

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMAN

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE GEODESIA Y TOPOGRAFÍA**

CATEDRA DE GEOFÍSICA

APUNTES DE

GEOMAGNETISMO

**PARA ALUMNOS DE INGENIERÍA GEODÉSICA Y GEOFÍSICA
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMAN**

Prof. Ing. Luis A. Estrada

Año 2013

CONCEPTOS MAGNÉTICOS FUNDAMENTALES

Definición: El magnetismo es la ciencia que estudia la fuerza de atracción de un **imán**, cuerpo cuya sustancia es capaz de atraer hierro, sin tener en cuenta la atracción gravitatoria.

Clasificación de los imanes:

a) **Naturales:** Los que se encuentran en forma natural en la Tierra y están compuestos de magnetita, ilmenita, pirrotita, cromita o hematita.

b) **Artificiales:** Los que llegan a ser imanes después de haber estado dentro de un campo magnético. A su vez se dividen en:

Permanentes: Porque una vez imantados mantienen su magnetismo después de quitarse el campo magnetizante. Ejemplos acero, níquel, cobalto.

Temporales: Porque una vez imantados pierden su magnetismo cuando se quita el campo magnetizante. Ejemplo el hierro dulce.

Propiedades de los imanes: El imán más simple consiste en una barra recta que se conoce como barra magnética con las siguientes propiedades:

Polos Magnéticos: Son regiones cerca de los extremos de una barra magnética, donde sus propiedades están concentradas. Estas regiones están situadas a una distancia de $1/12$ de la longitud de la barra, medida desde los extremos.

Su existencia y ubicación aproximada puede ser demostrada con el conocido experimento de colocar la barra bajo de un vidrio sobre el cual hay limaduras de hierro. Estas limaduras se ubicarán formando arcos que unen los polos.

El **Polo Norte**, o polo positivo de un imán, es el extremo que apunta aproximadamente al Norte Geográfico, cuando el imán es suspendido desde su centro. Partiendo de esta definición, ocurre que el Polo Norte de la Tierra es un polo negativo y por lo tanto un polo sur magnético. La ecuación anterior puede ser positiva o negativa, según los signos de los polos involucrados. Si los dos polos son de igual signo el producto será positivo y entonces la fuerza será repulsiva.

La polaridad de la barra puede determinarse acercándola al extremo de una brújula.

Ley de fuerza entre los polos magnéticos: Experimentando con una balanza de torsión, Coulomb encontró que la fuerza de atracción entre dos polos era:

$$F = 1/\mu \cdot m_1 m_2 / r^2$$

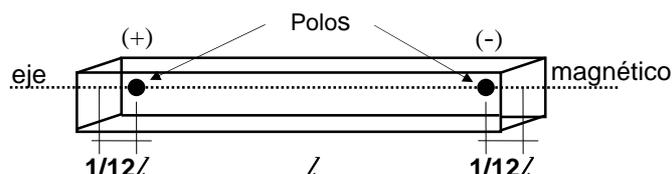
donde m_1 y m_2 son las intensidades de los polos, r la distancia que los separa, y μ es la **permeabilidad** magnética de la sustancia entre los polos. Para el aire vale 1,0000004 y vacío = 1. Una propiedad importante de los polos es el hecho que los de igual signo se repelen y de signo contrario se atraen.

Unidad de intensidad de polo: 1 **Weber (Wb)** cuando la fuerza de 1 **Newton** y la distancia de 1 **metro**, ó 1 **Maxwell (M)** cuando la fuerza es de 1 **Dyna** y la distancia de 1 **centímetro**.

Concepto fundamental de una materia magnetizada: Cada polo positivo tiene asociado un polo negativo de igual intensidad, y los dos están siempre en toda sustancia magnética. Es imposible separar estos dos polos. De aquí el nombre de **Dipolo**.

Si el cuerpo es irregular, los polos serán regiones irregulares opuestas entre sí. Pero el material magnético más elemental siempre tendrá dos polos.

Barra Magnética: Puede ser considerada como una línea (segmento) cuyos polos magnéticos están situados a $1/12$ de su longitud medida desde los extremos.



Momento Magnético (M): Es la medida del tamaño de un imán igual al producto de la intensidad de un polo por la distancia entre los dos, es decir: $M = m \times l$.



Por lo tanto, dos imanes colocados a la par o a continuación, tienen el mismo momento magnético total, porque importa es el producto y no sus elementos por separado.

Campo Magnético (H): Es la zona que rodea a un imán o cuerpo magnetizado. La extensión del campo dependerá de la sensibilidad del instrumento con que se lo mida, por un lado, y de la existencia de otro campo que lo limite por el otro.

La intensidad de un campo **H** se define como la fuerza que un campo magnético ejerce sobre un polo magnético positivo idealizado como libre.

La fuerza de atracción entre dos polos es como dijimos $F = m_1 m_2 / r^2$ con $\mu = 1$ (aire similar al vacío), entonces el campo magnético **H** en el punto donde está ubicado m_1 se define como la fuerza ejercida por unidad de intensidad de polo:

$$H = F / m_1 = m_2 / r^2 \quad \text{o genéricamente} \quad H = m / r^2$$

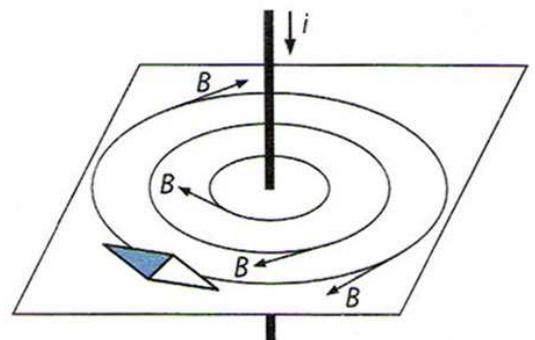


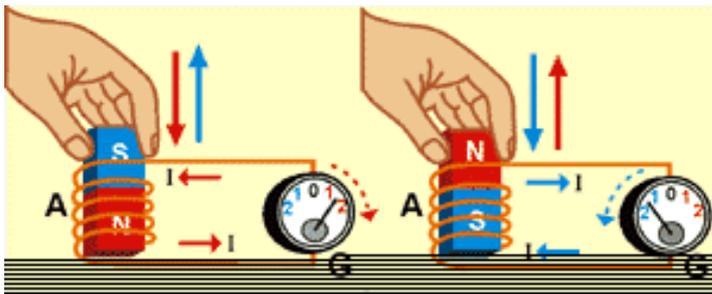
Líneas de Fuerza: Un polo idealizado como libre y positivo en un campo magnético, se moverá siguiendo una línea de fuerza magnética, y su sentido será siempre desde un polo positivo a uno negativo.

Si colocamos una aguja magnética dentro de un campo magnético, se orientará tangente a las líneas de fuerza del campo, que es lo que ocurre con la brújula. Las líneas y curvas descritas por las limaduras de hierro son esas líneas de fuerza, que tienen las siguientes propiedades:

- 1) En cualquier punto del campo una tangente a estas líneas nos dará la dirección de la intensidad, y el sentido siempre de Norte a Sud.
- 2) La cantidad de líneas que atraviesan un área de 1 cm^2 , perpendicular a la dirección del campo en un punto, es igual al valor numérico del campo **H** en ese punto. Es decir que **la densidad de líneas de Fuerza es igual a la Intensidad del campo**.
- 3) El sentido de las líneas de campo es tal que siempre salen desde una fuente (polo positivo) y terminan en un sumidero (polo negativo).

Inducción Magnética (B): En 1920 Oersted observó que la aguja de una brújula colocada cerca de un conductor rectilíneo con corriente, giraba hasta colocarse perpendicular a este. Esta experiencia probó que la corriente eléctrica producía efectos magnéticos. Las limaduras de hierro se orientaban formando círculos con centro en el conductor. Y estas líneas no iban de ninguna fuente a ningún sumidero. Se puede decir que la corriente eléctrica se comporta como un remolino de líneas de fuerza, lo que también ocurre a la inversa, es decir que los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre cargas eléctricas en movimiento (la corriente eléctrica).





La presencia de este nuevo elemento en juego, la carga en movimiento, obligó a definir un nuevo vector que es la inducción magnética **B**.

En la figura vemos que si se mueve un imán dentro de una bobina solenoide, el campo magnético del imán generará una fuerza electromotriz o flujo de corriente de electrones que se detecta en un

galvanómetro G. Este fenómeno se conoce como inducción magnética.

Si por dos conductores paralelos de longitud l circula una corriente i y están separados una distancia r , **existe una fuerza F de atracción o repulsión** según la dirección de las corrientes sea la misma u opuesta (Regla de la mano derecha):

$$F \propto \frac{i \cdot l}{r} \quad \text{ó} \quad F = \frac{\mu \cdot i \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (\text{en Newton}) \quad \text{con } \mu \text{ la permeabilidad del medio}$$

La Inducción Magnética **B** se define como la fuerza por unidad de longitud del alambre, es decir:

$$B = \frac{F}{l} = \frac{\mu}{2\pi} \frac{i}{r}$$

Con un magnetómetro de torsión diseñado especialmente para calibrar el valor de **B** se la definió como **Tesla**, una unidad que significa **Newton** sobre **Ampere.metro**, proveniente de **F = q.v.B**.

Al descubrirse la similitud entre los campos magnéticos generados por un imán y un solenoide, se experimentó variando la corriente i , el número de espiras N , la longitud L y el área S de este, concluyéndose que

$$\frac{B}{i \cdot N/L} = \text{constante} \quad \text{o que} \quad B = \mu_0 \frac{i \cdot N}{L}$$

Con μ_0 siendo la **permeabilidad magnética del vacío**.

También se llamó **campo Dipolar** al generado por un imán o dipolo magnético, nombre que también se utiliza para el producido por un solenoide.

Al **B** así definido para un solenoide, se lo interpretó como un campo total compuesto de dos partes:
a) El medio interior definido por μ_0 , vacío en este caso y b) Un campo de excitación magnética **H** definido por la corriente y la distribución de las espiras, de modo que

$$B = \mu_0 \cdot H$$

Concluyendo que **la unidad de H es el Ampere/metro**.

Imantación o Intensidad de Magnetización (I): Experimentando con diferentes materiales dentro de un solenoide se definió la **Susceptibilidad Magnética k** a raíz de la imantación que adquiere una sustancia puesta dentro en un campo, y que resulta proporcional a la **excitación H**. Es decir que

$$I = k \cdot H$$

Si en un solenoide con núcleo vacío $B = \mu_0 \cdot H$, con núcleo lleno con un con un material de susceptibilidad k :

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot k \cdot H = \mu_0 \cdot H \cdot (1+k)$$

Con $\mu = \mu_0 \cdot (1+k)$ la **permeabilidad del material**.

Líneas de fuerza por unidad de polo: Partiendo de la definición de que una línea de fuerza por cm^2 establece una unidad de campo, analicemos cuantas líneas emite un polo unitario y cuántas un polo de intensidad m . Esto se ve claramente en la siguiente relación:

$$H = \text{Flujo}/\text{Area} \Rightarrow \phi/A = \phi/4\pi r^2 = m/r^2 \Rightarrow \phi = 4\pi m \Rightarrow m = 1 \text{ weber emite } 4\pi \text{ líneas}$$

Dicho de otro modo, cuando se introduce una sustancia en un campo magnético H , se imanta, es decir que aparecen polos llamados inducidos, y por lo tanto generan sus propias líneas de fuerza. La cantidad total de líneas por centímetro cuadrado es la **Inducción Magnética** o **Flujo Magnético B**, que podrá ser mayor o menor que las del **campo H** original, dependiendo de las propiedades magnéticas de la sustancia.

Por ello se dice que la permeabilidad magnética μ es la facilidad con que un campo se puede establecer en una sustancia magnética.

Unidades Magnéticas:

El **Gauss** fue la unidad de medidas de la **Inducción** o **Flujo Magnético B** en el sistema CGS, que se definía como **líneas por centímetro cuadrado** [ϕ/cm^2]. Como esta cantidad era una unidad muy grande, se definió el **Gamma** [γ] = 10^{-5} G.

En el sistema internacional (SI) **B** se mide en **Weber [Wb] por m^2** , que se define como **Tesla [T]**, ó en **Weber [Wb] por cm^2** que es equivalente al **Gauss [G]**.

El **Tesla** es la inducción de un campo en el que una carga eléctrica de un Coulomb, que se desplaza perpendicularmente a las líneas de fuerza con una velocidad de un m/seg, se vé sometida a una fuerza de un Newton

El **Oersted** es la unidad del **Campo Magnético H** en el sistema CGS y el **Ampere por metro [A/m]** en el S.I.

Como la **Inducción B** y el **Campo H** son proporcionales en un valor constante que es la **permeabilidad μ** (1,0000003 en el aire), y como los instrumentos magnéticos miden la inducción **B**, se generó una gran confusión con las unidades porque los valores de ambos son muy parecidos, aunque sus unidades sean diferentes.

Para el campo magnético de la Tierra se utiliza el **nanoTesla = 10^{-9} Tesla ó 1 nT = 10^{-9} T**

Para mayor claridad podemos confeccionar la siguiente tabla de conversión:

	(CGS)	(SI)	Conversión
Inducción B	Gauss	Tesla	1 Gauss = 10^{-4} Tesla
Campo H	Oersted	Ampere/m	1 Oersted = 79,58 A/m

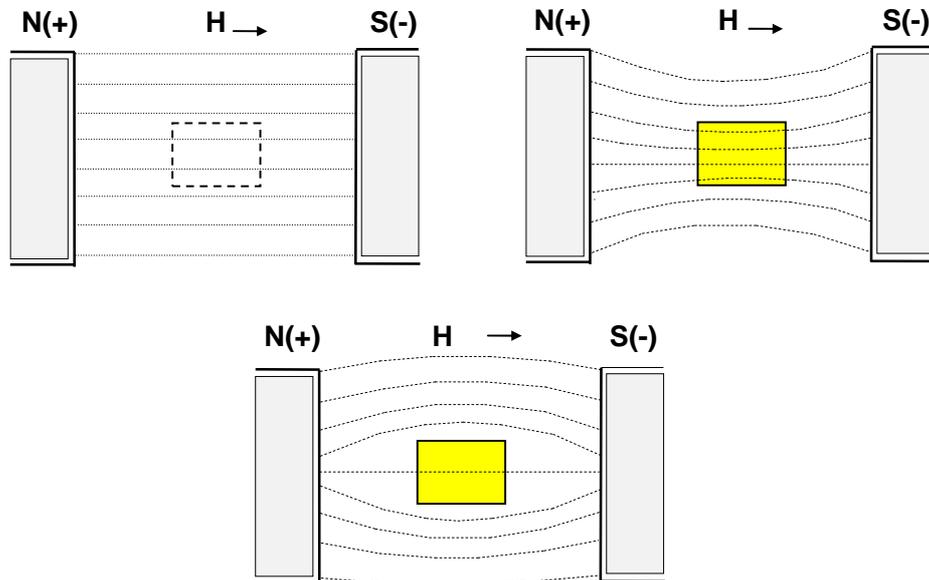
Intensidad de Magnetización (I): Se define como la fuerza de un imán, es el Momento Magnético adquirido o inducido por un cuerpo al ser introducido en un campo, por el volumen del mismo. También se la define como la intensidad del polo inducido por área de sección transversal:

$$I = m/A = m'/A' \quad \text{ó} \quad I = M/V$$

Relación entre Permeabilidad y Susceptibilidad

Un gran imán de campo **H** con sus polos **Norte(+)** y **Sur (-)** tendrá las líneas de campo paralelas. En el recuadro de líneas de trazo ponemos primero una sustancia que favorece el paso de las líneas originales, o dicho de otra manera, se inducirán polos en ella que generarán líneas de campo que se sumarán a las originales.

Cambiamos la sustancia por otra que se oponga al paso de las líneas originales, o dicho de otra manera, se inducirán polos cuyas líneas de campo se restarán a las originales.



El total de líneas que atraviesan el cuerpo es la suma de las líneas debidas al campo H , más las debidas al campo originado por los polos inducidos m . Si una unidad de polo genera 4π líneas de fuerza, un polo de intensidad m generará $4\pi m$ líneas. Entonces la cantidad total de líneas B que atraviesan el cuerpo será:

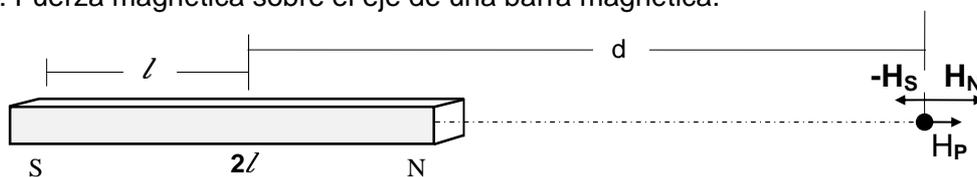
$$B = \phi/A = \phi'/A + 4\pi m/A \Rightarrow B = H + 4\pi m/A \Rightarrow \boxed{B = H + 4\pi I}$$

Dividiendo en $H \Rightarrow B/H = 1 + 4\pi I/H$, puesto que $B/H = \mu$ e $I/H = k$

$$\text{Entonces: } \mu = 1 + 4\pi k \quad \text{o} \quad \boxed{k = (\mu - 1) / 4\pi}$$

Intensidad Magnética debida a un Imán: El manejo y calibración de cualquier instrumento magnético o magnetómetro, requiere conocer la intensidad magnética a determinada distancia de una simple barra magnética. Los llamados casos o posiciones de Gauss resuelven primero las situaciones más comunes que se presentan y luego establecen una forma general para todos los casos.

Caso I: Fuerza magnética sobre el eje de una barra magnética.



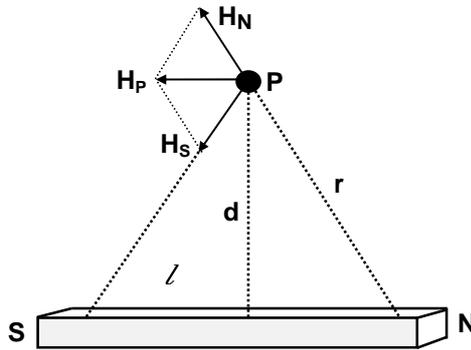
$$H_P = H_N + (-H_S) = m/(d-l)^2 - m/(d+l)^2 = [m(d^2+2dl+l^2) - m(d^2-2dl+l^2)] / (d^2-l^2)^2$$

$$H_P = 4mdl / (d^2-l^2)^2 = 2Md / (d^2-l^2)^2$$

Si l es muy pequeño comparado con d ($d \gg 5l$), queda

$$\boxed{H_P = 2M/d^3}$$

Caso II: Fuerza magnética a 90° del centro del eje magnético.



$$H_P/H_N = 2l/r \quad H_P = H_N 2l/r$$

$$H_N = m/r^2$$

$$H_P = 2m/lr^3$$

$$r = \sqrt{d^2 + l^2}$$

$$H_P = 2m/l(d^2 + l^2)^{3/2}$$

Si l es muy pequeño comparado con d ($d \gg 5l$):

$$H_P = M/d^3$$

Caso III: Fuerza magnética en un punto a un ángulo α sobre el eje magnético de la barra.

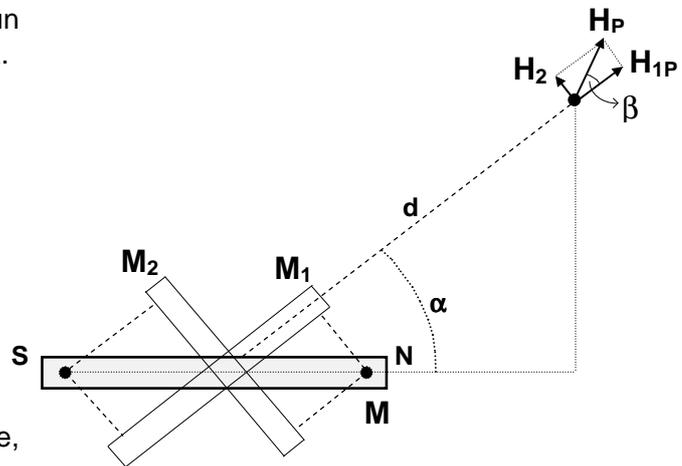
$$M_1 = M \cos \alpha \quad \text{y} \quad M_2 = M \sin \alpha$$

$$H_{1P} = 2 M_1/d^3 \quad \text{y} \quad H_{2P} = M_2/d^3$$

$$\text{tg} \beta = H_{2P}/H_{1P} = (M \sin \alpha) / (2M \cos \alpha)$$

$$\text{tg} \alpha = 2 \text{tg} \beta$$

Esta relación de tangentes de los ángulos α y β entre el eje del imán y la dirección al punto, y entre ésta y la del campo resultante, tiene un gran significado en la Tierra.



$$\alpha \equiv \varphi_G \text{ (colatitud Geográfica)}$$

$$\beta \equiv 90 - I \text{ (Inclinación Magnética)}$$

El valor del campo H en cualquier punto resulta entonces:

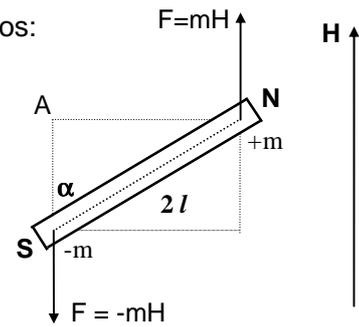
$$H_P^2 = H_{1P}^2 + H_{2P}^2 = (2M \cos \alpha)^2 / (d^3)^2 + (M \sin \alpha)^2 / (d^3)^2$$

$$H_P^2 = (4M^2 \cos^2 \alpha + M^2 \sin^2 \alpha) / d^6 \quad H_P = M/d^3 \sqrt{4 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}$$

Comportamiento de un imán en un campo magnético: En un campo homogéneo y uniforme, la intensidad es siempre constante y en la misma dirección. Un imán libre para girar en un plano horizontal, orientará su eje en la dirección del campo en que está inmerso. Esto se debe a que se produce una cupla por la acción de dos fuerzas de distinto sentido en cada polo del imán. Si tenemos un campo H , la fuerza que experimentará el polo Norte del imán libre será $+mH$, y $-mH$ la el polo Sur. El valor de la cupla vendrá dado por el producto de la fuerza por la distancia perpendicular entre ellas, es decir AN en la figura, que es igual a $2.l \cdot \text{sen} \alpha$.

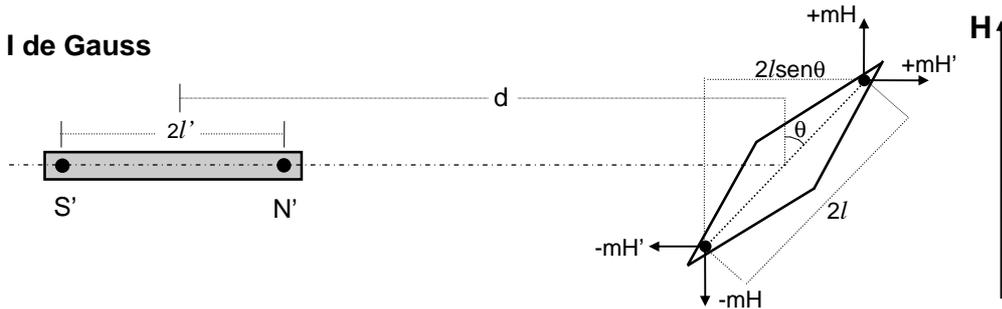
Siendo el momento magnético del imán $M = 2.l.m$, tendremos:

CUPLA = $mH \times 2.l.\text{sen}\alpha = MH \times \text{sen}\alpha$



Comportamiento de una aguja magnética en dos campos:

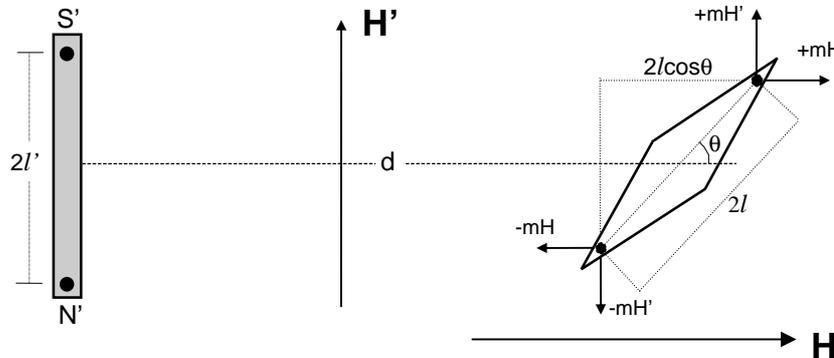
Posición I de Gauss



El campo H' debido al imán deflector será $H' = 2M'/d^3$ y el de la cupla debida al campo H será: $mH.2/\text{sen}\theta$. Para que el sistema quede en equilibrio las cuplas deben ser iguales, o la resultante de las dos fuerzas actuantes sea colineal con el eje de la aguja, o sea:

$$mH'.2/\text{cos}\theta = mH.2/\text{sen}\theta \Rightarrow m(2M'/d^3)2/\text{cos}\theta = mH.2/\text{sen}\theta \Rightarrow \text{tg } \theta = 2M'/Hd^3$$

Posición II de Gauss



El valor del campo H' debido al imán deflector, será $H' = M'/d^3$ y la cupla que genera será

$$mH'.2/\text{cos}\theta \text{ ó } m(M'/d^3)2/\text{cos}\theta$$

La cupla debida al campo H será: $mH.2/\text{sen}\theta$

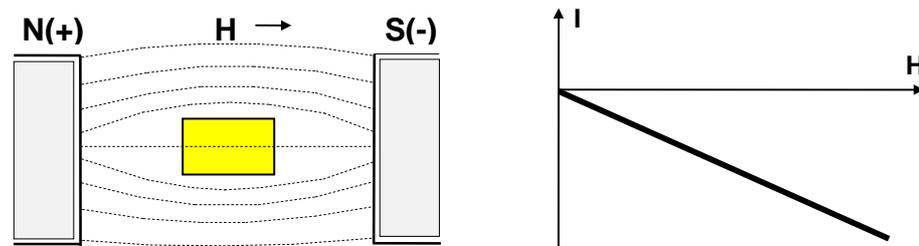
Nuevamente, para que el sistema esté en equilibrio, ambas cuplas deben ser iguales, es decir:

$$m(M'/d^3)2/\text{cos}\theta = mH.2/\text{sen}\theta \text{ por lo tanto } \text{tg } \theta = M'/Hd^3$$

PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LA MATERIA

Todas las sustancias pueden ser clasificadas según su comportamiento dentro de un campo magnético. La base de esta clasificación fue establecida por Faraday en 1.845, quien demostró que todos los materiales son afectados de alguna manera por un campo magnético.

Sustancias Diamagnéticas: El diamagnetismo es una propiedad universal de la materia. Estas sustancias muestran una suave respuesta en un campo magnético, y su efecto es tal que lo repele.



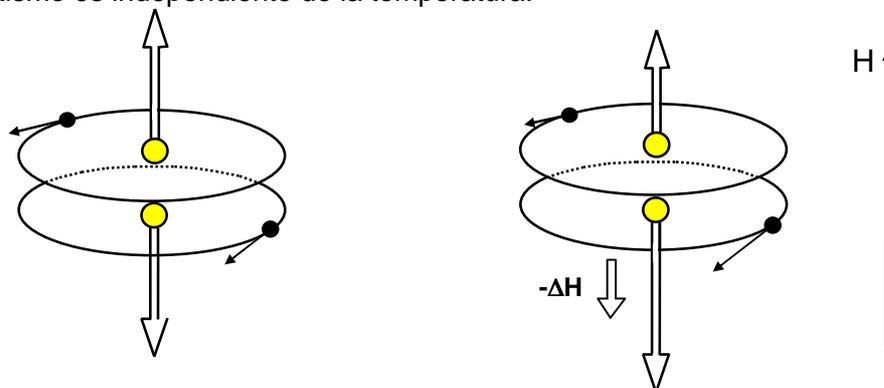
La imantación I es proporcional al campo, pero de signo contrario, debido a que la susceptibilidad k es negativa. Como ejemplo podemos citar al **Bismuto con $k = -13 \times 10^{-6}$**

El fenómeno diamagnético se explica por la rotación orbital del electrón alrededor del núcleo. Por electromagnetismo, (espiras o solenoide), cada electrón rotando genera un dipolo.

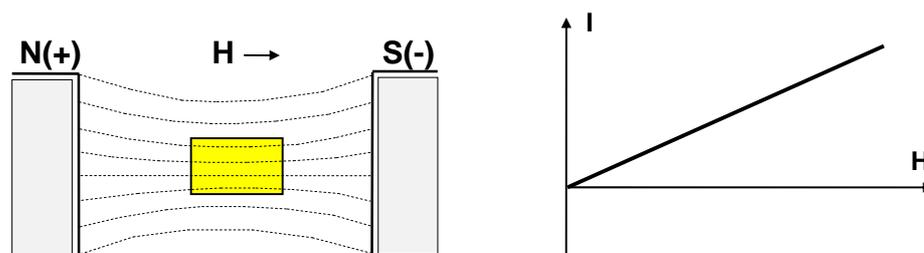
El diamagnetismo se presenta claramente en todas las sustancias cuyos átomos tienen pares de electrones girando en sentido opuesto. De esta manera los dipolos se anulan dentro del átomo sin presencia de un campo externo.

Al introducir esa sustancia en un campo magnético, uno de los electrones se acelera y el otro se frena. Por lo tanto un dipolo aumenta su intensidad y el otro disminuye, de manera tal que al sumarse ya no se anulan y aparece un dipolo diferencia que siempre se opone al campo externo.

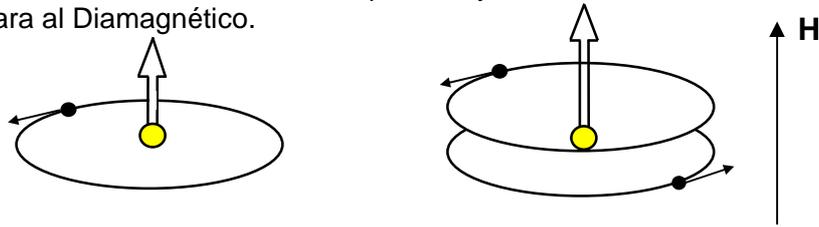
El diamagnetismo es independiente de la temperatura.



Sustancias Paramagnéticas: Son las que presentan una definida atracción al campo magnético, aunque esta respuesta también es suave, al igual que el diamagnetismo. Una varilla de este material en medio de un campo, se orientará en la dirección de este.



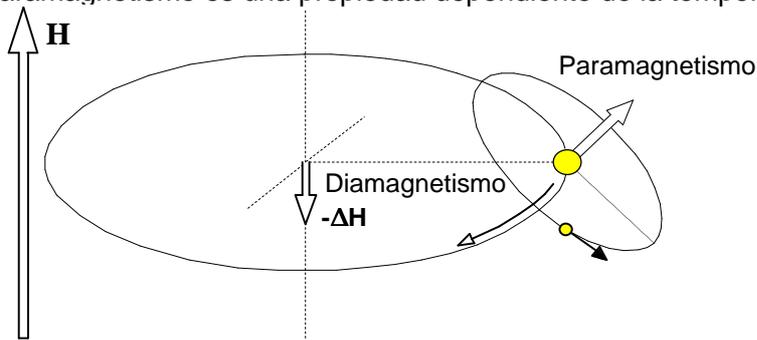
La imantación también será proporcional al campo, pero dirigida en el mismo sentido puesto que la susceptibilidad k es positiva. Ejemplo de estas sustancias son el **Platino, Aluminio, Manganeso**, etc., con k del orden de 10^{-3} a 10^{-5} . Por ser positivo y de un orden menor, el fenómeno Paramagnético enmascara al Diamagnético.



Como en el Diamagnetismo, el fenómeno también se explica por la rotación orbital de los electrones, pero en este caso, de los libres o apareados girando en un mismo sentido.

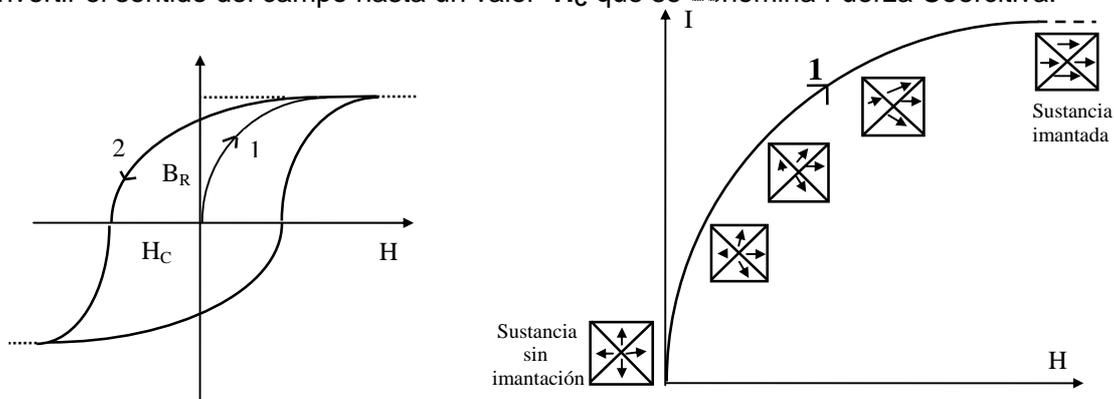
Por lo tanto siempre existirá un dipolo en el átomo, orientado al azar, pero que se anula con los otros dipolos de la materia. Entonces el átomo de estas sustancias tiene momento magnético, pero no así la sustancia toda. En la medida que crece el campo, los dipolos se orientan en mayor cantidad paralelos al campo externo.

La propiedad universal del Diamagnetismo, la oposición al campo, se debe al efecto giromagnético que hace precesar el dipolo como un trompo, debido a la cupla magnética que se genera y que tiende a orientar al dipolo. Esa rotación es siempre en un sentido tal que el nuevo dipolo inducido se opone al campo. El Paramagnetismo es una propiedad dependiente de la temperatura.



Sustancias Ferromagnéticas: Son aquellas que muestran una pronunciada reacción paramagnética, y en virtud de ello han sido llamadas ferromagnéticas que quiere decir magnéticas como el hierro. La susceptibilidad k y la permeabilidad μ son muy grandes y no son constantes como en las dia y paramagnéticas. La variación de la imantación en función del campo magnetizante, describe una curva llamada **Ciclo de Histéresis**. Ejemplo de estas sustancias son el acero, el hierro y el níquel.

La imantación aumenta según la curva 1 hasta saturarse. Al quitar el campo, la desimantación se produce por la curva 2 y queda un magnetismo remanente B_R . Para anularlo se hace necesario invertir el sentido del campo hasta un valor $-H_C$ que se denomina Fuerza Coercitiva.



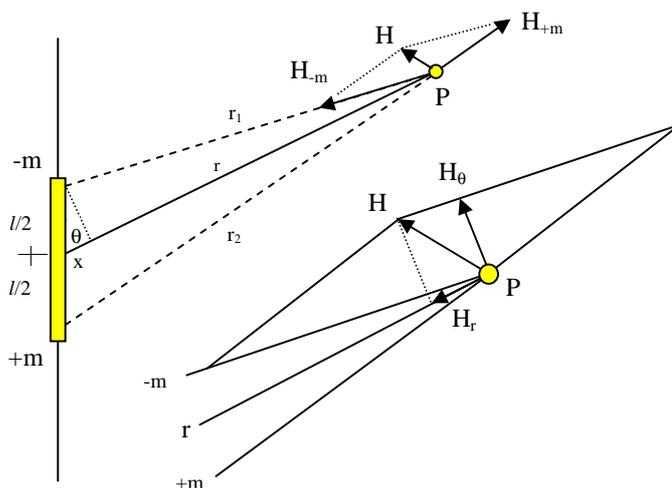
TEORÍA DEL POTENCIAL MAGNÉTICO

Los campos magnéticos, gravimétricos y eléctricos son llamados **Campos Potenciales** y su característica principal es que el trabajo realizado para mover un polo (o masa o carga) de un punto a otro es independiente del camino, tanto que si se realiza un circuito cerrado volviendo al punto origen, el trabajo será nulo.

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, este tiende a moverse en la dirección de aquella. Si el cuerpo está libre y se mueve en esa dirección, el sistema pierde energía. Para moverlo en dirección opuesta a la fuerza se requiere un trabajo sobre él, entonces el sistema adquiere energía potencial. El valor de esta energía potencial es igual al trabajo hecho sobre el cuerpo. Esto se ve claramente cuando se eleva un cuerpo desde el suelo hasta una determinada altura por una escalera, en contra de la gravedad. En todos los casos la magnitud del potencial es independiente del camino recorrido, donde no importa la longitud o el desplazamiento horizontal sobre la misma, sino la diferencia de altura solamente.

En nuestro caso la fuerza **F** es debida a un campo magnético **H** producido por un polo de intensidad **m** a una distancia **r**, entonces el trabajo o **Potencial V** necesario para acercar un polo unitario **m'** desde el infinito hasta un punto **P** a una distancia **r** del polo **m**, será igual a la fuerza por la distancia:

$$V = F \cdot r \quad \text{ó} \quad V = m/r \quad \text{ya que} \quad F/m' = H = m/r^2$$



Desde un análisis matemático es lo mismo definir el **Potencial V** como el trabajo negativo realizado sobre un polo unitario en un campo magnético, entonces

$$V = \int_{\infty}^r (m / r^2) \cdot dr = m / r$$

La importancia del Potencial viene del hecho de que se puede obtener el campo en una dirección dada:

$$H_r = - dV / dr$$

Para describir el campo magnético que genera un dipolo en un punto **P**, vamos a

deducir la **ecuación del dipolo** con los parámetros de la misma figura:

El Potencial total será:

$$V = (m / r_1) - (m / r_2)$$

Reemplazando r_1 y r_2 en función de r y x que es igual a $(l/2)\cos\theta$

$$V = \frac{m}{r - (l/2)\cos\theta} - \frac{m}{r + (l/2)\cos\theta}$$

$$V = \frac{m \cdot l \cdot \cos\theta}{r^2 - (l/2)^2 (\cos\theta)^2}$$

Con la suposición de que $r \gg l \Rightarrow V \cong (m \cdot l \cdot \cos\theta) / r^2$, o lo que es lo mismo, $V = \frac{M \cos\theta}{r^2}$

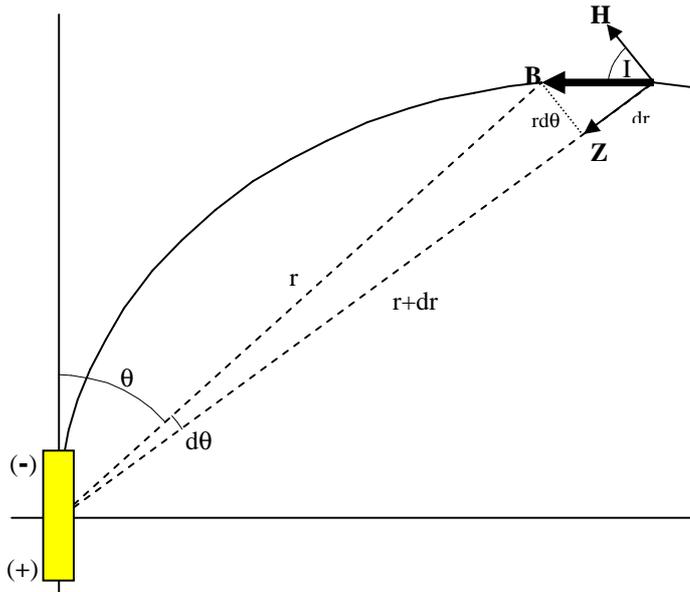
Como en la Prospección Magnética es conveniente calcular las componentes radial y tangencial, serán también las negativas de las derivadas del Potencial en esas direcciones:

$$H_r = -dV / dr = (2M \cos \theta) / r^3 \quad (\theta = 0^\circ \Rightarrow H_r = Z_E = 2M/r^3)$$

$$H_\theta = -dV / r d\theta = (M \sin \theta) / r^3 \quad (\theta = 90^\circ \Rightarrow H_\theta = H_E = M/r^3)$$

Ley de líneas de fuerza magnéticas

Nótese el cambio de nomenclatura: Llamamos **H** a H_θ , **Z** a H_r y **B** a **H**.



$$\text{tg } I = Z/H = dr/r \cdot d\theta =$$

$$= 2(M/r^3) \cos \theta / (M/r^3) \sin \theta$$

$$\text{tg } I = 2 \cot \theta$$

$$dr/r = 2 \cdot \cot \theta \cdot d\theta =$$

$$= 2 \cdot (\cos \theta / \sin \theta) \cdot d\theta \cdot (\sin \theta / \sin \theta)$$

$$dr/r = d(\sin^2 \theta) / (\sin^2 \theta)$$

Integrando miembro a miembro,

$$\ln(r) = \ln(\sin^2 \theta) + C$$

$$r = r_0 \cdot \sin^2 \theta$$

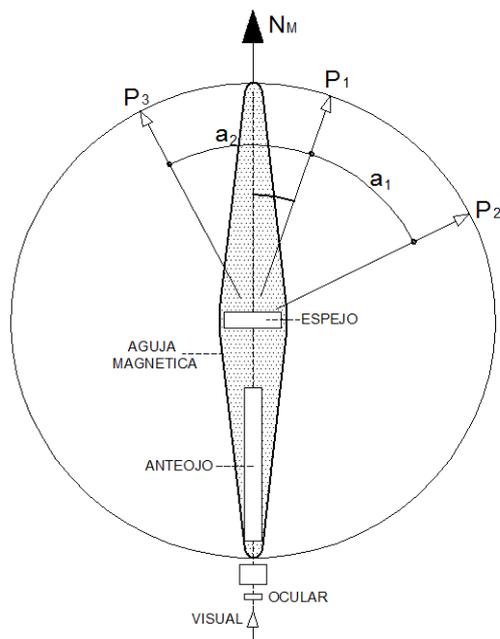
donde **r** es el radio vector a un punto de la línea de fuerza y **r₀** el correspondiente a $\theta = \pi/2$ del eje magnético. Claramente se ve que sobre el eje $\theta = 0^\circ$ y que $V = 2M / r^2$. Perpendicular a dicho eje el ángulo $\theta = 90^\circ$ y $V = M / r^2$, lo que se vio en las posiciones de Gauss:

$$Z = (2M \cos \theta) / r^3 \quad H = (M \sin \theta) / r^3 \quad B^2 = H^2 + Z^2 = (M^2 / r^6)(4 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)$$

INSTRUMENTAL MAGNÉTICO

El instrumental puede clasificarse como magnetómetros o variómetros. Los primeros son usados para hacer mediciones absolutas y los últimos para monitorear variaciones sin referencia alguna de la magnitud absoluta del campo. Una segunda distinción es que las mediciones sean escalares o vectoriales. Un magnetómetro escalar mide la magnitud del campo sin considerar la dirección, en cambio, un vectorial mide el campo en una determinada dirección. No obstante un magnetómetro escalar puede medir vectorialmente si se conocen la dirección del Norte Magnético, la declinación del lugar de medición, y se orienta apropiadamente el sensor. La clasificación más usada es la que proviene del principio físico utilizado para la medición, a saber:

1) Magnetómetros de Torsión: Constan de un imán suspendido que adopta una posición de equilibrio cuando se compensan la cupla ejercida por el campo de la Tierra sobre el imán con la cupla debida a la torsión o a la gravedad. Un pequeño cambio en el campo hace que el imán gire y adopte otra posición de equilibrio. Este principio fue utilizado en los primeros años de registración continua en los Observatorios Magnéticos y siguen funcionando hasta hoy en algunos lugares, como el Variógrafo Askania, el Q.H.M. (Quartz Horizontal Magnetometer) y la Balanza de Schmidt.



Q.H.M.: Consiste de un cuerpo tubular del que cuelga un imán de un hilo de torsión. Tiene un anteojo sobre una ventana del tubo para observar un espejo adherido en forma perpendicular al imán. Todo el sistema puede rotar sobre un plano horizontal graduado para leer ángulos.

Si el imán se libera en una posición próxima al Norte Magnético, este no se orientará en esa dirección, sino que debido a una torsión residual θ de hilo se ubicará P_1 , formando un ángulo α , con el N_M . Siendo τ el coeficiente de torsión del hilo, M el momento magnético del imán y H el campo que se desea medir, el equilibrio será:

$$M.H.\text{sen}\alpha = \tau.\theta$$

Si se hace girar la alidada 360° lentamente en el sentido de las agujas del reloj, el imán se ubicará en P_2 , y el equilibrio será:

$$M.H.\text{sen}(\alpha+a_1) = \tau(\theta+2\pi)$$

Si luego se rota la alidada dos veces 360° en sentido antihorario, el imán ocupará la posición P_2 y el equilibrio será ahora:

$$M.H.\text{sen}(\alpha-a_2) = \tau(\theta-2\pi)$$

Los ángulos a_1 y a_2 se obtienen por diferencias de lecturas a las tres direcciones. Sumando la 2da. y la 3ra. ecuación y reemplazando θ de la 1ra. ecuación, se obtiene:

$$\text{tg } \alpha = \frac{\text{sen } a_1 - \text{sen } a_2}{2 - (\text{cos } a_1 + \text{cos } a_2)}$$

Restando la 2da. y la 3ra. ecuación, se obtiene:

$$H = \frac{4\pi\theta}{M} \frac{1}{\text{sen}(\alpha + a_1) - \text{sen}(\alpha - a_2)}$$

Si el instrumento está bien ajustado α y θ serán pequeñas, entonces a_1 y a_2 diferirán muy poco de su valor medio $\varphi = (a_1 + a_2) / 2$, entonces

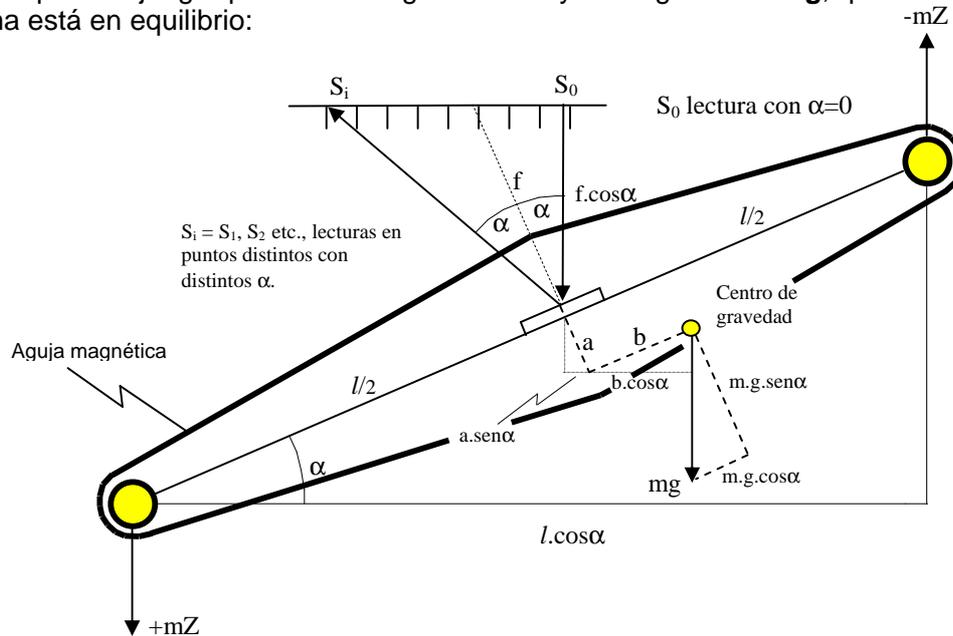
$$H = \frac{4\pi\theta}{M.\text{sen } \varphi}$$

Como el valor del campo H que se obtiene depende de los valores de M y θ que son variables con el tiempo, el sistema debe calibrarse periódicamente en observatorios o con otros magnetómetros. El mismo instrumento permite determinar la Declinación, ángulo entre el Norte Geográfico y el Norte Magnético, pero la técnica es más compleja y de menor precisión.

Balanza de Schmidt: Este instrumento permite medir componente vertical y horizontal del campo magnético terrestre, aunque debe cambiarse la aguja magnética que provee el fabricante.

Analizaremos el procedimiento para determinar la componente vertical, ya que es similar para la horizontal pero cambia la disposición del soporte para apoyo de la aguja.

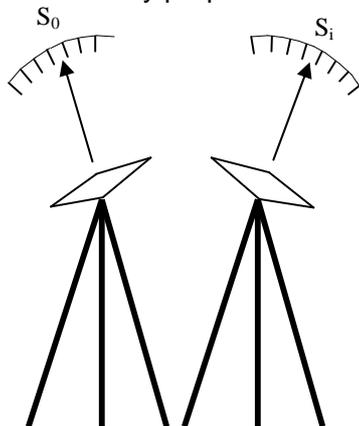
Hay dos cuplas en juego que son la magnética **Cm** y la de gravedad **Cg**, que deben ser iguales si el sistema está en equilibrio:



$$C_g = m \cdot g(b \cdot \cos\alpha + a \cdot \sin\alpha) = C_m = z \cdot m \cdot l \cdot \cos\alpha = z \cdot M \cdot \cos\alpha$$

$$\text{tg}(2\alpha) = (S_i - S_0) / f \cdot \cos\alpha$$

Como α es muy pequeño: $\cos\alpha \approx 1$ y $\text{tg}(2\alpha) = 2 \cdot \text{tg}\alpha$ o $\text{tg}\alpha = (S_i - S_0) / 2f$



Entonces $\text{tg}\alpha = (z \cdot M - b \cdot m \cdot g) / a \cdot m \cdot g = (S_i - S_0) / 2f$

Como S_i son las lecturas, en una estación leeremos S_1 y en otra S_2 por ejemplo:

$$S_1 - S_0 = (2 \cdot f \cdot z_1 \cdot M - 2 \cdot f \cdot b \cdot m \cdot g) / (a \cdot m \cdot g)$$

$$S_2 - S_0 = (2 \cdot f \cdot z_2 \cdot M - 2 \cdot f \cdot b \cdot m \cdot g) / (a \cdot m \cdot g)$$

Restando m. a m. tendremos:

$$S_2 - S_1 = 2 \cdot f \cdot (z_2 \cdot M - b \cdot m \cdot g + b \cdot m \cdot g - z_1 \cdot M) / (a \cdot m \cdot g)$$

$$S_2 - S_1 = 2 \cdot f \cdot M \cdot (z_2 - z_1) / (a \cdot m \cdot g)$$

$$\Delta z = (S_2 - S_1) \cdot (a \cdot m \cdot g) / (2 \cdot f \cdot M) \Rightarrow \Delta z = E (S_2 - S_1) \quad \text{con } E = (a \cdot m \cdot g) / (2 \cdot f \cdot M)$$

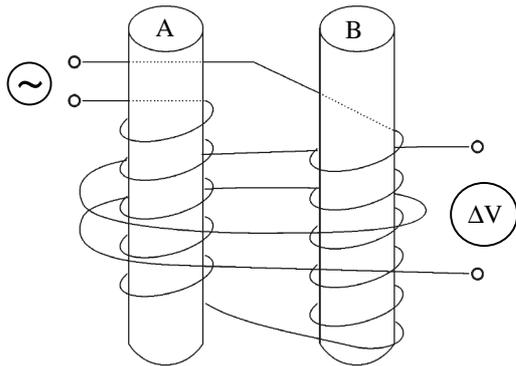
El Factor de escala **E** se determina con la Bobina de Helmholtz, dentro de la que se coloca la balanza mientras se genera un campo conocido con la bobina.

2) Magnetómetros de Inducción: Este tipo de instrumentos lleva implícita la distinción entre un medidor absoluto y un variómetro, porque los cambios lentos del campo son medidos en forma absoluta con una bobina que gira, mientras que los cambios rápidos se detectan con una bobina estática. Ambas implican la detección de una fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida por el flujo cambiante en las bobinas.

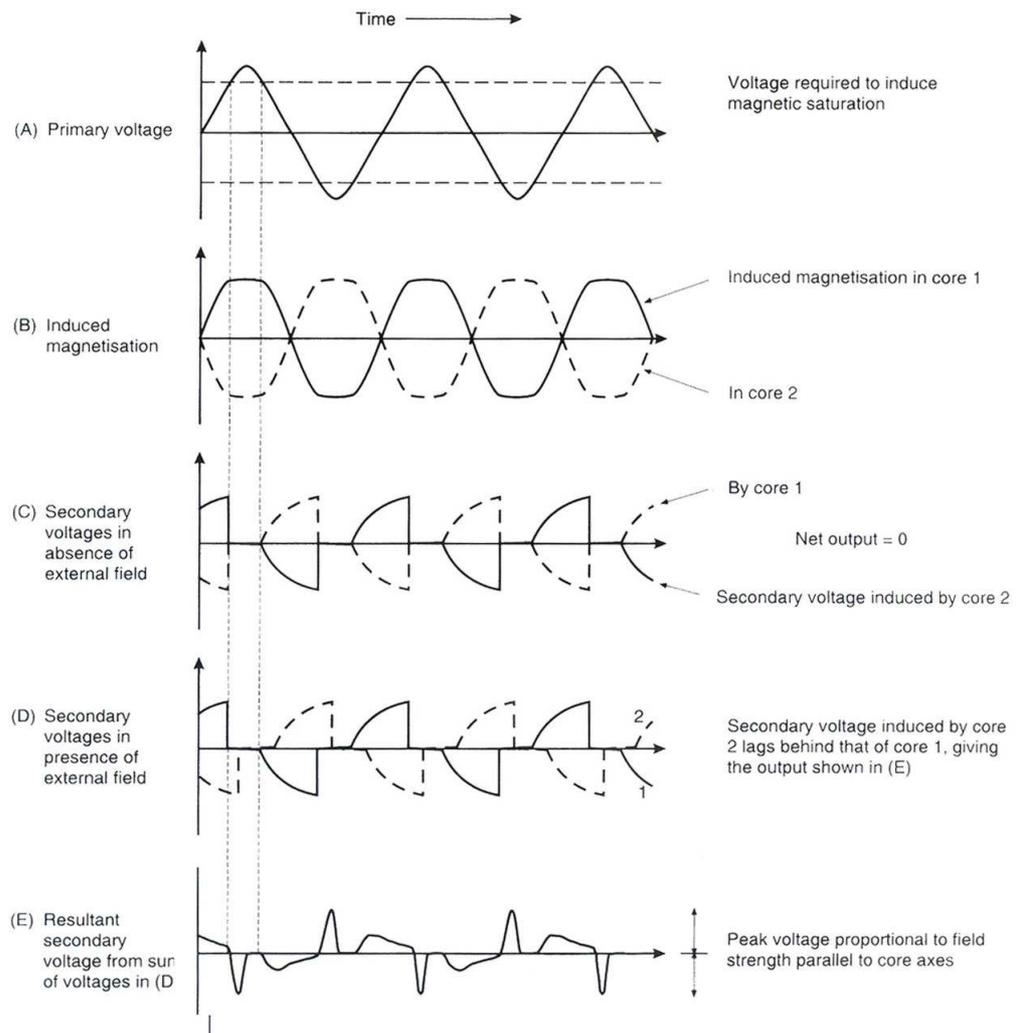
Cuando una bobina gira alrededor de un eje diametral alineado en forma paralela a un campo, el flujo de líneas de campo no cortará el plano de la bobina y por lo tanto no se generará una f.e.m. La inclinación de este eje es la inclinación del campo. Este fue el principio físico en que se basó el **Inductor Terrestre**, un instrumento muy usado también en observatorios y que tenía 0,1' de precisión.

3) Magnetómetros de Núcleo Saturable o Flux-Gate o de Saturación de Flujo

Desarrollado en la década del 40 para detectar submarinos. Luego de la Segunda Guerra Mundial se lo adaptó para medir desde aviones.



Consiste de dos barras paralelas A y B de metal ferromagnético colocadas cerca, como núcleo de dos bobinas por las que circula una corriente alterna en dirección opuesta en cada una. La medición depende de la permeabilidad variable del núcleo que llega a la saturación positiva y negativa (Ciclo de Histéresis) cuando se aplica la corriente. Una bobina secundaria envuelve a las otras dos, y en ausencia de un campo externo, el voltaje inducido ΔV en aquella será nulo porque las saturaciones de los núcleos ocurren simultáneamente pero de signos opuestos.



En presencia de un campo externo como el de la Tierra, la saturación positiva de un núcleo ocurrirá antes que la negativa del otro y esto inducirá un voltaje en la bobina secundaria, el que será proporcional a la intensidad de dicho campo externo.

El Flux-Gate es un magnetómetro vectorial, por lo tanto puede medir las componentes o el campo total, según la orientación de las bobinas. Su ventaja es su simplicidad, tamaño y modesta fuente de energía. Su desventaja son la variación con los cambios de temperatura y su pobre resolución.

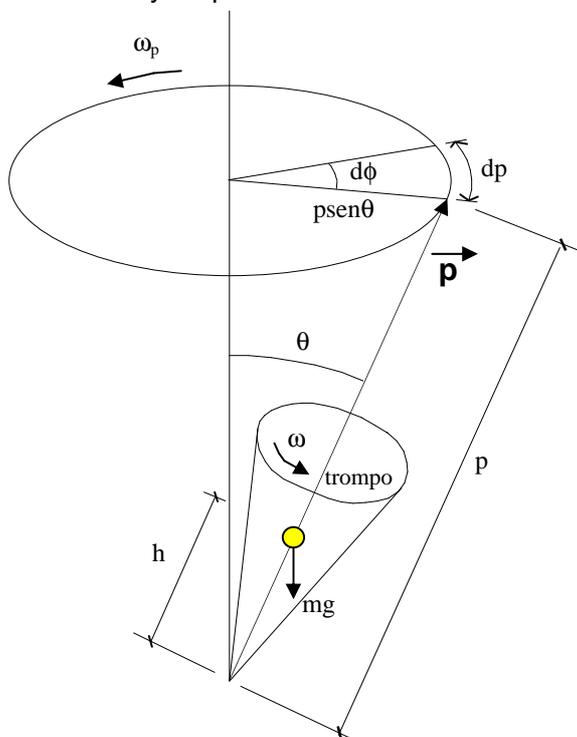
4) Magnetómetros Protónicos o de Resonancia

El principio de estos magnetómetros consiste en monitorear la precesión de los momentos magnéticos atómicos. Para ello se parte del principio que un átomo o núcleo atómico con Momento Magnético y Momento Angular (Carga eléctrica en rotación), colocado en un campo magnético externo, precesa a una frecuencia (de Larmor) que es proporcional a la magnitud de dicho campo. La razón giromagnética del protón es una constante atómica, y el campo puede determinarse en forma absoluta con una precisión del 1 nT, si se mide con precisión la frecuencia de precesión.

El sensor consiste de una botella con agua o kerosene, ya que el hidrógeno es una sustancia paramagnética con un electrón por átomo. Todo el sensor está envuelto en una bobina a la que se le aplica una fuerte corriente continua, para generar un campo polarizante que asegure la orientación de todos los momentos atómicos.

Cuando se corta la corriente, los protones del líquido tienden a orientarse según el campo de la Tierra presente, pero al ser este muy débil y existir una masa atómica, se produce el fenómeno del trompo y precesan alrededor de este campo con una frecuencia que es proporcional a la intensidad de dicho campo, siendo la razón giromagnética la constante de proporcionalidad. La misma bobina utilizada para polarizar los momentos atómicos es utilizada para medir la corriente alterna inducida por la precesión.

El principio con que funciona es el de la precesión de un trompo que analizamos primero. La rotación del trompo con velocidad ω sobre su eje genera el vector momento angular cinético \mathbf{p} . Si se lo saca de la vertical, actúa la gravedad con una cupla que tiende a voltearlo. No se cae y precesa con otra velocidad angular ω_p . El fenómeno físico que se da es la igualdad de las cuplas gravimétrica y de precesión.



La cupla gravimétrica es:

$$m.g.h.sen\theta$$

La cupla debida a la precesión viene dada por producto vectorial

$$\vec{\omega}_p \times \vec{p} = \omega_p.p.sen\theta$$

que es lo mismo que la fuerza que genera sobre el eje de giro la velocidad angular ω_p por la distancia perpendicular $p.sen\theta$. Ambas cuplas son iguales,

$$m.g.h.sen\theta = \omega_p.p.sen\theta$$

$$\omega_p = m.g.h / p$$

Como $\omega_p = 2.\pi.f_p$, la frecuencia de precesión será

$$f_p = m.g.h / 2.\pi.p$$

Un protón con momento magnético dentro de un campo magnético funciona de un modo similar al de la precesión del trompo. La rotación del electrón sobre el núcleo del átomo genera el vector momento angular cinético **a**. El campo magnético **F** existente, de la Tierra en nuestro caso, tiende a orientar el vector momento magnético **μ** propio del átomo. En razón de que el origen de **a** es una rotación, el vector **μ** comienza a precesar alrededor de **F**.

Al igual que en el caso del trompo, el equilibrio en la precesión se da por la igualdad de las cuplas. La cupla magnética es el producto vectorial de los vectores campo en juego: **μ** y **F**

La cupla por la precesión es el producto vectorial de los vectores rotación angular en juego: **ω_p** y **a**
Entonces:

$$\vec{\mu} \times \vec{F} = \vec{\omega}_p \times \vec{a} \quad \text{ó} \quad \mu \cdot F \cdot \text{sen}\theta = \omega_p \cdot a \cdot \text{sen}\theta$$

Como $\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot f_p = \mu \cdot F / a \Rightarrow f_p = \mu \cdot F / (2 \cdot \pi \cdot a)$

La razón giromagnética del protón γ_p es una constante de toda sustancia magnética. En el caso del hidrógeno es:

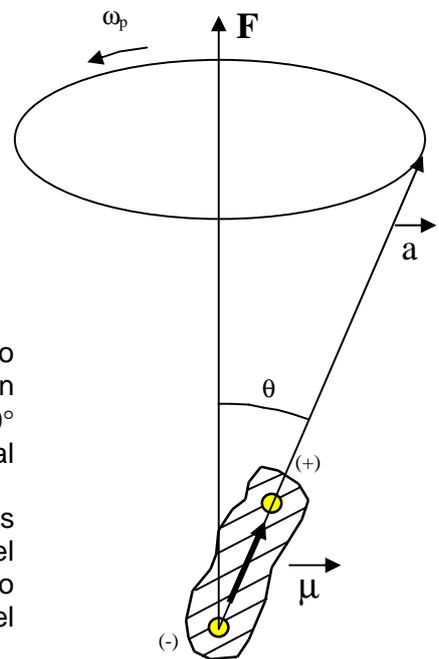
$$\gamma_p = \mu / (2 \cdot \pi \cdot a) = 2,67513 \times 10^8 \text{T}^{-1} \text{s}^{-1}$$

Entonces

$F = 23,4874 f_p$

Este magnetómetro es un medidor escalar del valor absoluto del campo magnético, y para obtener la mayor sensibilidad en la medición debe colocarse el eje de la bobina del sensor a 90° del campo de la Tierra, lográndose generar así la máxima señal en la precesión.

El sensor es sencillo, robusto y no le afectan los cambios térmicos ni de altitud. Por ello este tipo de magnetómetro es el más usado tanto para mediciones sobre el suelo y el agua o desde el aire en aviones. Además permite detectar cambios del campo magnético de hasta ±1nT.



La antigüedad de los estudios geomagnéticos

El conocimiento del campo magnético de la Tierra es tan antiguo como el del imán mismo. La magnetita, un mineral de hierro fuertemente magnético, fue descubierto en la antigua Grecia por lo menos 600 a. J.C. Como esta roca era una parte, aunque muy pequeña de la corteza terrestre, los griegos demostraron que el magnetismo estaba estrechamente relacionado con la Tierra, pero sin pensar que toda la Tierra actuaba como un imán.

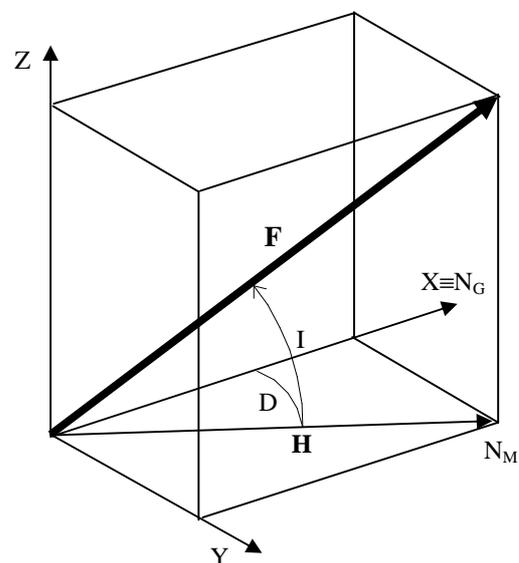
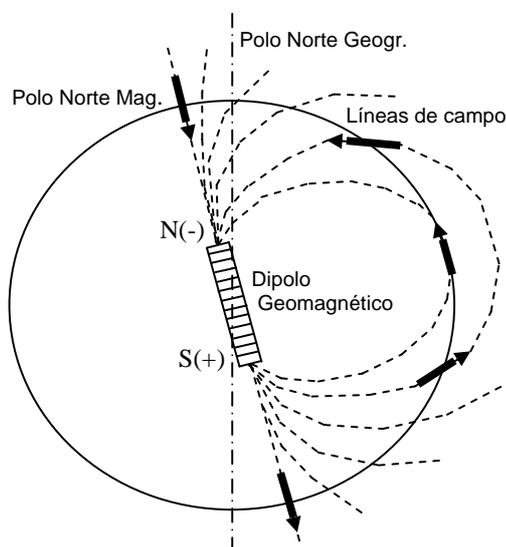
En efecto, el campo magnético fue utilizado mucho antes de que se lo descubriera como tal. Los chinos inventaron en el siglo I de esta era, una brújula sencilla que apuntaba aproximadamente al Norte. Recién en el año 1600 William Gilbert, un médico inglés, demostró que el comportamiento de la brújula en la Tierra era similar al de una aguja de hierro colocada sobre una esfera de magnetita.

Las mediciones sistemáticas del campo magnético terrestre (**c.m.t.**) comenzaron en el siglo 19, hace menos de 200 años. Por lo tanto todo el conocimiento directo que tenemos del campo es de menos del 0,000005% de la edad de la Tierra.

Los elementos magnéticos del c.m.t.

Como todo campo magnético se representa como un vector, antes de hacer cualquier consideración sobre el c.m.t., debemos definir un sistema común de referencia sobre la Tierra, y así asegurar que los datos tomados en todo el mundo puedan ser comparables. Teóricamente, hay varias formas de hacerlo, pero en la práctica es común descomponer la **inducción magnética terrestre F ó B** respecto a tres ejes perpendiculares entre sí: el Norte Geográfico **X** , el Este Geográfico **Y** y la Vertical **Z** .

La inducción magnética **F ó B** en cualquier punto **O** sobre la superficie de la Tierra es un vector con su magnitud y dirección correspondientes. Una brújula libre de rotar en un plano horizontal en **O** , quedará en reposo a lo largo de **H , componente horizontal del c.m.t.** El plano que contiene a **F y H** se denomina **meridiano magnético** en **O** , así como el que contiene a **Z y X** es el **mediano geográfico**. El ángulo entre los dos meridianos, magnético y geográfico, es la **declinación magnética D** , que se mide positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste. El ángulo que forma **F** con la horizontal **H** se llama **inclinación magnética I** , positiva cuando **F** está debajo de la horizontal.



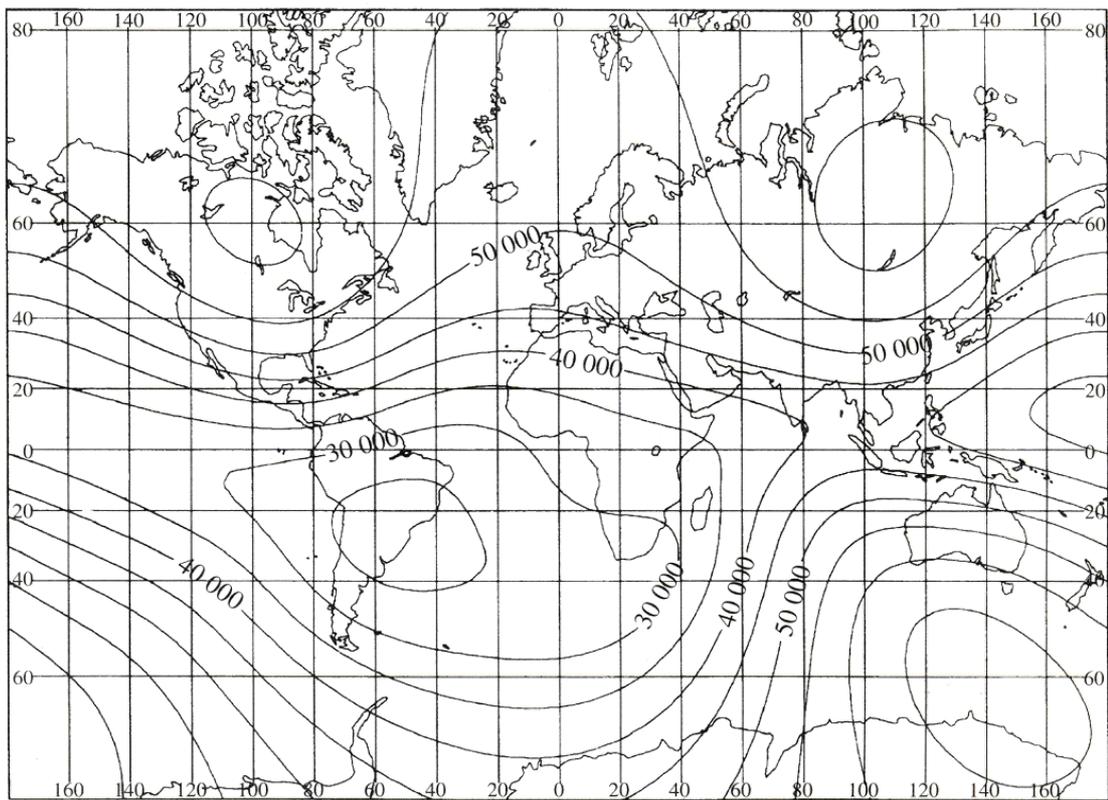
F ó B , H , D , I , X , Y y Z se conocen como los **elementos magnéticos** del campo terrestre. Por trigonometría, conociendo tres de estos elementos, pueden determinarse los restantes:

A los fines prácticos, las direcciones r y θ vistas en la teoría del potencial magnético son la vertical del lugar y la tangente a la superficie terrestre respectivamente. Entonces **$H_r = Z$** es la componente vertical y **$H_\theta = H$** es la componente horizontal.

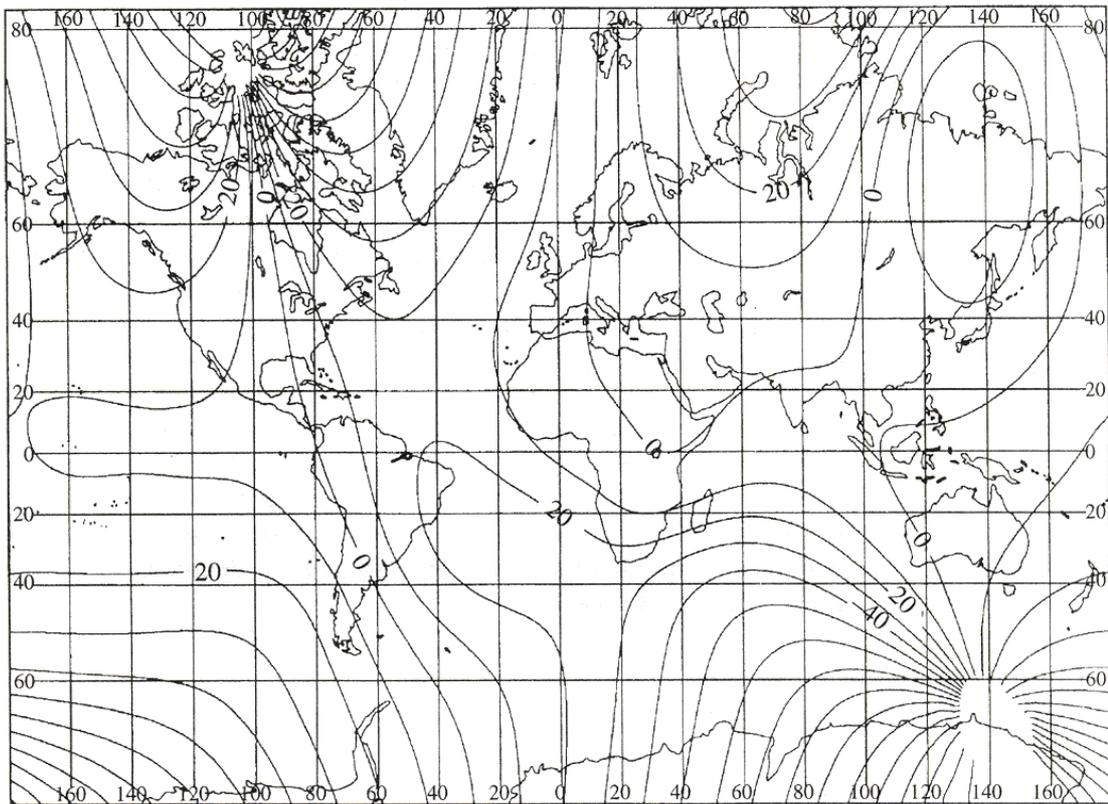
Usando el sistema C.G.S. de unidades, el Momento Magnético **M** de la Tierra es de 8×10^{25} unidades electromagnéticas. Entonces r será el radio terrestre en centímetros y θ será equivalente a la colatitud. La intensidad del campo resultante estará dado en Oersted, y debe ser multiplicada por 10^5 para que esté expresada en nanoTeslas.

El campo magnético terrestre actual

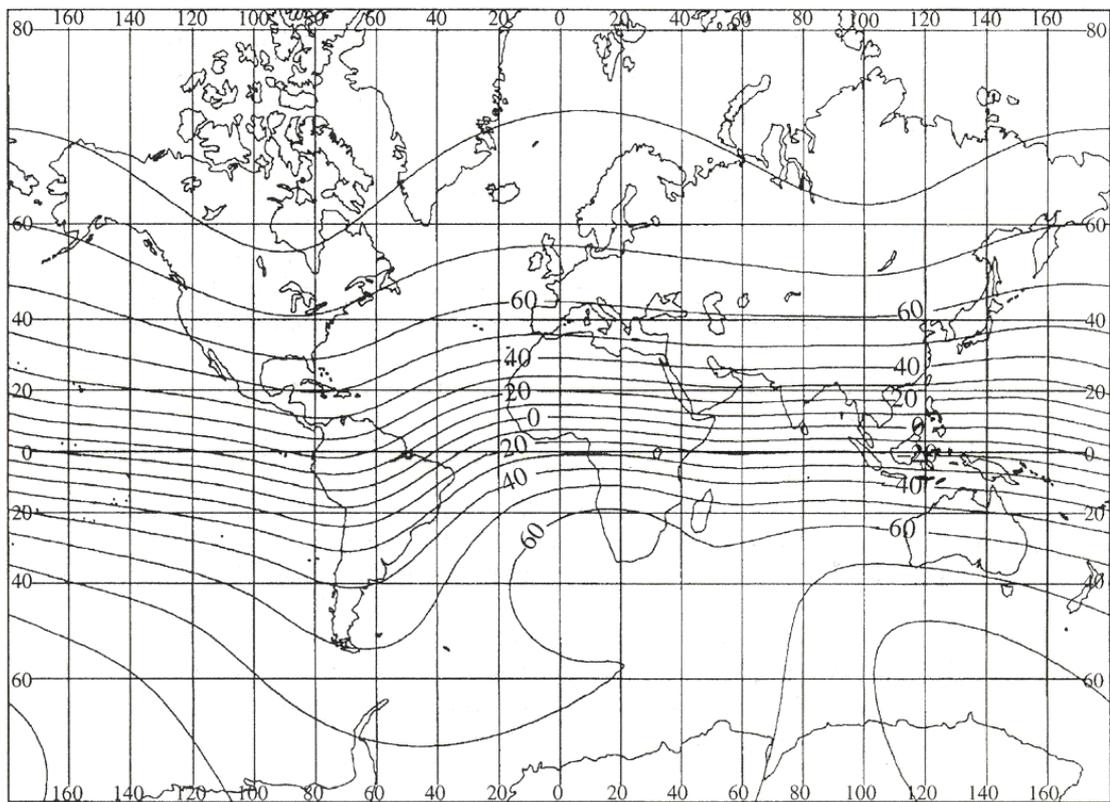
La forma más simple de visualizar las características actuales del campo, es volcando en mapas las mediciones realizadas en todo el mundo. Para mayor claridad se confeccionan curvas de igual valor de determinados elementos magnéticos. Estos mapas se llaman **cartas isomagnéticas o isodinas**. Las líneas que unen puntos de **igual declinación** se llaman **isógonas**. Similarmente, las de **igual inclinación** se llaman **isoclinas**.



Mapa de intensidad total del campo geomagnético F en nT (IGRF-1995).



Mapa de la declinación magnética D en grados (IGRF-1995).



Mapa de inclinación magnética I en grados (IGRF-1995)

Análisis matemático del campo

Observando estos mapas se ve que el c.m.t. tiene poca regularidad, aunque en una primera aproximación tiene la forma de un campo dipolar, o el de una esfera magnetizada. Dada la condición esférica del campo y la suficiente cantidad de información recogida durante más de 150 años, se puede simular matemáticamente una solución mediante el análisis de funciones armónicas esféricas.

Como el campo magnético es un campo potencial V , debe cumplir con la **Ecuación de Laplace** en coordenadas cartesianas sobre la superficie de una esfera:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Debido a la simetría esférica, resulta conveniente escribir los elementos magnéticos X, Y, Z como una función de la posición: las coordenadas esféricas r, θ y λ

$$X = \frac{\partial V}{r \cdot \partial \theta} \quad Y = \frac{\partial V}{r \cdot \text{sen}(\theta) \partial \lambda} \quad Z = \frac{\partial V}{\partial r}$$

Entonces

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2 \text{sen}(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\text{sen}(\theta) \frac{\partial V}{\partial \theta} \right] + \frac{1}{r^2 \text{sen}(\theta)^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} = 0$$

La solución de esta ecuación se obtiene por el método de separación de variables donde la función **S** representa la distribución de la función sobre la superficie de radio **r**:

$$V(r, \theta, \lambda) = R(r) S(\theta, \lambda)$$

Y pueden expresarse en forma de una suma de armónicos esféricos donde el potencial total **V** puede separarse como la suma de los potenciales correspondientes a los campos cuyas fuentes sean interna y externa **V_i** y **V_e**:

$$V_i = a \sum_{n=0}^{\infty} (a/r)^{n+1} S_n(\theta, \lambda) \quad \text{y} \quad V_e = a \sum_{n=0}^{\infty} (r/a)^n S_n(\theta, \lambda)$$

Donde **a** es el radio de la Tierra y **S_n(θ, λ)** son los armónicos esféricos de superficie

$$S_n(\theta, \lambda) = \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta) [g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sen m\lambda]$$

y donde **g_n^m** y **h_n^m** son los coeficientes de las armónicas esféricas y **P_n^m** es la función asociada de **Legendre** de grado **n** y orden **m**. Entonces el potencial total puede expresarse, según Gauss:

$$V = a \sum \sum [\{ g_n^{m(e)} \cos m\lambda + h_n^{m(e)} \sen m\lambda \} (r/a)^n + \{ g_n^{m(i)} \cos m\lambda + h_n^{m(i)} \sen m\lambda \} (a/r)^{n+1}] P_n^m(\theta)$$

Este potencial consta claramente de dos partes: una con coeficientes **(r/a)ⁿ** o contribución externa (e), y otra con coeficientes **(a/r)ⁿ⁺¹** o contribución interna (i).

Lo primero que surge aquí es que el cmt debe su origen casi exclusivamente a fuentes internas, ya que

$$g_n^{m(e)} \ll g_n^{m(i)} \quad \text{y} \quad h_n^{m(e)} \ll h_n^{m(i)}$$

Resultando despreciables los coeficientes de origen externo, analizamos el potencial solo en su aspecto interno. Particularmente para el polinomio de orden **m = 0** se pone en evidencia con claridad la preponderancia de la armónica de grado **n = 1**, que corresponde a un campo dipolar centrado y que representa casi el 80% del campo total interno.

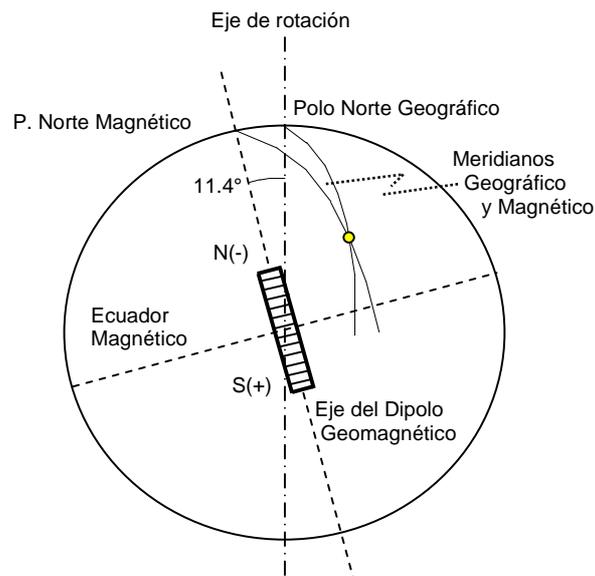
Las armónicas de mayor grado **n = 2, 3,** se pueden materializar mediante imanes más débiles colocados transversalmente al principal.

En la actualidad gracias a los servicios de los observatorios magnéticos móviles constituidos por magnetómetros transportados por barcos, aviones y satélites se cuenta con un cúmulo de información que ha permitido definir un dipolo teórico ideal geocéntrico con los coeficientes armónicos hasta el límite de **n = m = 12**.

Sobre esta base la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía estableció un **Campo Geomagnético de Referencia Internacional** conocido como **I.G.R.F.**, que permite determinar valores del campo teórico, llamados geomagnéticos a diferencia de los valores reales medidos llamados simplemente magnéticos.

A partir de este análisis, el c.m.t. tiene las siguientes características:

- 1 – El **95%** del campo total es de **origen interno** y solo el **5%** es de **origen externo**.
- 2 – El c.m.t. es principalmente dipolar, es decir, como el producido por un imán o un solenoide, aunque en la realidad se trate de un proceso complejo y difícil de imaginar. Este se conoce como el **dipolo geomagnético**.
- 3 – El dipolo geomagnético ideal forma un ángulo de **11,4°** con el eje de rotación de la Tierra, y su centro está desplazado unos **400 km** del centro de la Tierra. Los puntos en los cuales el eje dipolar geomagnético corta la superficie de la Tierra se denominan **Polos Geomagnéticos Norte y Sud**. El círculo máximo perpendicular a este eje se conoce como **Ecuador Geomagnético**. Por definición, los polos Norte magnético y geomagnético son de signo negativo, y que la definición de polo de un imán es diferente a la de polo en la Tierra.

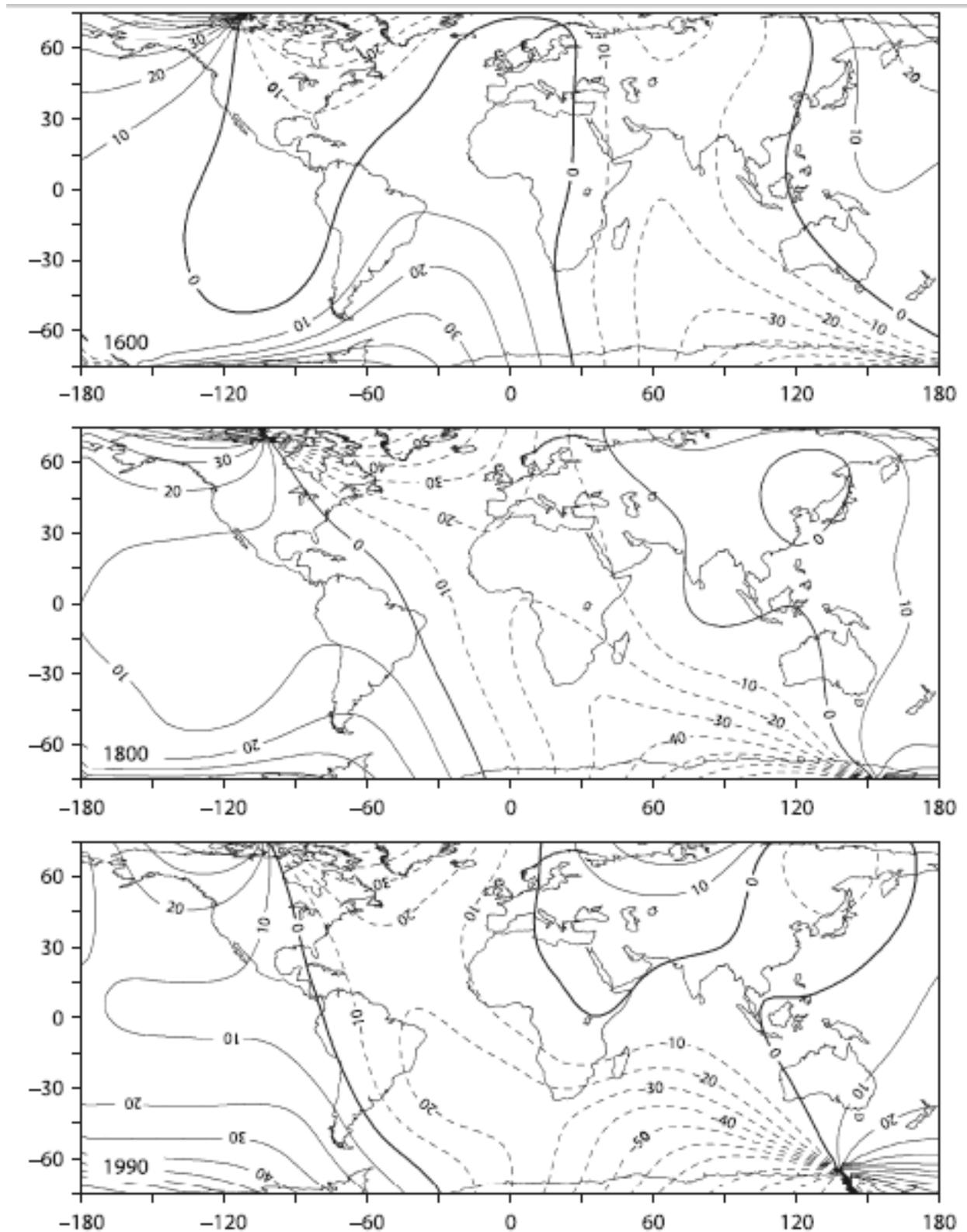


- 4 – La unidad del c.m.t. en el sistema CGS es el oersted, pero debido a su baja intensidad se utiliza el **gamma (γ)** o últimamente el **Tesla (T)** cuya relación es **1gamma = 10^{-5} oersted = 10^{-9} Tesla = 1nanoTesla (nT)**.
- 5 – Si el dipolo geomagnético fuera el único causante del c.m.t., la inducción magnética sería de unos **62.000 nT** en los **Polos** y **31.000 nT** en el **Ecuador**.
- 6 – Además del campo generado por el dipolo geomagnético, también existe un **campo no dipolar** que es el responsable de la mayor parte de las irregularidades del c.m.t. Si restamos al c.m.t. el campo dipolar geomagnético, lo que nos queda es el campo no dipolar. Las componentes de este campo también se muestran en cartas magnéticas donde se ve que este campo tiene centros de alta inducción positiva y negativa llamados vórtices, que son en definitiva los causantes de las irregularidades del c.m.t.
- 7 – En los polos geomagnéticos Norte y Sur la inclinación debería ser de $+90^\circ$ y -90° respectivamente, lo que no ocurre justamente por la influencia del campo no dipolar. Y más aún, existen lugares de la Tierra donde la inclinación de los campos dipolar y no dipolar se suman para dar una inclinación total de $\pm 90^\circ$, lo que se conoce como **polos de máxima inclinación magnética**. Obviamente estos polos no son antípodas.

Variaciones del campo magnético

En 1635, Henry Gellibrand publicó su descubrimiento de que la declinación en Londres había cambiado desde $13,3^\circ$ hasta $4,1^\circ$ Este entre los años 1580 y 1634. Esta fue la primera vez que alguien observaba que el campo magnético terrestre no era estático, aunque debe admitirse que los únicos elementos medidos en la época eran solo declinación e inclinación, y con no mucha precisión. En el siglo 19 comenzaron las mediciones más precisas y sistemáticas, con lo que se confirmó que todos los elementos del campo variaban con el tiempo. A estos cambios se los conoce como **variaciones seculares**, donde la palabra secular se refiere simplemente a tiempo. Concretamente desde 1838, cuando Gauss llevó a cabo sus primeros análisis matemáticos del campo, se comenzó a representar gráficamente los cambios que ocurrían a través del tiempo. En la página web www.ngdc.noaa.gov/geomag/magfield.shtml de la **National Oceanic & Atmospheric Administration del United States Department of Commerce** pueden obtenerse valores actuales del campo geomagnético y de la Declinación e Inclinación magnética.

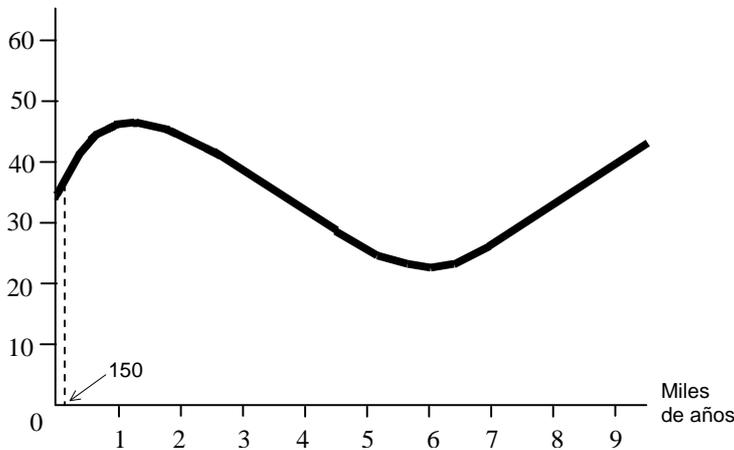
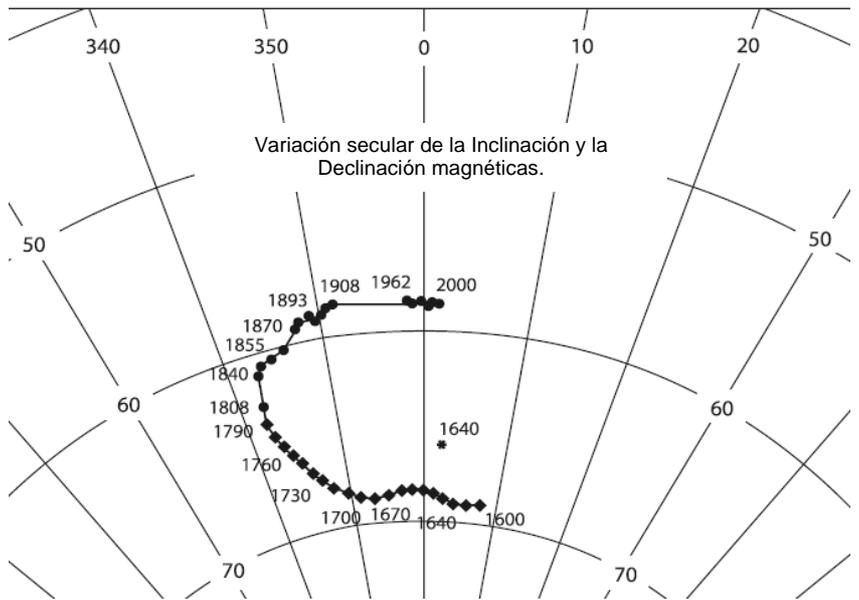
En los siguientes mapas mundiales con la Declinación en los años 1600, 1800 y 1900 se ve claramente la deriva hacia el Oeste del c.m.t.



Durante el período de observación directa el campo fue dipolar, pero el eje del dipolo geomagnético se desplazó un poco. La latitud del polo Norte geomagnético se mantuvo casi constante, por lo tanto el ángulo entre los ejes magnético y de rotación se mantuvo alrededor de los 11°. En cambio la longitud cambió unos 6° en los últimos 130 años, es decir a razón de 0,05° por año.

Aunque no hay mediciones directas del movimiento de los polos magnéticos antes del Siglo XIX, puede estimarse que en unos 7.800 años el dipolo geomagnético dará una vuelta completa alrededor del polo geográfico, lo que es bastante razonable pensar puesto que el eje de rotación de la Tierra es el único eje ordenador y claramente definido en el sistema. Para ciertos fines es importante considerar el c.m.t. por períodos mayores a 10^4 años, ya que entonces el eje magnético promedio coincidirá con el de rotación terrestre.

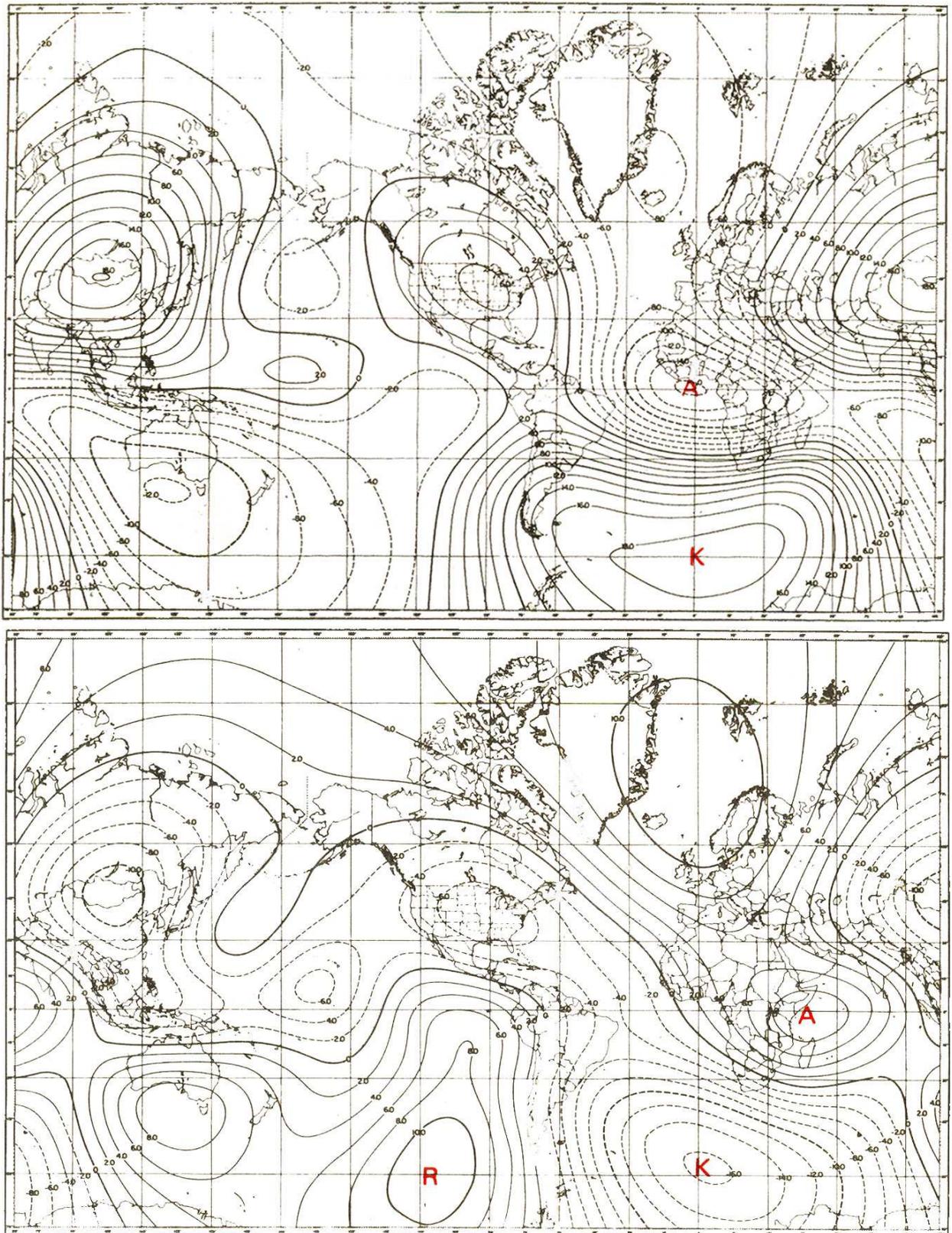
También durante el período de observación del c.m.t. la inducción magnética ha disminuido en toda la Tierra a razón del 5% por siglo.



Entonces, el efecto de variación secular puede dividirse en dos partes. Una que afecta al campo dipolar y consiste en una oscilación del momento magnético de la Tierra del orden del 0,05% anual y en una rotación del eje dipolar alrededor del eje terrestre del orden de 0,05° por año. La otra que afecta al campo no dipolar, que también oscila y se desplaza, aunque en forma aleatoria.

Variación secular de la inducción magnética de la Tierra en el Ecuador.

Respecto a este último, puede verse claramente en los siguientes mapas que el vórtice designado como A se ha desplazado de la costa Este a la costa Oeste de África, y que su intensidad máxima a variado de -80 nT a +160nT. El vórtice designado como K se desplazó muy poco pero cambió de -160 nT a + 180 nT. Finalmente, el vórtice R de +100 nT ha desaparecido. Esto nos muestra que el campo no dipolar cambia continuamente, expandiéndose, contrayéndose, desapareciendo y reapareciendo, pero se estima que en promedio se desplaza hacia el Oeste a razón de 0,2° por año. Todos estos cambios ocurren en períodos que van de los 10 a 10^3 años, es decir como máximo a un orden de magnitud menor que los del campo dipolar.



Componente Z del campo no dipolar para 1965 y 1835.

Mediciones indirectas del c.m.t. en el pasado

Todo lo observado en el período de mediciones directas podría extrapolarse hacia atrás en el pasado, pero no habría seguridad alguna de la validez de este proceso. Con el descubrimiento en los años 60, de que muchas rocas adquieren y conservan la dirección y la magnitud del campo magnético del momento cuando se formaron, pudo conocerse cómo varió el campo en el pasado. El estudio de la magnetización de las rocas se conoce como **Paleomagnetismo**.

La mayoría de las rocas contienen una pequeña cantidad de hierro. Las más usadas en los trabajos paleomagnéticos son las ígneas (especialmente los basaltos) y las sedimentarias (especialmente los silicatos). Los minerales de hierro más importantes para estos estudios son la magnetita Fe_3O_4 y la hematita Fe_2O_3 .

Cuando se forma una roca, ya sea por sedimentación o por enfriamiento al pasar del estado líquido al sólido, los minerales de hierro se magnetizan en la dirección del c.m.t. existente en ese momento, y la intensidad de la magnetización adquirida es proporcional a la magnitud del mismo campo. Esta magnetización es muy débil y por lo tanto se requieren instrumentos muy sensibles para medirla. Pero por otra parte es muy estable, tanto que se mantiene millones de años.

Determinada la edad de una roca por datación radimétrica, y medida la magnetización remanente en los minerales de hierro, se pudo conocer cuál fue el campo magnético en el pasado.

Aunque la Tierra tiene alrededor de 4.500 Ma (millones de años), las rocas accesibles más antiguas tienen solo unos 3.500 Ma, y las examinadas paleomagnéticamente tienen unos 2.600 Ma. Por lo tanto, a través de esta técnica se tiene información del c.m.t. desde esa época. En los laboratorios paleomagnéticos puede determinarse además, la Declinación e Inclinación del c.m.t. antiguo, y consecuentemente conocerse la posición del polo magnético de la época.

La primera pregunta que surgió fue si el c.m.t. fue siempre dipolar. A los efectos de poder comparar las direcciones de magnetización de las rocas, se partió del supuesto de que esto fue así. Esta suposición resultó correcta porque todas las rocas con una misma edad, independiente de su posición sobre la Tierra, tenían aproximadamente el mismo polo paleomagnético.

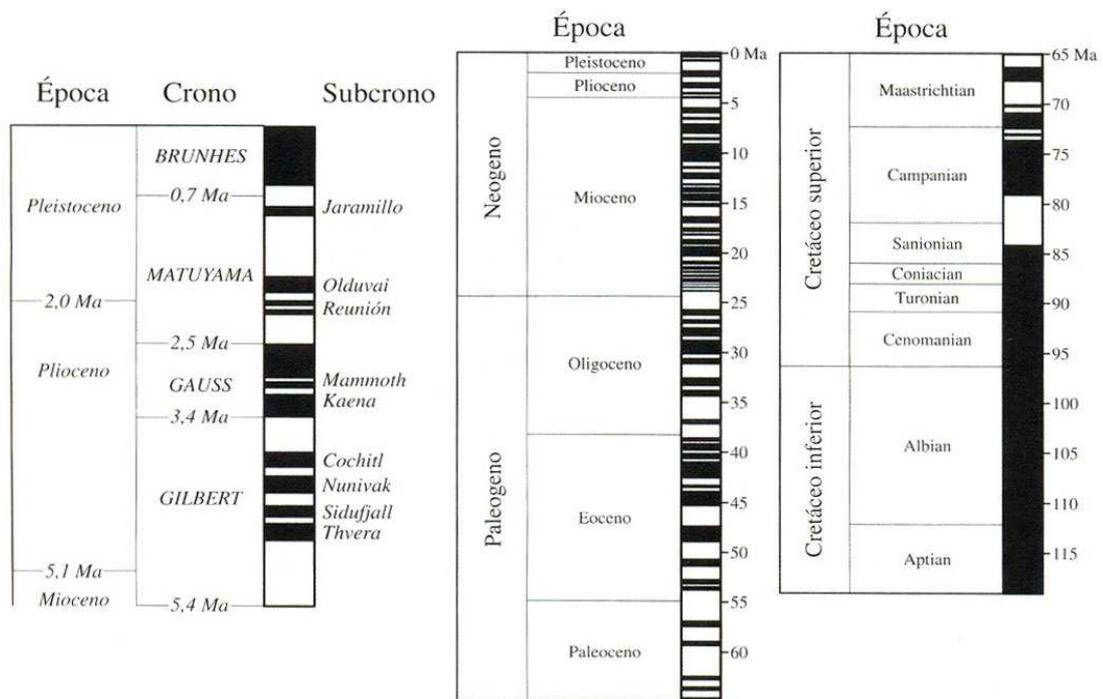
Si pudiéramos ver los polos Norte paleomagnéticos de los últimos 7.000 años desde una vista polar de la Tierra, notaríamos que todos están dentro de un círculo de unos 11° desde el Polo Geográfico, es lo que se ha llamado cabeceo del dipolo geomagnético. Promediando estos polos desaparece el cabeceo y tendremos el dipolo centrado que se conoce como **dipolo axial**.

Al representar de esta misma manera los polos de rocas con millones de años de edad, se observó que estos polos se iban alejando cada vez más del Polo Geográfico, y más aún, los polos paleomagnéticos de diferentes continentes lo hacían en diferentes direcciones. Esto no significaba que el campo no fuera dipolar, sino que, junto a otras evidencias como el encaje de las costas de un continente con otro (por ejemplo Sudamérica y Sudáfrica) y la correlación de rocas entre continentes, fueron la prueba que hacía falta para demostrar la **deriva de los continentes**.

Promediando los polos paleomagnéticos por intervalos iguales o mayores a los 10^4 años, y corrigiendo la posición por deriva continental, las direcciones obtenidas son consistentes por lo que se concluye que el c.m.t. fue siempre dipolar.

Continuando con la determinación de la inducción en el pasado, se descubrió algo inesperado: algunas rocas tenían magnetización inversa, es decir que la dirección del campo era opuesta a la esperada. En otras palabras, el polo Norte magnético era positivo y el Sur negativo. Esto tenía dos posibles interpretaciones: que el campo estaba invertido cuando se formó la roca, o existía una propiedad intrínseca desconocida de las rocas que se magnetizaban en dirección opuesta a la del campo del momento.

La última fue descartada rápidamente porque para una misma época todas las rocas sin excepción tenían la misma polaridad. Así se construyó una escala de polaridad-tiempo que comprende: **épocas** de períodos del orden del millón de años con el campo predominantemente de una polaridad, y **eventos** con períodos más cortos con polaridad normal e inversa. Es decir que una época con polaridad normal tiene eventos donde predomina la polaridad normal, pero también tiene eventos con polaridad inversa. Últimamente se los llama **cronos** y **subcronos**.



Cronología de las reversiones del c.m.t. los últimos 120 millones de años.

Origen del campo magnético terrestre

Cualquier teoría que se elabore sobre el origen del c.m.t. debe permitir explicar todas las propiedades conocidas del campo, y al mismo tiempo ser consistente con lo que se conoce sobre la estructura y propiedades de la Tierra. Estas dos limitaciones hacen que la búsqueda de una teoría satisfactoria sea difícil y complicada.

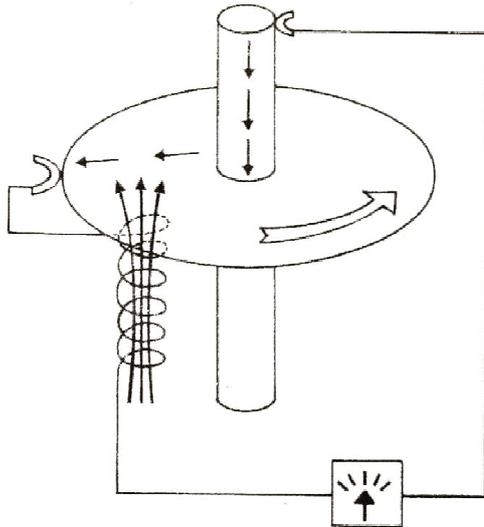
La explicación más sencilla posible era que la Tierra sea un imán permanente. Esta fue propuesta por William Gilbert en el Siglo XVII y prevaleció hasta fines del Siglo XIX. La base de esta teoría fue el hecho descubierto por el mismo Gilbert de que la Tierra se comportaba como una esfera uniformemente magnetizada. La principal objeción insalvable fue que a unas pocas decenas de kilómetros de profundidad, por simple gradiente geotérmico de 1° cada 30 metros de profundidad, las rocas alcanzan la temperatura de Curie (500 a 700° hierro) a la cual se vuelven paramagnéticas. Entonces el magnetismo terrestre debía estar en una delgada capa externa de la Tierra, justamente la parte superficial que puede ser observada y que tiene una magnetización muy débil como para producir en c.m.t.

Otra teoría apareció a mediados del siglo XX se fundaba en que el magnetismo era una propiedad de los cuerpos en rotación. Pronto se probó que esta teoría no funcionaba en la Tierra porque, una de las predicciones era que la componente horizontal del c.m.t. debía disminuir con la profundidad, y al medírsela en pozos o minas profundas se encontró que aumentaba. Luego utilizando instrumentos muy precisos se intentó medir en laboratorio el campo que debía generar un cuerpo en rotación y no se detectó campo alguno.

Como el c.m.t. está cambiando permanentemente y el núcleo interno de la Tierra se comporta como un fluido conductor que estaría en movimiento, se elaboró una teoría sobre la base de la interacción magnética entre dos conductores que llevan corriente. Esto hace que aparezca una fuerza de atracción o repulsión entre ellos, según la dirección en que circule la corriente sea la misma u opuesta. Pero es un hecho experimental que este fenómeno ocurre también en forma inversa, es decir que si los conductores se mueven (siempre que se trate de un circuito completo), se inducirá una corriente en ellos. Cuando el movimiento se detiene la corriente desaparece. Este es el principio de una **dinamo**, que permite convertir una energía mecánica en una corriente eléctrica.

Las teorías con mayor aceptación mundial relativas al origen del c.m.t. principal sugieren que el mismo está asociado a la presencia de corrientes eléctricas en el núcleo de la Tierra. Varios autores sugieren que el proceso por el cual se genera el c.m.t. principal es similar al de una **dínamo auto excitada**.

Para que se establezca el proceso de una dínamo autoexcitada se requiere que el Núcleo esté constituido por material conductor de la electricidad en estado fluido, que exista una fuente de energía para originar movimientos convectivos en dicho material y un mecanismo ordenador de estos movimientos, y que haya habido una corriente eléctrica inicial con su campo magnético asociado.



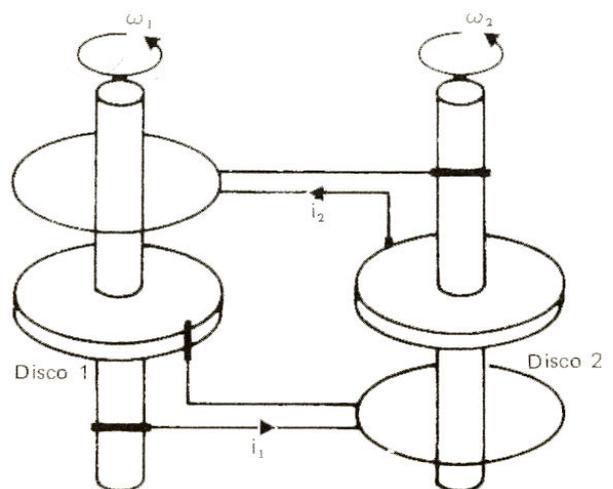
Los estudios sísmicos han demostrado que el Núcleo externo está en estado fluido y compuesto de un material buen conductor como lo son el hierro y níquel. Originariamente se pensó que la fuente de energía necesaria para producir la convección en dicho material era el calor originado en la desintegración radiactiva del Núcleo. Una de las teorías más aceptadas sobre el origen de la Tierra es la conocida como la del Núcleo frío, entonces, de acuerdo a esta teoría la cantidad de elementos radiactivos del Núcleo sería similar a la presente en los meteoritos y, por lo tanto, insuficiente para producir el calor necesario para los movimientos de la convección. Entonces la fuente de energía necesaria podría originarse en los fenómenos de cristalización y cambios químicos o en el proceso de solidificación. Cualquiera de ellos es suficiente para justificar el mecanismo de la convección.

En cuanto al mecanismo para ordenar las corrientes de convección, es obvio que sería el de la rotación terrestre. Este ordenamiento se produciría por efecto de la Fuerza de Coriolis. Como consecuencia de ello, el campo magnético resultante tendrá simetría respecto del eje de rotación terrestre.

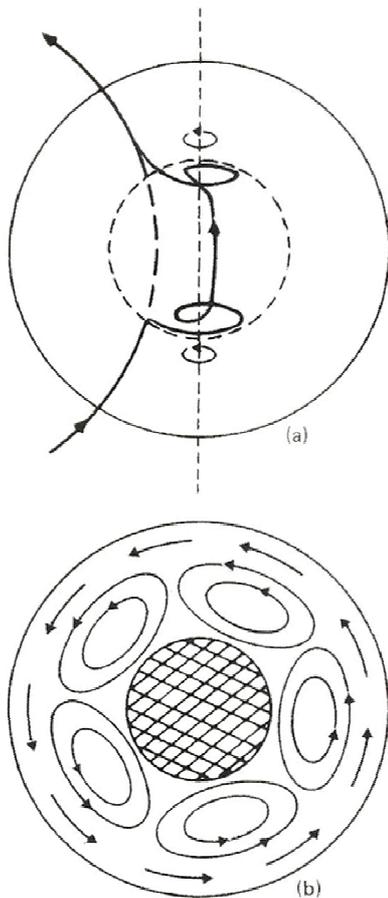
Veamos ahora cuál es el mecanismo de una dínamo autoexcitada. Una dínamo convierte energía mecánica en una corriente eléctrica. El modelo más simple es la dínamo inventada por Faraday: Un disco de material conductor de la electricidad, cobre, que rota por encima de un imán ubicado cerca de su borde. El movimiento del conductor cortando las líneas del campo magnético del imán induce una pequeña corriente eléctrica en el disco. Si el imán se reemplaza por una bobina por la que circula una corriente, el efecto será el mismo.

Si la misma corriente inducida se utiliza para alimentar la bobina, se obtiene un sistema auto alimentado. Este modelo se disipara rápidamente por la resistencia del conductor y porque la corriente es muy débil. Agrandando el modelo puede lograrse el efecto deseado.

El núcleo terrestre tiene un diámetro de 6.904 kilómetros, y las evidencias indirectas sugieren que su parte externa estaría constituida por material buen conductor (hierro y níquel) en estado fluido. El movimiento de este material, iniciado por convección, sería ordenado por la rotación terrestre. Luego, en el Núcleo se darían las condiciones físico-mecánicas para que existan una o más dínamos autoexcitadas.



En la siguiente figura vemos una línea de campo magnético dipolar es arrastrada por la rotación de una esfera dentro de un casquete esférico estacionario. Tanto la esfera como el casquete son conductores y el contacto eléctrico es perfecto entre ellos.



Teniendo en cuenta que la línea de fuerza tiende a desplazarse por el movimiento, ello dará origen a un campo toroidal de mayor intensidad que el inicial, y que estará confinado dentro de la esfera conductora. En consecuencia, en el Núcleo se cumplen todas las condiciones físico-mecánicas y electromagnéticas necesarias para que se establezcan mecanismos similares a los de las dínamos autoexcitadas.

La rotación terrestre hace que los diferentes circuitos cerrados de corriente que puedan establecer en el Núcleo fluyan en la misma dirección, de modo que todo el conjunto sería equivalente a corrientes que fluyen por la parte exterior de un gran círculo perpendicular al eje de rotación terrestre. A medida que nuevos circuitos de corrientes individuales nacen, crecen y desaparecen en forma sistemática o errática, el campo magnético resultante presentará variaciones menores de iguales características.

La teoría de la dínamo autoexcitada no es capaz de explicar los cambios de polaridad del c.m.t. En cambio dos dínamos autoacopladas, en ciertas condiciones, las corrientes que circulan por sus bobinas pueden cambiar de signo, y por lo tanto la polaridad de los campos magnéticos asociados a ellos. En la siguiente figura se ilustra este caso.

Resumiendo, se demostró que el sistema tiene dos estados de equilibrio con la corriente de uno de ellos del sentido opuesto a la del otro. La intensidad de la

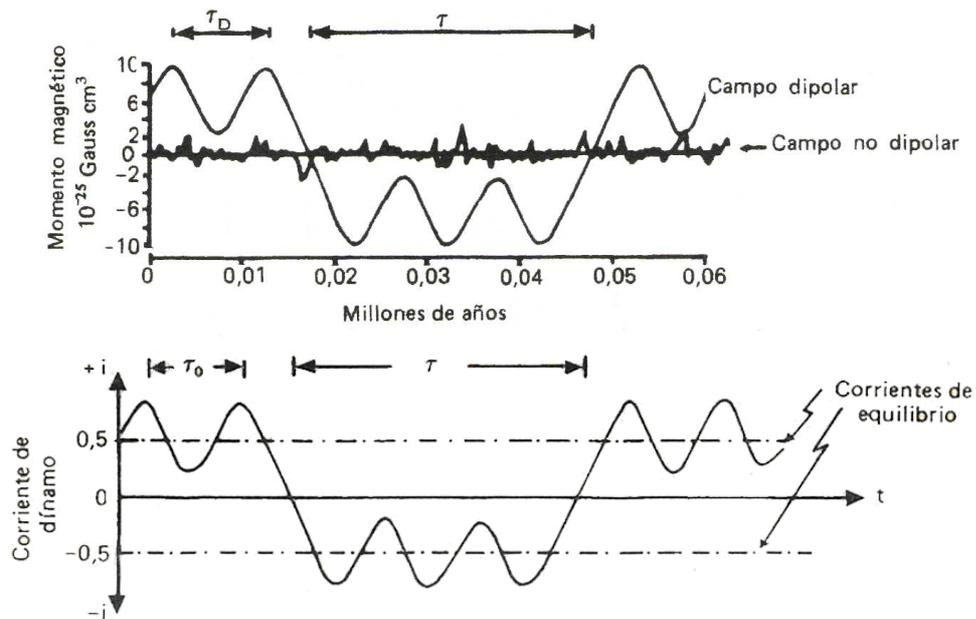
corriente en las dínamos tiene oscilaciones alrededor de los valores medios que definen dichos estados de equilibrio. El sistema es estable para oscilaciones pequeñas en las corrientes de las dínamos.

En la figura se muestra un ejemplo de este comportamiento para la corriente de la bobina de una de las dínamos. La corriente de la otra bobina se comporta en la misma forma en este ejemplo, pero se han encontrado casos en que la corriente de la bobina de una de las dínamos oscila cambiando de signo, mientras que la corriente de la otra nunca cambia de signo.

Según la teoría de las dínamos autoexcitadas acopladas electromagnéticamente, la reversión de la polaridad del c.m.t. podría ser un fenómeno ocasional en el curso de sus permanentes oscilaciones de amplitud. Así se podría producir cambios de polaridad de corta duración (eventos), como verdaderas reversiones en su comportamiento de mayor duración (épocas, intervalos), las que corresponderían a cambios duraderos desde un estado de equilibrio a otro. El comportamiento de estas dínamos acopladas concuerda con las características del c.m.t. durante sus períodos de polaridad normal y reversa, y sugiere que estos dos estados tienen iguales niveles de energía. Ello sugiere que el c.m.t. se habría comportado en el pasado como un oscilador notablemente simétrico.

En un sistema de dos dínamos autoexcitadas rígidas, acopladas electromagnéticamente, la distribución del lapso transcurrido entre dos reversiones sucesivas depende del período de las oscilaciones de amplitud de la corriente respecto de los valores medios de los dos estados de equilibrio del sistema y del número de oscilaciones presentes entre dos reversiones sucesivas.

Pero las dínamos fluidas que originarían el c.m.t. son mucho más complejas, de modo que el análisis hecho para las rígidas tiene poco valor. Sin embargo, es razonable pensar que, dada la sensible dependencia de los lapsos τ igual polaridad de una dínamo rígida a los cambios de condiciones físicas del sistema, en una dínamo fluida estos lapsos tendrían que ser sensibles a las componentes erráticas del movimiento de los fluidos. Esto llevó a sugerir que el c.m.t. tiene las características de un oscilador bipolar estable, que sufre cambios de polaridad cuando es excitado por fluctuaciones erráticas de gran intensidad y con la polaridad adecuada, como sería el campo no dipolar.



Existe la probabilidad de que la suma de las componentes axiales de los campos no dipolares individuales supere en magnitud al campo bipolar y, si su polaridad es adecuada, origine una reversión del c.m.t. Entonces, El proceso mediante el cual el campo magnético terrestre cambia de polaridad estaría determinado por las características del campo no dipolar, cuyas variaciones y fuentes son independientes de las del campo dipolar.

El desplazamiento hacia el Oeste del campo es una particularidad común del campo no dipolar y de la variación secular, es decir que ambos están íntimamente relacionados. Por sus características, la fuente del campo no dipolar debe estar en el Núcleo fluido y asociada a remolinos turbulentos que serían procesos erráticos en el movimiento del material fluido. El nacimiento, desarrollo y extinción de dichos remolinos explicarían las variaciones en la intensidad del campo no dipolar.

Remolinos del orden de los 400 km de diámetro en la parte superior del Núcleo Externo pueden justificar las anomalías del campo no dipolar observadas. Para explicar este fenómeno algunos autores sugieren que la parte exterior del Núcleo rota con velocidad angular menor que la del Manto y la Corteza, y que el acoplamiento entre el Núcleo y el Manto inferior no es rígido, es del tipo electromagnético en el cual el elemento de acoplamiento es justamente el campo dipolar.

La corriente eléctrica inicial para la dínamo es factible que haya sido originada en un proceso electroquímico, y su campo asociado habría sido amplificado gracias a la energía cinética del Núcleo.

No puede asegurarse que el c.m.t. funcione exactamente como un sistema de dínamos auto-excitadas y acopladas, pero es una teoría que se ajusta bastante a las particularidades del interior de la Tierra y su dinámica.

Bibliografía

An Introduction to Applied and Environmental Geophysics - John M. Reynolds – Wiley - 1997

Fundamentos de Geofísica - Agustín Udías – Julio Mezcuca -Alianza Universidad Textos -1997

El Magnetismo de las Rocas – Daniel Valencio – Editorial Universitaria de Buenos Aires - 1980

Geomagnetism – G.N. Petrova, V.N. Brovov and M.I. Pudovkin – U.G.G.I. – UNESCO - 1980

Tratado de Geofísica Aplicada - José Cantos Figuerola – Litoprint - 1978

Introduction to Geophysical Prospecting - Milton Dobrin - McGraw – Hill B. Company –1976

Applied Geophysics - W. M. Telford – L. P. Geldart, R. E. Sheriff, D. A. Keys - 1976

Geofísica Minera - D. S. Parasnis – Paraninfo - 1971

Introducción a la Geofísica – Benjamín F. Howell, Jr. – Ediciones Omega - 1962

Exploration Geophysics - J. J. Yakosky - Trija Publishing Company - 1957