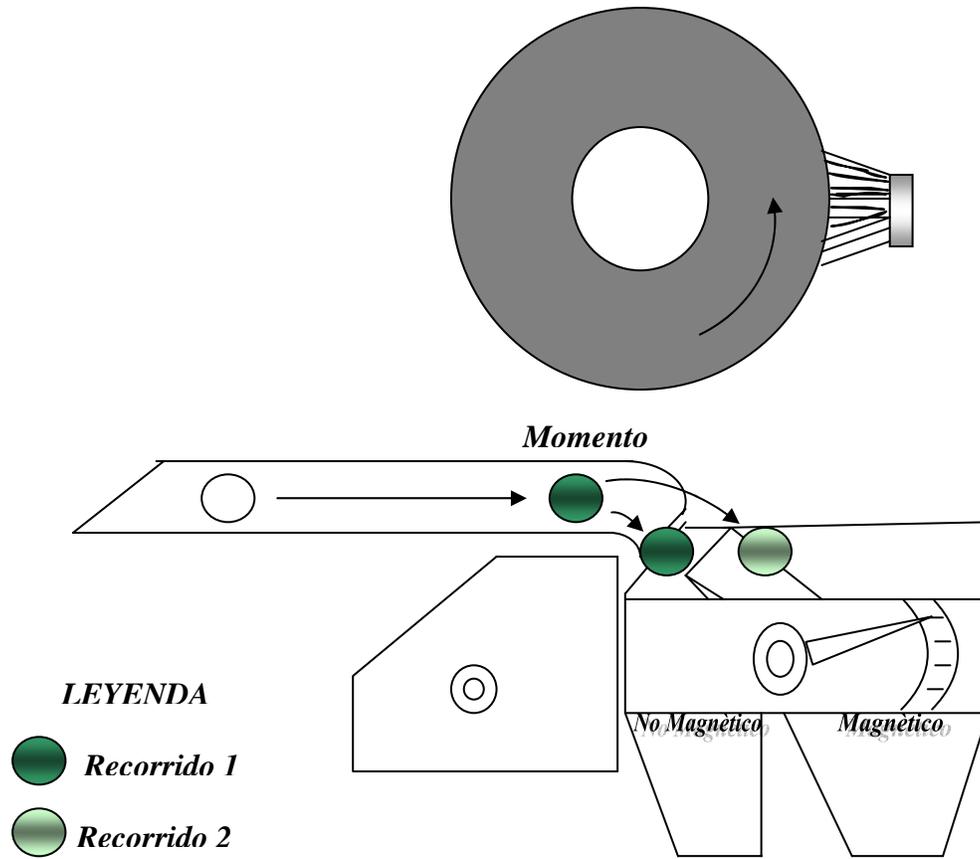
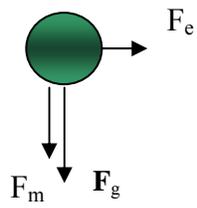


Figura 4.5: Comportamiento de las partículas con susceptibilidad negativa

Momento 1



Momento 1

Las sustancias con baja susceptibilidad magnética no se adhieren al rodillo inducido por lo que presentan una trayectoria de deflexión. Pero son afectadas por el campo inducido, dichas perturbaciones se observan en la trayectoria que estas siguen, por lo que existen dos posibles recorridos;

El primero que los granos unas vez que salen del carril vibratorio caigan en el lado de los no magnéticos, el segundo que por pequeñas inclusiones magnéticas en los granos y por la fuerza de empuje lleguen al lado magnético.

Cabe destacar que para que este segundo recorrido ocurra hay varias variables que lo permiten, una de ella seria la abertura del splitter, la tasa de alimentación y la magnitud de la fuerza magnética debido a que el vector de fuerza magnética es mayor a medida que se aumenta el campo, produciendo un mayor empuje.

Descripción del quipo Magnet- Lift

A continuación se describen las partes fundamentales del separador magnético Carpc modelo MLH (13) 111- 5, según la trayectoria de la muestra.

Tolva

Es una pieza de acero con una capacidad de 1016 cc (62”), donde se coloca la muestra a separar, presenta dos tornillos de ajuste (figura 4.11) los cuales permiten moverla y adaptarla a las especificaciones requeridas. Figura 4.6

Bandeja o carril vibratorio (fedder)

Este dispositivo es el encargado de transportar la muestra desde la tolva hasta el rodillo inducido, consta de un carril de acero inoxidable el cual es puesto a vibrar por un motor ubicado en la parte inferior del mismo (Figura 4.11) y posee un control donde se gradúan las vibraciones y así también la tasa de la muestra.

La separación existente entre la tolva y la bandeja es de 1mm. Figura 4.6

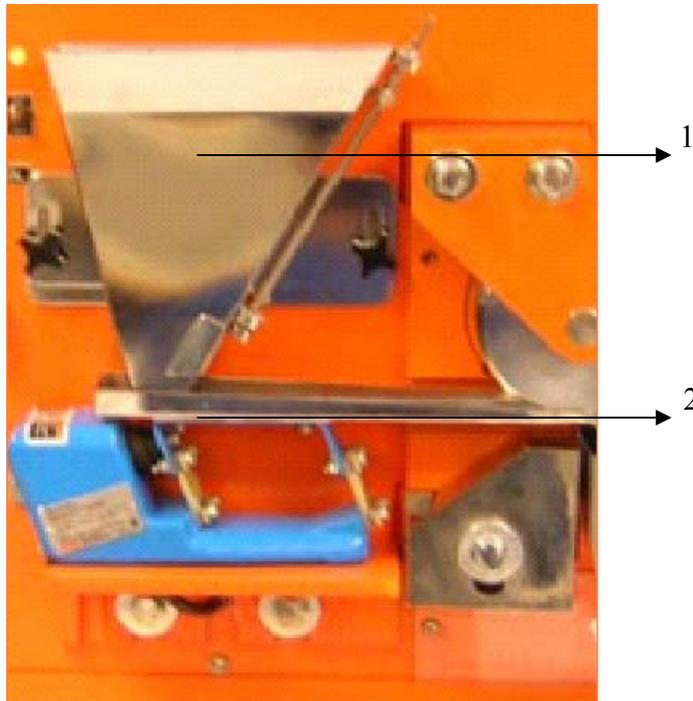


Figura 4.6: Tolva y carril vibratorio

1. Tolva
2. Carril vibratorio (*fedder*)

Rodillo inducido

Es un rodillo rotativo que consta de un conjunto de discos magnéticos y no magnéticos. Dicho dispositivo se encuentra entre dos polos de un circuito electromagnético, las laminaciones magnéticas son afectadas por el campo que induce el electroimán, provocando regiones con un alto gradiente magnético y la fuerza magnética para la separación.

Sus dimensiones son 50 mm de ancho y 127 mm de diámetro. Tiene un control independiente con el que se ajusta la velocidad angular (ver figura 4.11), estas van desde 0 hasta 245 rpm. Es importante siempre medir la separación que existe entre el rodillo inducido y la bandeja vibratoria, dicha separación debe ser 2,5 veces el tamaño del grano a procesar, para esto existen un juego de ocho regletas que trae el equipo las cuales están identificadas por colores según su espesor, las de color rojo tienen un grosor de 1mm y la blancas de 0,5mm (ver figura 4.8). Para evitar que al cilindro se le adhieran partículas magnetizadas una escobilla ubicada en la parte frontal de dicha pieza se encarga de despréndelas mientras este gira. Figura 4.7

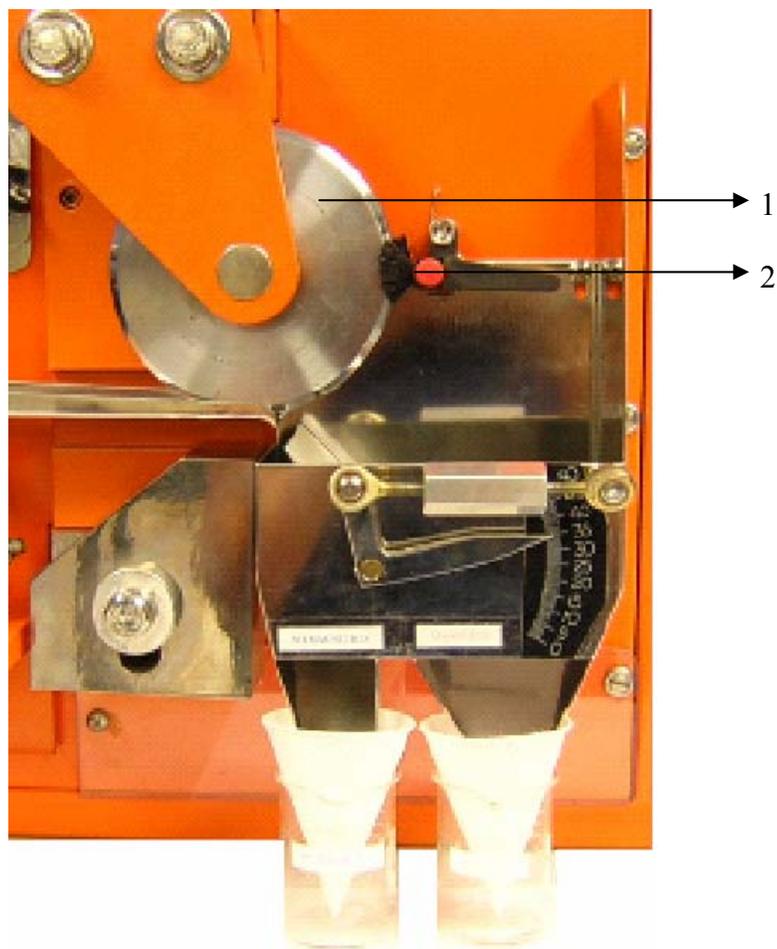


Figura 4.7: Rodillo inducido.

1. Rodillo inducido
2. Escobilla



Figura 4.8: Regletas de calibración del separador Magnet-Lift.

Electroimán

Este produce un campo magnético debido de una corriente eléctrica, que puede ser regulada por un control independiente (ver figura 4.11), logrando obtener un campo inducido de hasta 1,6 teslas, en la parte inferior del rodillo.

De acuerdo a la intensidad de corriente empleada y la abertura entre los electroimanes y el rodillo inducido, se puede conseguir el campo magnético aplicado conforme a la intensidad de corriente empleando las curvas de calibración del equipo, expuestas en la figura 4.9

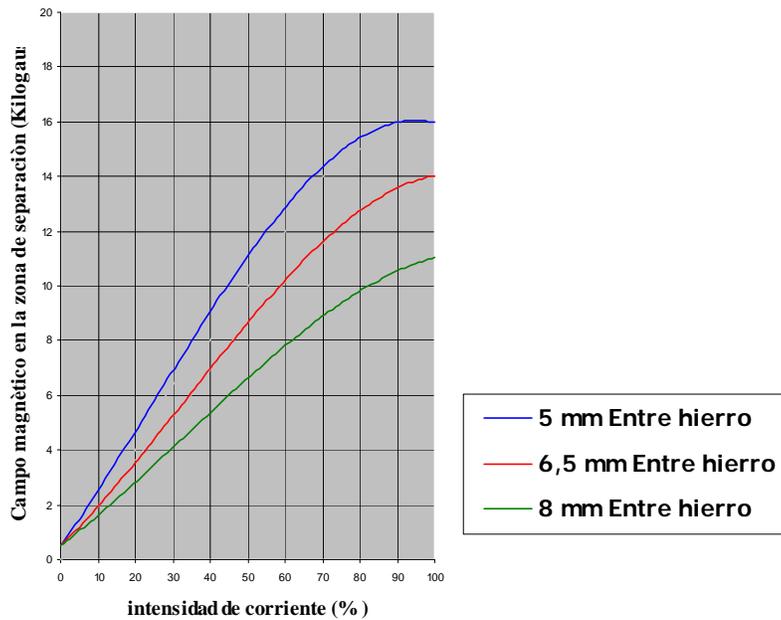


Figura 4.9: Curva de calibración del equipo (Manual equipo Carpco MLH (13) 111-5)

Separador manual (Splitter)

Es un dispositivo mecánico que permite la separación de minerales con diferentes susceptibilidades magnéticas, la cantidad de material es controlada por la posición del splitter, el cual se puede graduar para obtener la mayor pureza de material magnético o no magnético, este mecanismo consta de una lamina dispuesta de manera vertical la cual divide la trayectoria del material, el ajuste se da mediante un tornillo para calibrar la abertura, la cual esta dada en grados y estos van desde 0 hasta 50°. El splitter se gradúa midiendo la abertura del ángulo en sentido antihorario con respecto a la vertical. Ver figura 4.10

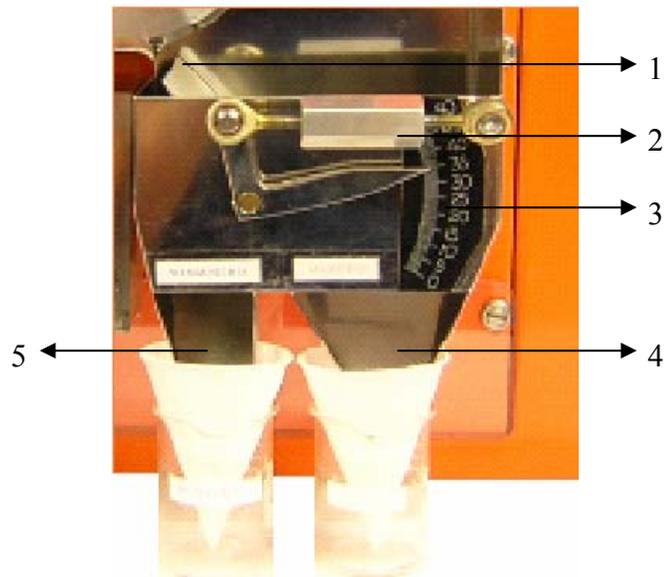


Figura 4.10: Componentes del separador manual (Splitter)

1. Splitter
2. Tornillo de ajuste del splitter
3. Placa indicadora de grados
4. Contenedor de material magnético
5. Contenedor de material no magnético

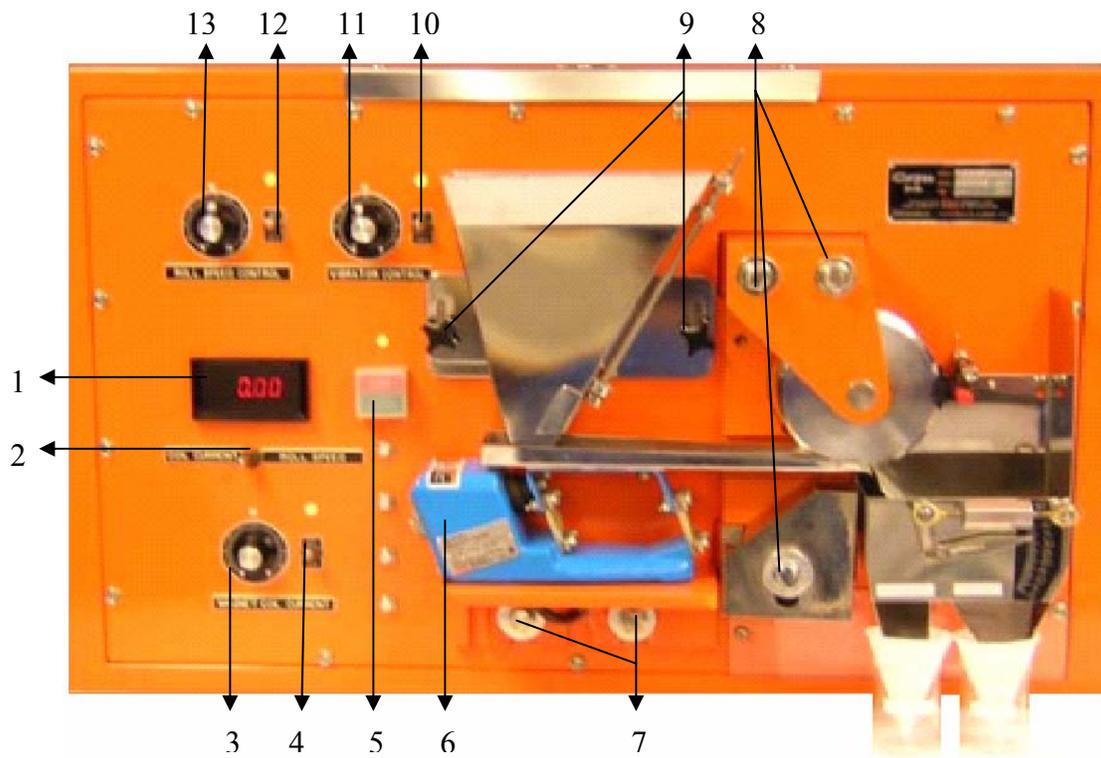


Figura 4.11: Partes de control y ajuste del separador Magnet-Lift.

1. Medidor de velocidad y amperímetro
2. Selector del medidor de velocidad y amperímetro
3. Control de corriente
4. Interruptor del control de corriente
5. Interruptor de encendido y apagado del equipo
6. Motor de vibración
7. Tornillos de ajuste del carril vibratorio
8. Tornillo de ajuste de los imanes
9. Tornillos de ajuste de la tolva
10. Interruptor del control de vibración
11. Control de vibración
12. Interruptor del control de rodillo
13. Control de velocidad del rodillo

Aplicaciones del separador Magnet-Lift

- Separación de minerales en rocas ígneas.
- Separación de los componentes de una roca para determinar la cantidad de los diversos constituyentes.
- Concentrados magnéticos de arenas y rocas sedimentarias.
- Separaciones de sulfatos.
- Separación de magnetita de menas complejas de hierros o rocas.
- Ilmenita de la Cromita.
- Monacita y otras tierras raras de la Estauroлита.
- Ilmenita de Tantalita, Columbita, Estauroлита.
- Fraccionamiento de minerales magnéticos.
- Ilmenita-Leucoxeno –Rutilo.
- Polvos de acero inoxidable.
- Diamantes naturales de Granate.
- Fracciones de diamantes sintéticos.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

Introducción

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la calibración del separador magnet-lift, para muestras formadas por un solo mineral, y para muestras de arenas pertenecientes a las Formaciones Isnotú y Betijoque. Los minerales fueron reconocidos inicialmente mediante difracción de rayos X, y con respecto a las muestras de arenas, se efectuó análisis de difracción sobre los separados magnéticos, por períodos de amperajes.

Reconocimiento de minerales por difracción de rayos X.

Para calibrar el separador magnético magnet-lift, se utilizó como base, la misma lista (Ver tabla 4.6) de minerales usadas por Hess en 1959. Estos ejemplares fueron adquiridos en casas especializadas de ventas de minerales, otros fueron proporcionados por el Laboratorio de Difracción de Rayos X, y otros mediante colaboración de Profesores del Departamento de Geología de la UCV.

Los minerales fueron seleccionados previamente mediante sus propiedades ópticas, por observación bajo lupa. Luego fueron triturados en un mortero y tamizados por mallas 60 y 80 respectivamente. A cada separado mineralógico, se le aplicó un reconocimiento por difracción de rayos X.

Se seleccionó la técnica de difracción de rayos X por ser uno de los métodos más confiables para la identificación de minerales. La distancia relativa entre las diferentes crestas es una medida única de la estructura cristalina de los minerales, y la dispersión general es una medida de la distancia comprendida entre los átomos. Como consecuencia, el patrón de difracción es único para un compuesto cristalino dado

(mineral) y su identificación puede hacerse por comparación con conjuntos estándar de espectros. El límite inferior de detección para un mineral es de alrededor de 1 a 10% (dependiendo del mineral) pero usando diversas separaciones en las muestras, pueden obtenerse muestras concentradas en forma tal que los minerales secundarios puedan identificarse debajo de estos límites. En la figura 5.1 se observa un patrón de difracción de rayos X para una mezcla mineral compuesta por Almandino (Granate con Mn y Fe como cationes principales) y cuarzo como mineral accesorio.

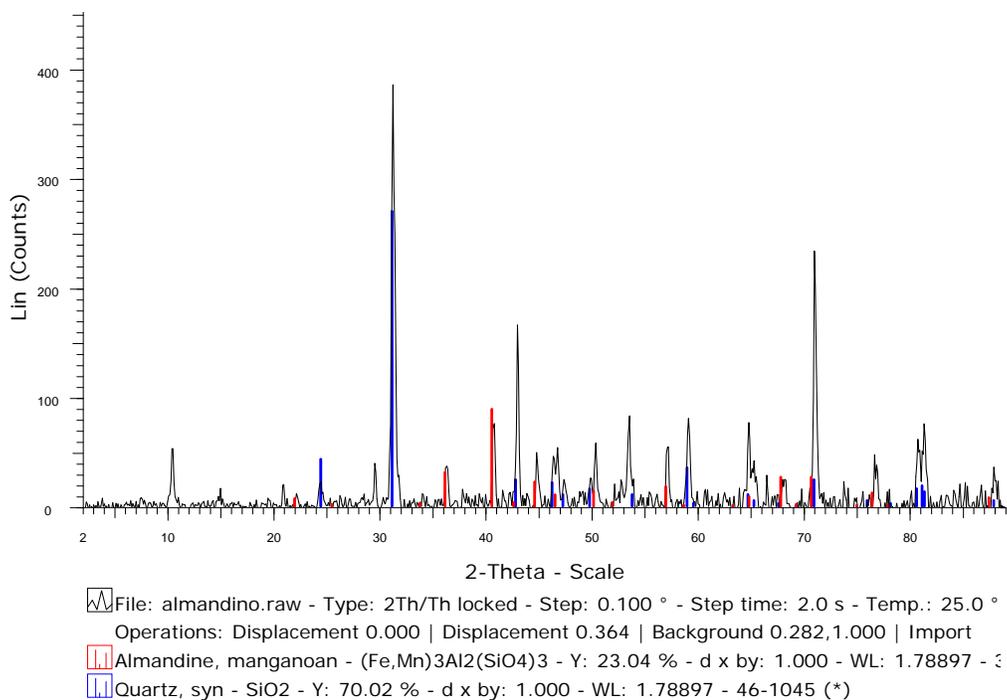


Figura 5.1: Gráfica esquemática de un patrón de difracción por rayos X

A continuación se describe el procedimiento empleado para el reconocimiento de los minerales por medio de la difracción de rayos X:

1. Se tomaron los granos minerales y se trituraron en un pulverizador de bolas de ágata marca FRITSCH.

2. El material obtenido del pulverizador de bolas de ágata es nuevamente triturado en un mortero de ágata hasta obtener un polvo muy fino menor que tamaño limo (1/16-1/256 mm).
3. La fracción obtenida se coloca en el porta muestras, tratando en lo posible de obtener una superficie de irradiación totalmente lisa.
4. La muestra es llevada al difractor de rayos X marca BRUKERS AXS SIEMENS, Modelo D-8 Advance, con fuente de cobalto, para la adquisición del espectro.

Condiciones de adquisición:

Tubo: cobalto ($\lambda = 1,78897$)

Rendija colimadora: V6

Rendija anti dispersión: V6

Velocidad goniómetro: 3°/min.

Voltaje: 35Kv

Amperaje: 30mA

Incremento conteo: 0,1°

Intervalo de barrido: 2° a 89°

5. Los espectros obtenidos se compararon con los espectros indexados en la base de datos de difracción del National Institute of Standard Technology (NIST 1993- 1994).

De estos análisis realizados para el reconocimiento de minerales, se obtuvieron difractogramas como el mostrado en la Figura 5.2, los cuales permitieron seguir el proceso de separación en función de las fases minerales.

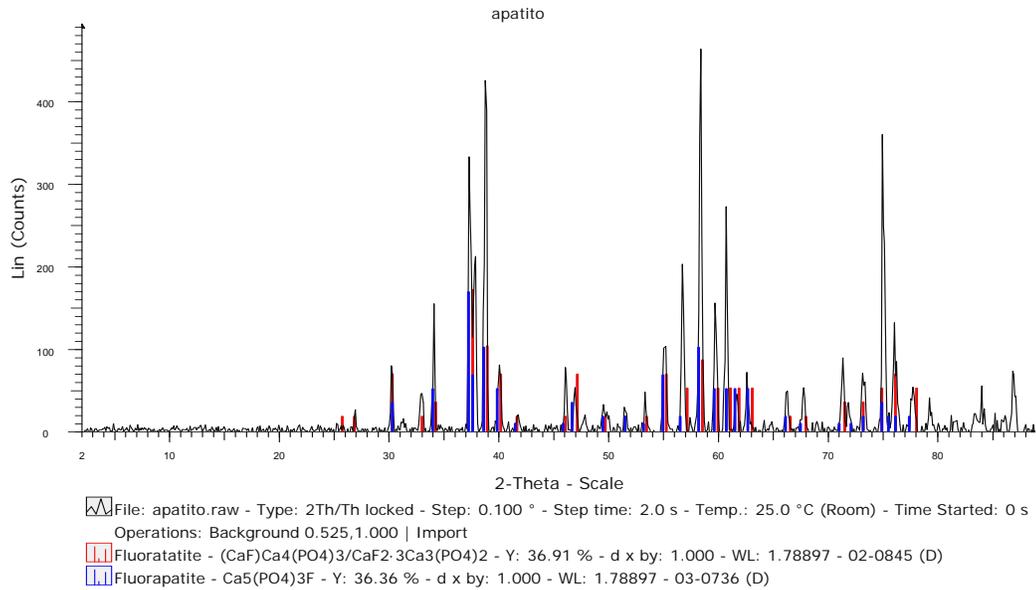


Figura 5.2: Difractograma de minerales.

Calibración del separador magnético con muestras monominerales:

Para calibrar el separador magnet lift, se seleccionaron 100 granos de cada uno de los 17 minerales existentes en la tabla 4.6, de estos fueron excluidos 3, debido a que son muestras micáceas y se perdían en la separación. El tamaño de grano de estos minerales esta entre 60 y 80 mallas. El separador posee varias variables que es necesario tomar en cuenta a la hora de efectuar su calibración, entre estas variables están:

- a) Amperaje
- b) Velocidad del rodillo o rueda
- c) Abertura del Splitter
- d) Separación entre rodillo inducido y bandeja vibratorio.
- e) Tasa de alimentación

Al principio se variaron todas estas variables, y luego en el transcurso de la calibración, debido a su importancia se seleccionaron tres variables: Amperaje, debido a la susceptibilidad magnética de cada mineral, velocidad del rodillo, y la tasa de alimentación.

Esta calibración fue dividida según el tipo de propiedad o respuesta magnética de cada mineral, a continuación se mostrará dos ejemplos de la calibración de cada uno de estos tipos de minerales, haciendo énfasis en los llamados pesados o accesorios, que son los de interés, en el caso de la datación de muestras por huellas de fisión.

Minerales Ferromagnéticos

Se utilizaron aquellos minerales con susceptibilidad magnética mayores a 1, como: la magnetita, pirrotita.

Mineral Magnetita

Se efectuó una corrida del equipo, a diferentes velocidades de la rueda: 5, 10, 20, 30, 40 y 50 rpm y con aperturas del splitter de 10°, 25° y 35° respectivamente. En el caso particular de velocidad 5 rpm y considerando las tres aberturas nombradas anteriormente se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5.1

Tabla 5.1: Resultados de la calibración del mineral magnetita a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.

Magnetita a 5 rpm					
Magnetita a 10°		Magnetita a 25°		Magnetita a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
96,00	0,20	99,00	0,20	100,00	0,20
99,00	0,40	100,00	0,40	100,00	0,40
100,00	0,60	100,00	0,60	100,00	0,60
100,00	0,80	100,00	0,80	100,00	0,80
100,00	1,00	100,00	1,00	100,00	1,00
100,00	1,20	100,00	1,20	100,00	1,20
100,00	1,40	100,00	1,40	100,00	1,40
100,00	1,60	100,00	1,60	100,00	1,60
100,00	1,80	100,00	1,80	100,00	1,80
100,00	2,00	100,00	2,00	100,00	2,00
100,00	2,20	100,00	2,20	100,00	2,20
100,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
100,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
$y = 0,6923x + 98,604$		$y = 0,1429x + 99,714$		$y = 100$	
$R^2 = 0,997$		$R^2 = 0,993$		$R^2 = 1$	

En esta tabla se muestra que debido, a la alta susceptibilidad magnética de la magnetita (3,8-10 SI), con muy poco amperaje, ya logra separarse la mayoría de los granos de este mineral. Sin embargo, es de hacer notar, que a 35° de abertura del splitter se separan la mayor cantidad de granos a muy bajo amperaje, aproximadamente 99% de los granos a 0,2Amp

Las curvas de producción del equipo para este mineral pueden ser apreciadas en la figura 5.3

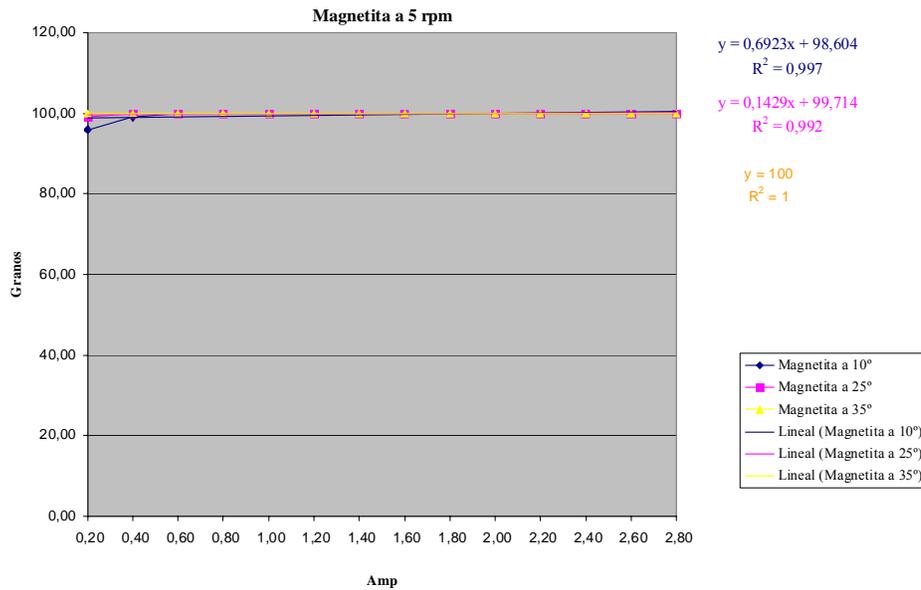


Figura 5.3: Curvas de calibración del mineral magnetita a 5 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

Aumentando la velocidad de la rueda a 50 rpm, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Resultados de la calibración del mineral magnetita a 50 rpm, con aperturas de 10, 25 y 35°.

Magnetita a 50 rpm					
Magnetita a 10°		Magnetita a 25°		Magnetita a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
97,00	0,20	100,00	0,20	100,00	0,20
100,00	0,40	100,00	0,40	100,00	0,40
100,00	0,60	100,00	0,60	100,00	0,60
100,00	0,80	100,00	0,80	100,00	0,80
100,00	1,00	100,00	1,00	100,00	1,00
100,00	1,20	100,00	1,20	100,00	1,20
100,00	1,40	100,00	1,40	100,00	1,40
100,00	1,60	100,00	1,60	100,00	1,60
100,00	1,80	100,00	1,80	100,00	1,80
100,00	2,00	100,00	2,00	100,00	2,00
100,00	2,20	100,00	2,20	100,00	2,20
100,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
100,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
$y = 0,4286x + 99,143$		$y = 100$		$y = 100$	
$R^2 = 0,992$		$R^2 = 1$		$R^2 = 1$	

Básicamente se mantiene la misma tendencia, que en el caso anterior, la diferencia radica, es que para las aberturas 25° y 35° se obtienen los mismos resultados.

Las curvas de producción del equipo para este mineral pueden ser apreciadas en la figura 5.4

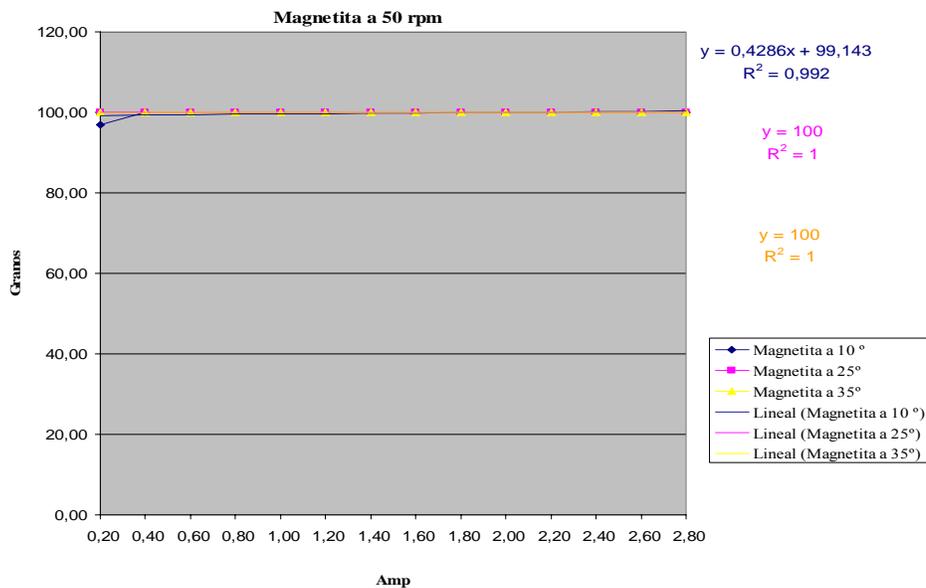


Figura 5.4: Curvas de calibración del mineral magnetita a 50 rpm y aberturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

Mineral Pirrotita

Al calibrar el equipo con pirrotita, a una velocidad de 5 rpm de la rueda, y una apertura del splitter de 10°, 25° y 35° se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.3

Tabla 5.3: Resultados de la calibración del mineral pirrotita a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.

Pirrotita a 5 rpm					
Pirrotita a 10°		Pirrotita a 25°		Pirrotita a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
40,00	0,20	65,00	0,20	90,00	0,20
59,00	0,40	80,00	0,40	96,00	0,40
79,00	0,60	82,00	0,60	100,00	0,60
87,00	0,80	90,00	0,80	100,00	0,80
88,00	1,00	96,00	1,00	100,00	1,00
96,00	1,20	100,00	1,20	100,00	1,20
100,00	1,40	100,00	1,40	100,00	1,40
100,00	1,60	100,00	1,60	100,00	1,60
100,00	1,80	100,00	1,80	100,00	1,80
100,00	2,00	100,00	2,00	100,00	2,00
100,00	2,20	100,00	2,20	100,00	2,20
100,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
100,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
$y = -17,084x^2 + 68,649x + 35,786$		$y = -10,148x^2 + 40,63x + 62,269$		$y = -2,7129x^2 + 10,051x + 91,791$	
$R^2 = 0,9302$		$R^2 = 0,9342$		$R^2 = 0,6624$	

Es de resaltar, que con una abertura de 35°, se separan 90 granos del mineral en comparación con las aberturas de 10° y 25°. Las curvas de producción del equipo para este mineral pueden ser apreciadas en la figura 5.5

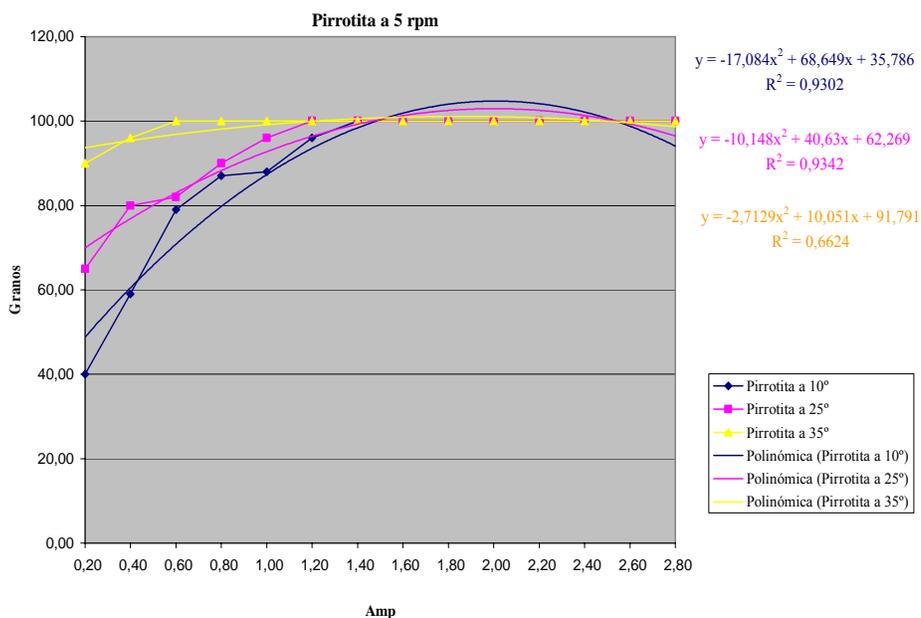


Figura 5.5: Curvas de calibración del mineral pirrotita a 5 rpm y aberturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

Las funciones polinómicas amarilla, rosada y azul corresponden a las aperturas del splitter de 10° 25° y 35° respectivamente, las curvas suavizadas del mismo color, corresponden a los ajustes de regresión polinomial para cada caso, a fin de establecer estadísticamente, cual es la “mejor” curva de calibración para este mineral. Al final de la tabla 5.3 se presentan las ecuaciones de los polinomios ajustados, y el error cuadrático del ajuste. Nótese que en este caso particular, a pesar de que la curva de producción óptima se obtiene con la apertura de 35°, el error cuadrático en este caso es de 0,6624 en comparación con los otros ajustes, esto sólo indica que la curva de producción para 35° no puede ser representada por un polinomio de grado 2. Con respecto a las otras dos curvas, a pesar de que los ajustes son mejores, el número de granos separados en el primer valor de amperaje de 0,2 no es el máximo nivel de producción, lo cual permite aseverar que la inferencia estadística arrojada por estos ajustes es independiente del nivel de producción del equipo.

Aumentando la velocidad de la rueda sucesivamente a 10, 20, 30, 40 y 50 rpm, se obtuvieron resultados similares, sin embargo, para no repetir los mismos análisis sólo se mostrarán los resultados para el caso particular de 50 rpm. En la tabla 5.4 se presentan los resultados de la calibración para las mismas aperturas del splitter consideradas anteriormente y 50 rpm de velocidad de la rueda.

Tabla 5.4: Resultados de la calibración del mineral pirrotita a 50 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.

Pirrotita a 50 rpm					
Pirrotita a 10°		Pirrotita a 25°		Pirrotita a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
67,00	0,20	69,00	0,20	98,00	0,20
74,00	0,40	75,00	0,40	98,00	0,40
80,00	0,60	85,00	0,60	100,00	0,60
86,00	0,80	88,00	0,80	100,00	0,80
96,00	1,00	96,00	1,00	100,00	1,00
99,00	1,20	100,00	1,20	100,00	1,20
100,00	1,40	100,00	1,40	100,00	1,40
100,00	1,60	100,00	1,60	100,00	1,60
100,00	1,80	100,00	1,80	100,00	1,80
100,00	2,00	100,00	2,00	100,00	2,00
100,00	2,20	100,00	2,20	100,00	2,20
100,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
100,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
$y = -10,234x^2 + 41,865x + 59,879$		$y = -9,6841x^2 + 39,129x + 63,176$		$y = -0,6868x^2 + 2,5879x + 97,824$	
$R^2 = 0,9588$		$R^2 = 0,9515$		$R^2 = 0,6897$	

En esta tabla se aprecia un comportamiento similar a la calibración para el mismo mineral a 5 rpm de velocidad de la rueda, al realizar los ajustes de regresión polinomial, se obtienen los polinomios mostrados al final de esta tabla, los errores cuadráticos para las aberturas de 10° y 25° son similares. El error cuadrático para la abertura de 35° es de 0,6897 a pesar de que es en esta abertura cuando se consigue los mejores niveles de producción del equipo, sin embargo a fin de estudiar el comportamiento de estos ajustes, se graficaron las curvas de calibración y los ajustes polinomiales para este caso, los cuales son presentados en la figura 5.6

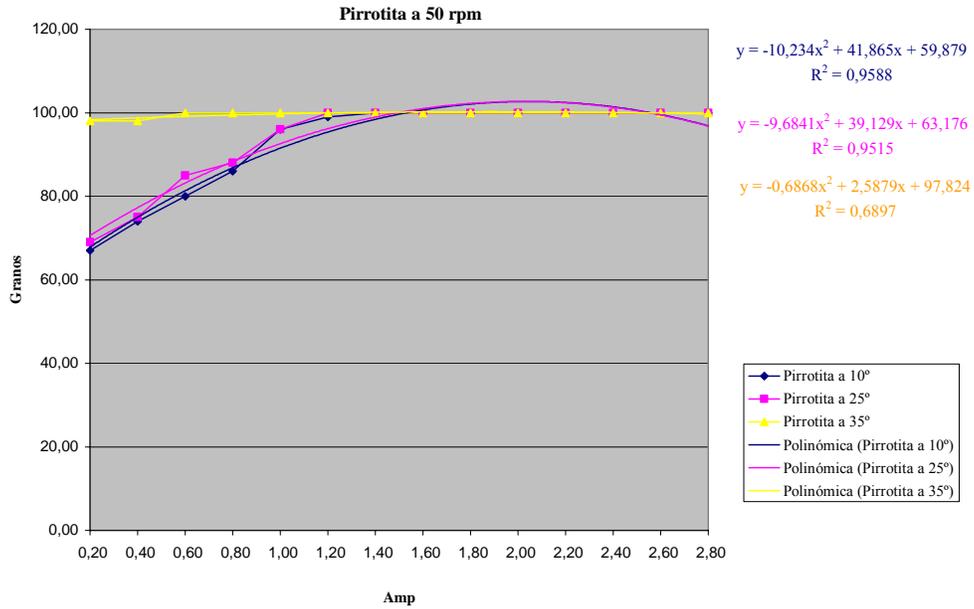


Figura 5.6: Curvas de calibración del mineral pirrotita a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

Aquí se aprecia, que la curva de calibración para 35° de apertura del splitter, se comporta más como una función lineal que como un polinomio, por tal razón la aseveración estadística en este caso no es significativa.

Minerales Paramagnéticos

Entre ellos: Hornblenda, Turmalina, Diópsido y Granate. Aquí solo se mostrarán los resultados para el granate y la Hornblenda, dado que ejemplifican de manera clara el comportamiento de este grupo de minerales.

Mineral Granate

Los resultados para la separación del granate son mostrados en la tabla 5.5

Tabla 5.5: Resultados de la calibración del mineral granate a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.

Granate a 5 rpm					
Granate a 10°		Granate a 25°		Granate a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
4,00	0,20	-	0,20	25,00	0,20
7,00	0,40	7,00	0,40	53,00	0,40
58,00	0,60	64,00	0,60	87,00	0,60
75,00	0,80	89,00	0,80	87,00	0,80
76,00	1,00	95,00	1,00	90,00	1,00
86,00	1,20	95,00	1,20	91,00	1,20
88,00	1,40	96,00	1,40	93,00	1,40
88,00	1,60	98,00	1,60	96,00	1,60
89,00	1,80	99,00	1,80	96,00	1,80
89,00	2,00	100,00	2,00	99,00	2,00
89,00	2,20	100,00	2,20	100,00	2,20
95,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
98,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
$y = 15,924x^3 - 93,511x^2 + 183,81x - 30$		$y = 18,617x^3 - 113,75x^2 + 223,15x - 40$		$y = 18,95x^3 - 104,66x^2 + 183,89x - 5$	
$R^2 = 0,9441$		$R^2 = 0,9362$		$R^2 = 0,9274$	

En esta tabla se muestran los resultados de la separación de granate con una velocidad de la rueda de 5 rpm, para una abertura del splitter de 10, 25 y 35° respectivamente, puede observarse que la mayor cantidad de granos de granate comienzan a ser separados con una abertura del splitter de 35° y un amperaje de 0,60, a pesar de que no existe mucha diferencia con respecto a la abertura de 25° pues hay una ligera compensación en la producción, es indistinto en el caso de este mineral cual de las dos aperturas utilizar, en cambio a 10° la tasa de producción del equipo es muy lenta en comparación con las anteriores. Por tal razón, se realizó las curvas de calibración del equipo mostrada en la Figura 5.7, donde se observa que para 35° el resultado es óptimo.

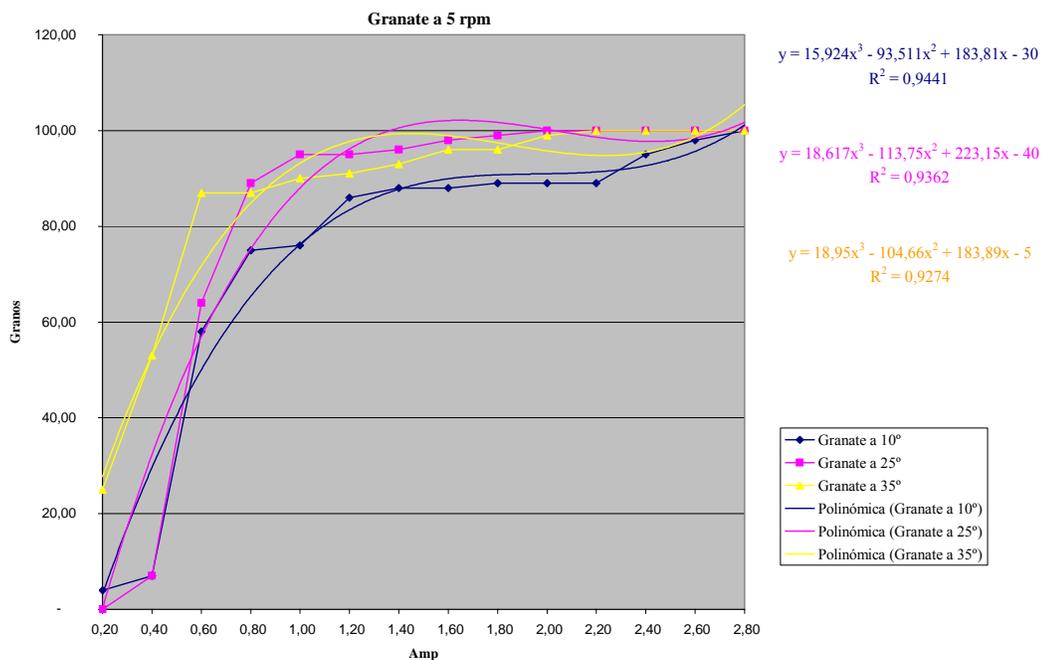


Figura 5.7: Curvas de calibración del mineral granate a 5 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

En este gráfico las curvas con puntos de color rosado, azul y amarilla corresponden a una abertura del splitter de 10°, 25° y 35°, note que la curva amarilla alcanza un punto de inflexión o “quiebre” con mayores valores de granos separados, que las curvas azul y rosada respectivamente, esto significa, que el equipo tiene una mayor tasa de producción en la separación de granate con esa abertura. Con el fin de validar esto, se efectuaron análisis de regresión no lineal, (polinomial de tercer grado), a cada una de las curvas de producción del equipo según la abertura del splitter, estas curvas son del mismo color que las ajustadas.

El polinomio ajustado, junto con el error cuadrático es mostrado al final de la tabla 5.5 para cada abertura. El error cuadrático para 35° de splitter es el más pequeño ya que es de 0,9274 en contraste con 0,9362 y 0,9441 de las aberturas 25° y 10° respectivamente. Mientras mas cercano a 1, es mejor el ajuste polinomial, sin embargo, debe observarse el ajuste a principios de aquella curva donde exista mayor producción con poco amperaje. En este caso, la mejor curva es la correspondiente a

los 35° de abertura, a pesar de que el error esta lejos de 1, en comparación con los demás errores, el ajuste al principio de la curva es mejor, que los otros ajustes. En esta tabla, también se muestran los valores de convergencia, es decir, aquellos valores en los cuales se alcanza el punto de inflexión de la curva antes de alcanzar el nivel o línea estable de producción.

Al aumentar la velocidad de la rueda, se mantiene esta misma conclusión, la diferencia radica en que la apertura del splitter se va haciendo cada vez menos significativa.

En la tabla 5.6 se muestran los resultados de la calibración al aumentar la velocidad de la rueda a 50 rpm. Puede apreciarse en esta tabla que a partir de un amperaje de 0,60 se separan 74 granos de granate, en contraste con las aperturas de 10 y 25° respectivamente.

Tabla 5.6: Resultados de la calibración del mineral granate a 50 rpm, con aperturas de 10, 25 y 35°.

Granate a 50 rpm					
Granate a 10°		Granate a 25°		Granate a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
1,00	0,20	-	0,20	22,00	0,20
16,00	0,40	7,00	0,40	37,00	0,40
58,00	0,60	54,00	0,60	74,00	0,60
81,00	0,80	82,00	0,80	86,00	0,80
88,00	1,00	91,00	1,00	92,00	1,00
95,00	1,20	94,00	1,20	94,00	1,20
99,00	1,40	97,00	1,40	96,00	1,40
100,00	1,60	99,00	1,60	99,00	1,60
100,00	1,80	100,00	1,80	100,00	1,80
100,00	2,00	100,00	2,00	100,00	2,00
100,00	2,20	100,00	2,20	100,00	2,20
100,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
100,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
Y = 19,171 x ³ - 117,48 x ² + 231,52x - 46,067		y = 19,749 x ³ - 121,29 x ² + 239,79x - 52,077		y = 16,122 x ³ - 95,849 x ² + 183,07x - 12,493	
R ² = 0,9802		R ² = 0,963		R ² = 0,9723	

Al realizar los análisis de regresión polinomial a las curvas de calibración de la figura 5.8, se observa que los errores cuadráticos son muy parecidos entre estas, debido a la cercanía de las curvas entre sí. La mejor calibración en este caso, la da aquella curva que con un mínimo amperaje produzca la mayor cantidad de granos separados como en el caso de la curva amarilla correspondiente a una apertura de 35°.

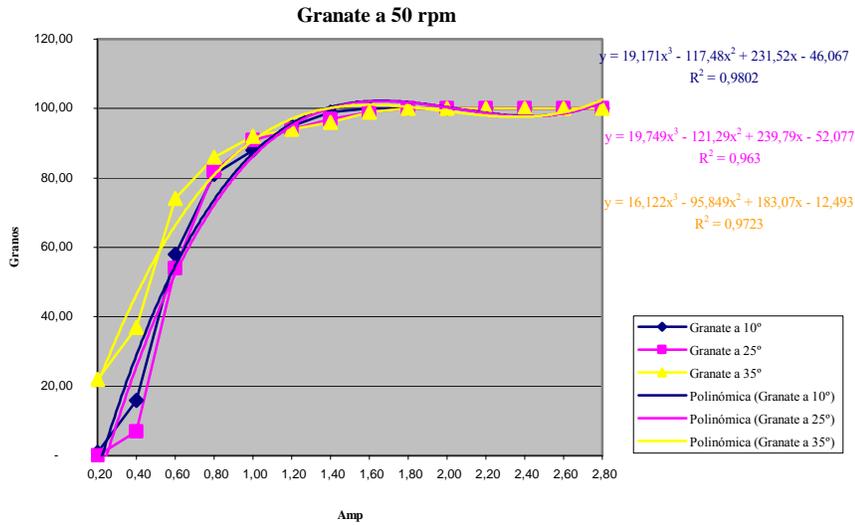


Figura 5.8: Curvas de calibración del mineral granate a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

Mineral Hornblenda

A continuación en la tabla 5.7 se presentan los resultados de la calibración para el mineral hornblenda, con una velocidad de la rueda de 5 rpm, y las mismas aperturas del splitter consideradas anteriormente. En esta tabla se muestra resultado que el valor máximo de producción del equipo a poco amperaje en color amarillo, es alcanzado con una apertura de 35° y 0,2 Amp. Al hacer los análisis de regresión polinomial, cuyas expresiones se encuentran al final de esta tabla, se encuentran que los errores cuadráticos están muy cercanos entre sí, a pesar de que para 35° se obtienen valores óptimos, el error cuadrático es afectado un poco por fenómenos de dispersión numérica.

Tabla 5.7: Resultados de la calibración del mineral hornblenda a 5 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.

Hornblenda a 5 rpm					
Hornblenda a 10°		Hornblenda a 25°		Hornblenda a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
7,00	0,20	15,00	0,20	56,00	0,20
26,00	0,40	30,00	0,40	72,00	0,40
57,00	0,60	59,00	0,60	77,00	0,60
66,00	0,80	68,00	0,80	88,00	0,80
76,00	1,00	93,00	1,00	95,00	1,00
92,00	1,20	95,00	1,20	98,00	1,20
95,00	1,40	97,00	1,40	99,00	1,40
98,00	1,60	99,00	1,60	100,00	1,60
99,00	1,80	100,00	1,80	100,00	1,80
100,00	2,00	100,00	2,00	100,00	2,00
100,00	2,20	100,00	2,20	100,00	2,20
100,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
100,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
$Y = 10,974 x^3 - 75,24 x^2 + 169,58x - 25,59$		$y = 12,93 x^3 - 84,128 x^2 + 177,78x - 21,579$		$y = 7,0123 x^3 - 44,313 x^2 + 90,677x + 40,1$	
$R^2 = 0,9927$		$R^2 = 0,9838$		$R^2 = 0,9921$	

Las curvas de calibración y los ajustes polinomiales para 5 rpm, son mostrados en la figura 5.9

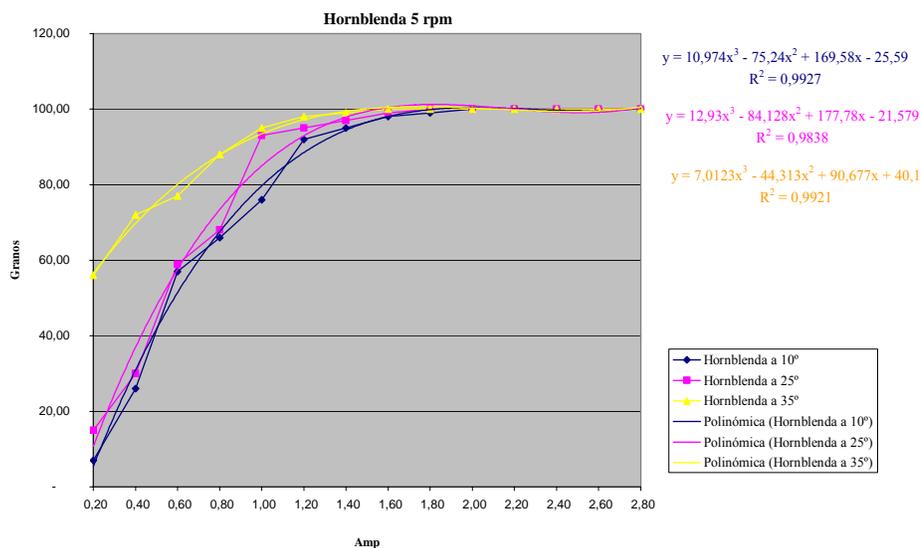


Figura 5.9: Curvas de calibración del mineral hornblenda a 5 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

Análogamente que en las figuras anteriores, las poligonales amarillas, rosada y azul corresponden a aberturas de 35, 25 y 10° respectivamente, mientras que las curvas suavizadas del mismo color corresponden a los ajustes polinomiales para esas poligonales, nótese que todas las curvas alcanzan en un intervalo de tiempo distinto, la línea de estabilidad de producción, siendo, la curva amarilla correspondiente a 35° la primera en acercarse a dicha línea.

Al aumentar la velocidad de la rueda a 50 rpm, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.8

Tabla 5.8: Resultados de la calibración del mineral hornblenda a 50 rpm, con aberturas de 10, 25 y 35°.

Hornblenda a 50 rpm					
Hornblenda a 10°		Hornblenda a 25°		Hornblenda a 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
10,00	0,20	15,00	0,20	55,00	0,20
13,00	0,40	27,00	0,40	60,00	0,40
17,00	0,60	34,00	0,60	66,00	0,60
28,00	0,80	40,00	0,80	75,00	0,80
34,00	1,00	60,00	1,00	81,00	1,00
59,00	1,20	81,00	1,20	86,00	1,20
69,00	1,40	83,00	1,40	89,00	1,40
74,00	1,60	88,00	1,60	92,00	1,60
86,00	1,80	92,00	1,80	95,00	1,80
88,00	2,00	95,00	2,00	100,00	2,00
91,00	2,20	99,00	2,20	100,00	2,20
95,00	2,40	100,00	2,40	100,00	2,40
99,00	2,60	100,00	2,60	100,00	2,60
100,00	2,80	100,00	2,80	100,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
Y = 39,754x + 2		y = -14,432 x ² + 76,519x		y = -8,6367 x ² + 43,833x + 44,94	
R ² = 0,9407		R ² = 0,9739		R ² = 0,995	

Estos resultados son mostrados gráficamente en la figura 5.10

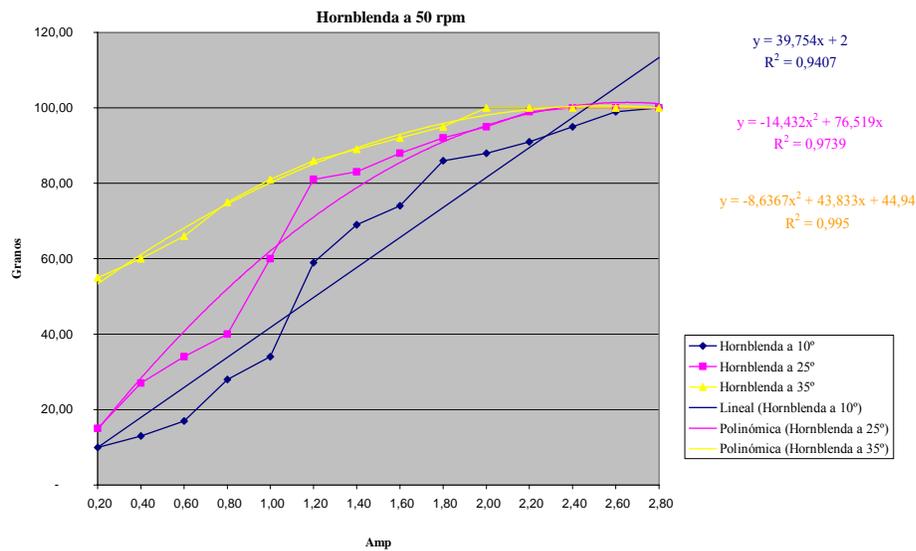


Figura 5.10: Curvas de calibración del mineral Hornblenda a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°.

En esta gráfica se mantiene la misma tendencia, siendo la de 35° de abertura donde se obtienen mejores resultados, y estadísticamente la de menor error cuadrático, mientras que las otras poligonales tienen quiebres que indican fluctuaciones en el nivel de producción con esos ángulos de aperturas.

Minerales Diamagnéticos

Entre estos minerales se tienen: apatito, topacio, corindón y fluorita. Aquí se mostrarán los resultados para el apatito y el corindón.

Mineral Apatito:

Para calibrar el equipo con este mineral se utilizaron dos muestras de apatitos, uno azul y otro de color marrón ambos de la localidad de Ontario, Canadá. Motivado a que en los casos anteriores las mejores tasas de producción del equipo fueron con la abertura de 35°, se utilizó una abertura de 33° para los minerales de muy baja susceptibilidad magnética ($X_m = 0$), como en el caso del apatito, se utilizaron

diferentes velocidades de la rueda, los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 5.9

Tabla 5.9: Resultados de la calibración del mineral apatito a diferentes rpm y una abertura de 33°.

Apatito a 33°											
5 rpm		10 rpm		20 rpm		30 rpm		40 rpm		50 rpm	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
17,00	0,20	12,00	0,20	11,00	0,20	11,00	0,20	12,00	0,20	11,00	0,20
14,00	0,40	12,00	0,40	14,00	0,40	13,00	0,40	12,00	0,40	15,00	0,40
14,00	0,60	12,00	0,60	16,00	0,60	14,00	0,60	12,00	0,60	15,00	0,60
13,00	0,80	15,00	0,80	17,00	0,80	14,00	0,80	13,00	0,80	17,00	0,80
13,00	1,00	20,00	1,00	19,00	1,00	14,00	1,00	11,00	1,00	20,00	1,00
14,00	1,20	20,00	1,20	17,00	1,20	14,00	1,20	16,00	1,20	17,00	1,20
14,00	1,40	20,00	1,40	15,00	1,40	16,00	1,40	18,00	1,40	18,00	1,40
15,00	1,60	18,00	1,60	15,00	1,60	20,00	1,60	19,00	1,60	18,00	1,60
16,00	1,80	17,00	1,80	13,00	1,80	20,00	1,80	22,00	1,80	18,00	1,80
18,00	2,00	20,00	2,00	13,00	2,00	17,00	2,00	22,00	2,00	18,00	2,00
16,00	2,20	22,00	2,20	13,00	2,20	15,00	2,20	20,00	2,20	17,00	2,20
19,00	2,40	23,00	2,40	20,00	2,40	18,00	2,40	18,00	2,40	16,00	2,40
20,00	2,60	24,00	2,60	29,00	2,60	21,00	2,60	16,00	2,60	16,00	2,60
20,00	2,80	24,00	2,80	29,00	2,80	23,00	2,80	16,00	2,80	17,00	2,80

Curva de Ajuste	Curva de Ajuste	Curva de Ajuste	Curva de Ajuste	Curva de Ajuste	Curva de Ajuste
$y = 2,2308x + 12,582$	$y = 3,1319x + 12,374$	$y = 3,3695x + 11$	$y = 4,6703x + 11,495$	$y = 3,5604x + 11,088$	$y = 2,5165x + 13,582$
$R^2 = 0,5596$	$R^2 = 0,5162$	$R^2 = 0,4309$	$R^2 = 0,8151$	$R^2 = 0,7236$	$R^2 = 0,7662$

Para tener una idea más clara se graficaron estos resultados, los cuales son presentados en la figura 5.11

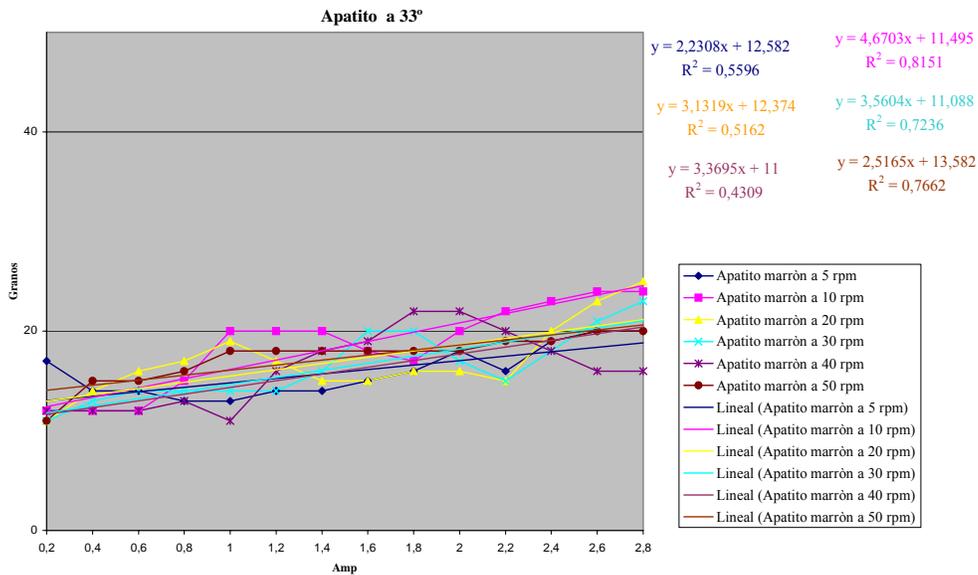


Figura 5.11: Curvas de calibración del mineral apatito a diferentes rpm y a una abertura de 33°.

Gráficamente se puede observar, que es indiferente la velocidad de la rueda que se utilice, ya que este mineral posee muy poca susceptibilidad lo que hace que sea un poco difícil para el equipo poder separarlo completamente.

Mineral Corindón

En contraste, con el mineral apatito, el corindón tuvo una mejor respuesta magnética. En la tabla del corindón (tabla 5.10) se puede observar un comportamiento un poco caótico ya que a primera vista no se sigue ningún patrón como es el caso de la separación a 50 rpm. Pero esto es de esperarse para un mineral diamagnético. Si nos referimos a la grafica 5.12 podemos notar cierta influencia en algunos casos por parte del amperaje y una disminución en la producción al aumentar la rapidez de la rueda pero este comportamiento no está muy marcado.

Tabla 5.10: Resultados de la calibración del mineral corindón a diferentes rpm y una abertura de 33°

Corindón a 33°											
5 rpm		10 rpm		20 rpm		30 rpm		40 rpm		50 rpm	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
11,00	0,20	13,00	0,20	15,00	0,20	20,00	0,20	14,00	0,20	15,00	0,20
13,00	0,40	15,00	0,40	18,00	0,40	20,00	0,40	20,00	0,40	20,00	0,40
15,00	0,60	20,00	0,60	18,00	0,60	18,00	0,60	20,00	0,60	20,00	0,60
15,00	0,80	23,00	0,80	18,00	0,80	18,00	0,80	21,00	0,80	21,00	0,80
15,00	1,00	23,00	1,00	22,00	1,00	24,00	1,00	22,00	1,00	22,00	1,00
16,00	1,20	25,00	1,20	27,00	1,20	24,00	1,20	23,00	1,20	22,00	1,20
20,00	1,40	27,00	1,40	30,00	1,40	25,00	1,40	25,00	1,40	23,00	1,40
20,00	1,60	33,00	1,60	34,00	1,60	27,00	1,60	29,00	1,60	23,00	1,60
23,00	1,80	44,00	1,80	34,00	1,80	29,00	1,80	33,00	1,80	24,00	1,80
35,00	2,00	52,00	2,00	34,00	2,00	31,00	2,00	34,00	2,00	27,00	2,00
53,00	2,20	60,00	2,20	46,00	2,20	39,00	2,20	34,00	2,20	30,00	2,20
67,00	2,40	66,00	2,40	53,00	2,40	47,00	2,40	35,00	2,40	30,00	2,40
74,00	2,60	70,00	2,60	62,00	2,60	60,00	2,60	39,00	2,60	31,00	2,60
85,00	2,80	89,00	2,80	70,00	2,80	72,00	2,80	45,00	2,80	31,00	2,80
Ajuste de la curva $y = 17,891x^2 - 26,334x + 20,615$ $R^2 = 0,9725$		Ajuste de la curva $y = 27,187x - 0,7802$ $R^2 = 0,9199$		Ajuste de la curva $y = 19,725x + 4,7692$ $R^2 = 0,903$		Ajuste de la curva $y = 12,191x^2 - 19,254x + 25,956$ $R^2 = 0,9646$		Ajuste de la curva $y = 10,242x + 12,78$ $R^2 = 0,9548$		Ajuste de la curva $y = 5,6374x + 15,758$ $R^2 = 0,9318$	

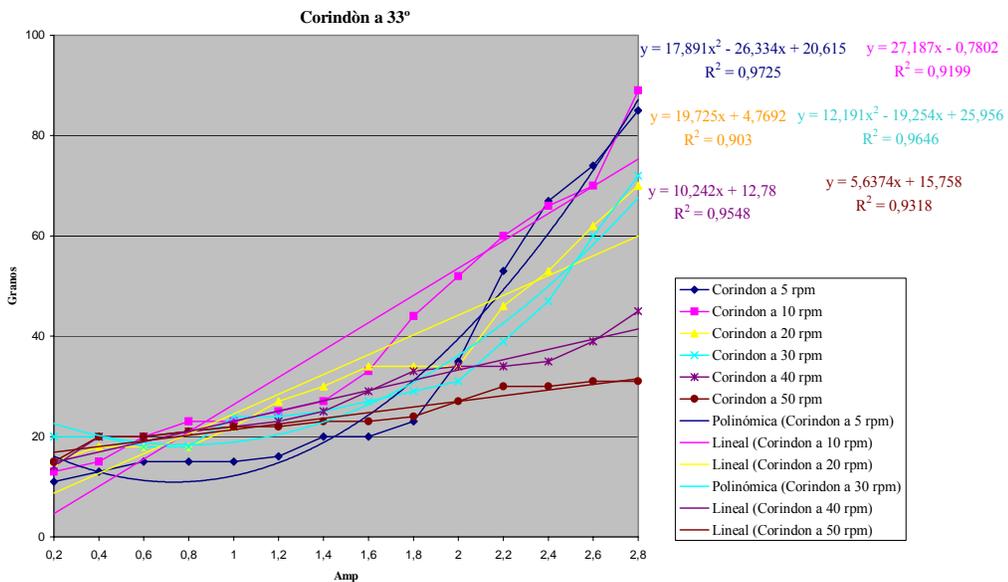


Figura 5.12 curva de calibración del mineral corindón a diferentes rpm a una aberturas de 33°.

Calibración para muestras formadas por dos minerales

Con la finalidad de comprobar los parámetros de calibración obtenidos en la calibración monomineral, se procedió a mezclar aquellos minerales que podían discriminarse fácilmente según sus propiedades ópticas. En la tabla 5.11 se presentan los resultados obtenidos para el caso de la mezcla de Esfena con Diopsido.

Tabla 5.11: Resultados de la separación de la mezcla esfena-diopsido a 50 rpm y aberturas de 10°, 25° y 35°.

Esfena mezclada con Diopsido a 50 rpm					
10°		25°		35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
0,00	0,20	0,00	0,20	33,00	0,20
0,00	0,40	0,00	0,40	36,00	0,40
0,00	0,60	2,00	0,60	36,00	0,60
3,00	0,80	3,00	0,80	37,00	0,80
3,00	1,00	8,00	1,00	42,00	1,00
16,00	1,20	11,00	1,20	50,00	1,20
19,00	1,40	14,00	1,40	57,00	1,40
24,00	1,60	20,00	1,60	58,00	1,60
29,00	1,80	26,00	1,80	61,00	1,80
37,00	2,00	33,00	2,00	68,00	2,00
59,00	2,20	42,00	2,20	69,00	2,20
61,00	2,40	57,00	2,40	70,00	2,40
70,00	2,60	65,00	2,60	75,00	2,60
73,00	2,80	78,00	2,80	89,00	2,80
Curva de Ajuste		Curva de Ajuste		Curva de Ajuste	
$y = 31,582x - 19,231$		$y = 29,374x - 18,418$		$y = 20,341x + 25,275$	
$R^2 = 0,9296$		$R^2 = 0,9051$		$R^2 = 0,9628$	

En esta tabla se aprecia, un comportamiento similar a la separación de muestras formadas por un solo mineral, siendo la abertura de 35°, donde existió mayor producción de granos de esfenas. Estos se muestran la figura 5.13

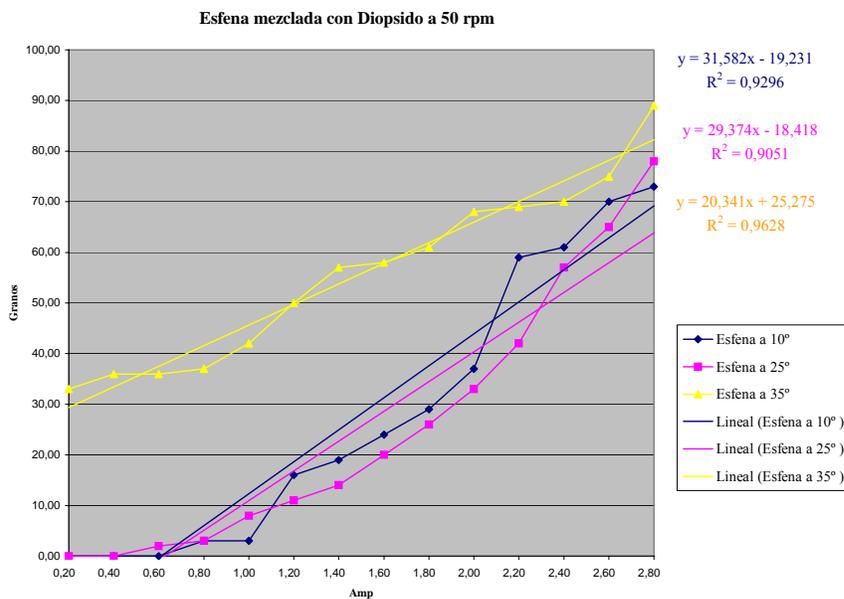


Figura 5.13: Curvas de calibración del mineral esfena mezclada con diopsido a 50 rpm y aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°

Los resultados finales de la calibración del equipo con los 17 minerales son resumidos en la tabla 5.12

Tabla 5.12: Valores óptimos para la separación de minerales pesados comunes en rocas sedimentarias ordenados según su susceptibilidad magnética en el separador magnet-lift.

<i>Mineral</i>	<i>Respuesta magnética</i>	<i>R.P.M</i>	<i>Abertura del Splitter</i>	<i>Amperaje Experimental</i>	<i>Amperaje Por ajuste de curva</i>
Magnetita	<i>Ferromagnético</i>	5	25°	0,2	0,2
Pirrotita	<i>Ferromagnético</i>	5	25°	0,4	0,6
Augita	<i>Paramagnético</i>	5	35°	0,6	1,03
Granate	<i>Paramagnético</i>	40	35°	0,6	1,08
Hornblenda	<i>Paramagnético</i>	5	35°	0,8	1,48
Estauroлита	<i>Paramagnético</i>	10	35°	0,8	1,49
Turmalina	<i>Paramagnético</i>	20	35°	1,40	1,77
Esfena	<i>Paramagnético</i>	5	35°	1,40	1,80
Diopsido	<i>Paramagnético</i>	20	35°	1,60	2,70
Corindón	<i>Diamagnético</i>	10	33°	1,20	2,50
Apatito	<i>Diamagnético</i>	10	33°	1,20	> 2,80
Topacio	<i>Diamagnético</i>	20	33°	2,20	> 2,80
Cianita	<i>Diamagnético</i>	10	33°	2,20	> 2,80
Anhidrita	<i>Diamagnético</i>	40	33°	2,20	> 2,80
Berilo	<i>Diamagnético</i>	5	33°	2,20	> 2,80
Pirita	<i>Diamagnético</i>	20	33°	2,20	> 2,80
Fluorita	<i>Diamagnético</i>	20	33°	2,20	> 2,80

Para separar minerales se recomienda empezar por los ferromagnéticos ya que estos se separan con poca intensidad (0,2- 0,6) Amp, simplemente con un imán de mano. Después se procede a separar los paramagnéticos según los rangos sugeridos para estos en la tabla 5.12, los minerales resultantes después de estos procedimientos serán diamagnéticos para estos minerales se recomienda una depuración mediante otro tipo de separación posterior a la magnética, como por ejemplo separación por densidades, y separación por centrifugas magnéticas como el Magstream existente en el laboratorio de Termocronología, el cual separa por gravedad.

En cuanto a los minerales diamagnéticos lo más recomendable es depurarlos visualmente al finalizar todos los procedimientos de separación.

Aplicación de estos resultados a arenas de las Formaciones Isnotú y Betijoque del Estado Trujillo:

Los resultados obtenidos anteriormente fueron aplicados a un separado de minerales pesados separados previamente en la mesa Wilfley y tamizados entre 60 y 80 de malla. A cada fracción magnética saliente del separador según los diversos amperajes, se le aplicó un reconocimiento por difracción de rayos X, con la finalidad de determinar los minerales que fueron separados.

En la figura 5.14 se aprecia el separado de minerales magnéticos a 0.8 Amp, y en la figura 5.15, se muestran los resultados obtenidos del análisis de difracción a esta muestra:

Objetivo:
10/0,25X

Ocular:
12,5

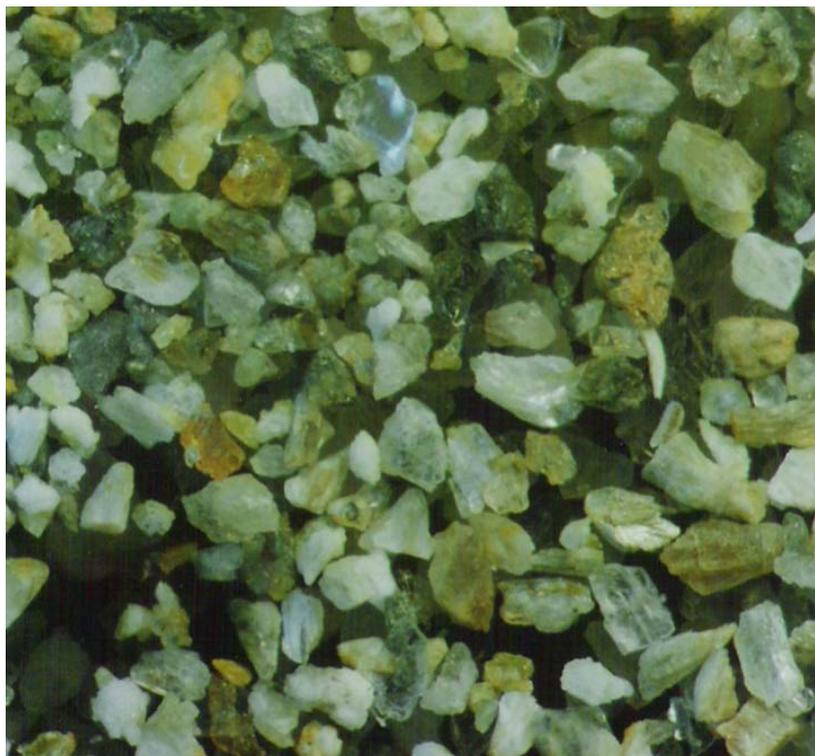


Figura 5.14: Imagen de la separación de minerales magnéticos a 0,8Amp

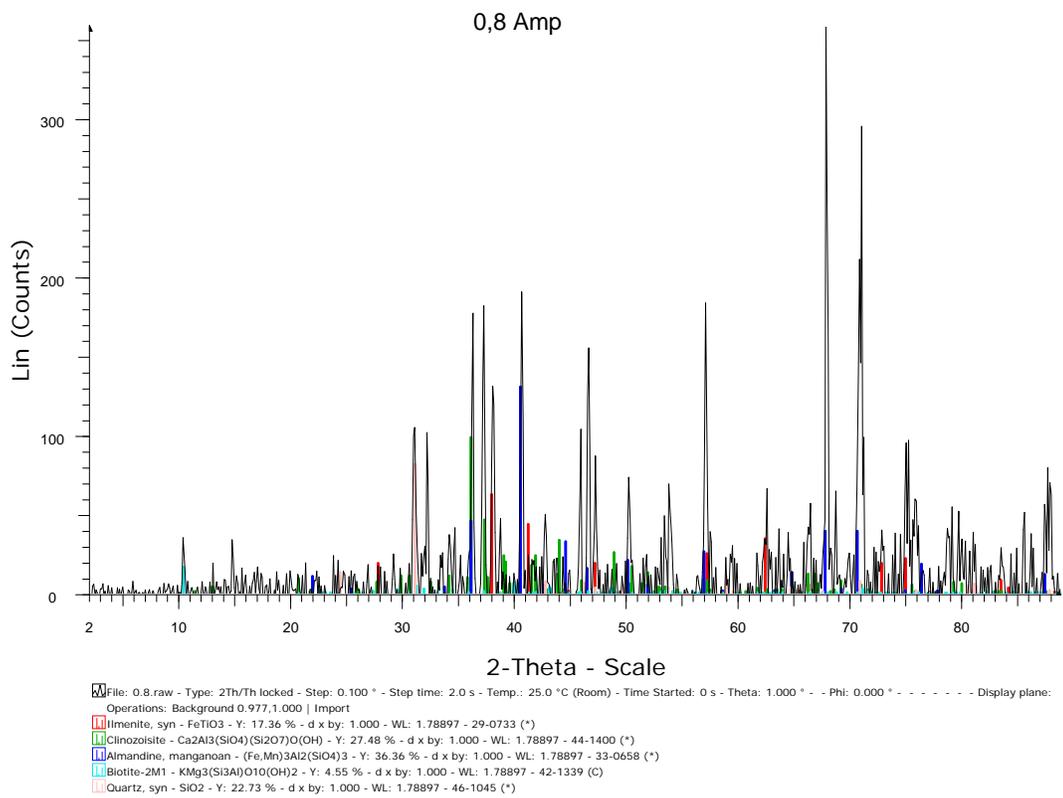


Figura 5.15: Difractograma generado para la muestra de arenas a 0,8 Amp

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el separador magnético magnet-lift, es posible obtener grandes cantidades de minerales pesados pertenecientes a rocas sedimentarias en muy poco tiempo en comparación con el separador Frantz lo cual optimiza el proceso de concentración de minerales con la finalidad de fechar eventos tectotérmicos por el método de huellas de fisión.

Los resultados permiten concluir que a mayor velocidad de la rueda, la variable apertura del splitter no afecta para nada el proceso de separación, esto puede ser el resultado de los efectos de la aceleración centrípeta de la rueda sobre el campo magnético inducido del separador. La condición ideal del equipo en la separación de minerales magnéticos, es una abertura del splitter de 35° y 35 rpm de velocidad de la rueda.

Para muestras no magnéticas o poco magnéticas la producción del equipo es caótica, como en el caso del apatito, por lo cual, se recomienda comenzar la separación de los minerales más magnéticos y posteriormente ir incrementado el campo magnético para aquellos con poca susceptibilidad magnética. En el caso del apatito, este aparecerá en la fracción magnética a muy altos amperajes lo cual coincide con los resultados obtenidos por Hess en 1959 para el separador Frantz. El tamaño de grano es un factor muy importante al momento de concentrar minerales magnéticos con el separador magnet-lift, para este equipo se recomienda un tamaño de grano entre malla 16 y malla 140, para trabajar con tamaños de granos más pequeños, es necesario a futuro modificar el carril vibratorio del equipo.

Los ajustes de regresión lineal y polinomial fueron realizados en esta investigación con el propósito de determinar si era posible estimar parámetros de la separación magnética como: amperaje óptimo, cantidad de muestra entre otros. A fin de modelar matemáticamente y estadísticamente este fenómeno. Sin

embargo, la mayoría de los parámetros obtenidos se aleja mucho de la realidad, lo que claramente indica que es necesario procesar una mayor cantidad de muestra para poder definir bien las tendencias en caso de que existan. Además de esto, también permite concluir que detrás de la teoría de magnetización en rocas, hay otros problemas subyacentes.

El principal aporte de este trabajo fue el de aprovechar al máximo el separador magnético magnet-lift para la preparación de muestras a fechar por el método de huellas de fisión. Este equipo es el único de su tipo en Latinoamérica, razón por la cual al conocer sus condiciones óptimas de trabajo, podría ser utilizado en otras aplicaciones industriales, y al combinar este con el separador centrífugo magnético Magstream se acelerarían aun más los procesos de depuración de muestras. Dándole así al laboratorio de termocronología de la UCV Nuevas herramientas que permiten la actualización de esta casa de estudio.

REFERENCIAS

- Berry, E. W., (1921) Tertiary fossil plants from Venezuela. U.S. Nat. Mus., Proc., 59(2388): p.553-579.
- B. H. Flinter (1959) The Magnetic Separation of some alluvial minerals in Malaya. The American Mineralogist, Vol 44, July- August.
- Carpco (1996) Operating Instructions, High-Intensity Lift-Type. Magnetic Separator, Model MLH (13) 111-5. Carpco, Inc. Jacksonville, Florida U.S.A.
- Chiquito Daniel, A (1999) Disminución por Métodos Magnéticos de los niveles de Hierro en arenas silíceas provenientes de las arenas del pozote, Tinaquillo, Estado Cojedes. 143 p.
- Coronado Y., y Rey, J. (2003) Aplicación del Método de Huellas de Fisión Basados en la Técnica del Detector Externo en Apatitos Detríticos de las Areniscas Pertencientes a la Formaciones Trujillo y Misoa aflorantes en la Quebrada Albarico al NO del Edo. Lara. Escuela de Geología Minas y Geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- Dobrin, M. (1961) Introducción a la Prospección Geofísica. Ediciones Omega, S.A – Barcelona. 473 p.
- E. S. Twitchwell (1968) High Intensity Magnetic Separation, Miner. Process, p. 19-28.
- Garner, A. H., (1926) Suggested nomenclature and correlation of the geological formations in Venezuela, Amer. Inst. Min. and Met. Eng., Trans., Petrol. Develop. and Techn in 1925: 677-684

- González de Juana, (1980) Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas, Caracas, Foninves, tomo I y II, 1031 p.
- H. H. Hess, (1959) "Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator." Pamphlet published by S.G. Frantz Co., Inc., 87 p.
- Hurlbut, Dana, (1956) Manual De Mineralogía. 16° Edición. Barcelona, Editorial Reverté, 524 p.
- J. A. Fleming (1939) Physics of the Earth-VIII, Terrestrial Magnetism and Electricity Editorial McGraw-Hill Book Company, Inc. New York and London. 779 p.
- J. E. Forcica y R. W. Salmi (1965) "Primary Magnetic Separador Specifications," Trans.AIME/SME, p. 232, 339-345.
- J. E. Lawver y D. M. Hopstock (1974) "Wet Magnetic Separation of Weakly," Miner. Sci. Eng., N° 6, p.154-172.
- J. I. Garver (2004) Fission-Track Laboratory Procedures at union college. PDF document. <http://zircon.geology.union.edu/FT/Handbook>
- Kelly & Spottiswood, (1990). Introducción al Procesamiento de Minerales. Primera edición, México. Editorial Limusa. 530 p.
- Kuyl, O. P., J. Muller y H. Th. Waterbolk, (1955) The application of palynology to oil geology with reference to western Venezuela. Geol. en Mijnb., New Ser., 17(3): 49-76
- Liddle, R. A., (1946) The geology of Venezuela and Trinidad. 2nd. Ed., Paleont. Res. Inst., Ithaca, N. Y., 890 p

- Menéndez M, et al. (1998) “Fundamentos y Estado Actual De La Separación En Campo Magnético”. Canteras y Explotaciones (Madrid), N° 373, Noviembre, p. 34-49.
- Mencher, E., K. F. Dallmus, H. J. Fichter, C. González de Juana, R. L. Ponte, H. H. Renz, y P. de Schumacher, (1951) Cuadro de Correlación de las formaciones geológicas de Venezuela. En: texto de las monografías presentadas en la Convención Nacional del Petróleo. Ofic. Técn. Hidrocarb., Min. Minas e Hidrocarb., Caracas (en castellano e inglés). Reimpreso (1950) en: Bol. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., 2: 182. Reimpreso (1951) en: Petról. Interam., 9(12): 26-29 (en castellano e inglés); (1953) en: Amer. Assoc. Petról. Geol., Bull., 37(4): 774-775.
- Mencher, E., H. J. Fichter, H. H. Renz, W. E. Wallis, J. M. Patterson y R. H. Robie, (1953) Geology of Venezuela and its oil fields. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 37(4): 690-777.
- Miller, J. B.; K. L. Edward; P. P. Wolcott; H. W. Anisgard; R. Martín y H. Anderegg, (1958) Habitat of oil in the Maracaibo Basin, Venezuela. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Sp. Publ.: Habitat of Oil, p. 601-640
- Peláez, Eduardo, (1975). Preparación y concentración de Minerales. 3era y 4ta Parte. Caracas. Inédito. 220 p.
- Salvador, A., 1961-b. Guidebook to the geology of northeastern Trujillo. Soc. Geol. Venez. Occid., Guidebook N° 3, 33 p.
- Sánchez, Víctor, (1965). Materiales Magnéticos. Primera edición, Madrid. Montecorvo. 290 p.
- Serway & Beichner (2002). Física Para Ciencias e Ingeniería. Tomo II. Quinta edición, McGRAW-HILL, INTERAMERICANA Editores, S.A. de C.V. 1551p.

- Schaub, H. P., 1948. Outline of sedimentation in Maracaibo Basin, Venezuela. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 32(2): 215-227.
- Schaum, D.; Van der Merwe, C.W. (1998) Física General. Editorial, McGraw-Hill. México D.F. p. 237-247.
- Sutton, F. A., (1946) Geology of Maracaibo basin, Venezuela, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 30(10): 1621-1741.
- Tebble, R.S. & D.J. Craik, (1969). Magnetic Materials. Primera edicion , London. Wiley Interscience.726 p.
- Trump, G. W. y A. Salvador, 1964. Guidebook to the geology of western Táchira. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., 25 p.
- Valencio Alberto Daniel (1977) El Magnetismo de las Rocas. Departamento de Ciencias Geológicas .Editorial Universitaria de Buenos Aires, 333 p.
- Wagner, G; Van Den Haute, P. (1992) “Fission-Track Dating”. Solid Earth Sciences Library. Kluwer Academic Publishers. E.E.U.U. 285 p.
- Weiss, N.L, (1985) S.M.E. Mineral Processing Handbook. Primera edición. Colorado. S.M.M.E. 2144 p.
- W. J. Bronkala (1978) “Magnetic Separation” in Mineral Processing Plant Desing,A.L. Mular y R.B. Bhappu (Eds.), P. 467-478, AIME.
- W. J. Bronkala (1969) Magnetic Separators and Their Application in the Mineral Industry, AIME/SME preprint 69-B-364 p.

Yegres C. (2003) El Método de Huellas de Fisión basado en la técnica del detector externo para el cálculo de la edad de la Formación Betijoque. Trabajo de Grado no publicado, UCV. 115 p.

Young, G. A., A. Bellizzia, H. H. Renz, F. W. Johnson, R. H. Robie y J. Masvall, (1956) Geología de las cuencas sedimentarias de Venezuela y de sus campos petrolíferos. Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. N° 2, 140 p.

Paginas Web Consultadas:

<http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/05001magnet.html>

[Consulta: 2004, Mayo 15]

<http://www.cec.uchile.cl/~cutreras/apuntes/node120.html>[Consulta: 2004, Jilio 1]

<http://www.Pdvsa.com/Lexico> [Consulta: 2004, Septiembre 5]

http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/electronica/tem2_3_.htm [Consulta: 2004, Septiembre 13]

http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/136/htm/sec_8.htm

[Consulta: 2004, Octubre 13]

<http://www.cec.uchile.cl/~cutreras/apuntes/node100.html> [Consulta: 2004, Octubre

25]