



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
GEOFÍSICA DE LA TIERRA SÓLIDA**

**MÉTODO PARA LA ELABORACIÓN DE CARTAS MAGNÉTICAS
EN MÉXICO**

T E S I S

Que para optar por el grado de Maestro en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

PAREDES ARRIAGA, ALEJANDRO

Directora de Tesis:

Dra. Ana Luz Caccavari Garza (Instituto de Geofísica, UNAM)

Miembros del jurado:

Dra. Leticia Flores Márquez (Instituto de Geofísica, UNAM)

Dr. Gerardo Cifuentes Nava (Instituto de Geofísica - Unidad Morelia, UNAM)

Dr. Alejandro Rodríguez Trejo (Centro de Geociencias, UNAM)

Dr. Martín Alberto Díaz Viera (Instituto Mexicano del Petróleo)

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., diciembre 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos institucionales:

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM, por aceptarme en su programa de estudios, los cursos que recibí y la experiencia que adquirí gracias a sus apoyos es invaluable.

Al CONACyT, por la beca otorgada para la realización de este trabajo e impulsar el desarrollo científico y tecnológico en México.

Al Instituto de Geofísica, UNAM por permitirme el uso de sus instalaciones para poder trabajar y desarrollar este proyecto en las mejores condiciones posibles.

Al grupo de trabajo del departamento de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica, UNAM, por las enseñanzas y asesoramiento, también por las experiencias y anécdotas. En particular a mi asesora, la Dra. Ana Caccavari, quien me brindó de constante retroalimentación y asesoría.

Al cada uno de los miembros del jurado que revisó esta tesis, por sus invaluable aportaciones, comentarios y sugerencias, siempre en pro de mejorar. En particular, a la Dra. Leticia Flores, por su constante asesoramiento y apoyo.

Al personal administrativo del PCT, por su constante y cordial atención, ya que siempre están dispuestos a apoyar a los estudiantes con nuestras infinitas dudas. En particular a Araceli Chamán y a Erika Ulloa por su siempre amable asesoría.

ÍNDICE

| | |
|---|---------------|
| RESUMEN | - 3 - |
| 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS | - 4 - |
| 2 MARCO TEÓRICO | - 5 - |
| 2.1 GEOMAGNETISMO: UN CONCEPTO CON MUCHA HISTORIA. | - 5 - |
| 2.2 EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE | - 11 - |
| 2.2.1 FUENTES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE | - 12 - |
| 2.2.2 VARIACIONES DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO | - 12 - |
| 2.2.3 DESCRIPCIÓN VECTORIAL | - 14 - |
| 2.2.4 DESCRIPCIÓN POTENCIAL..... | - 16 - |
| 2.3 BREVE RECUENTO SOBRE LOS DATOS GEOMAGNÉTICOS DE MÉXICO | - 20 - |
| 2.3.1 EL OBSERVATORIO MAGNÉTICO DE TELOYUCAN..... | - 21 - |
| 2.3.2 CARTAS MAGNÉTICAS DE MÉXICO | - 22 - |
| 2.4 ESTACIONES MAGNÉTICAS DE REPETICIÓN | - 24 - |
| 2.5 USOS Y APLICACIONES DE LOS DATOS Y MEDICIONES MAGNÉTICAS | - 26 - |
| 2.5.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN ESPACIAL USADOS EN LA GENERACIÓN DE CARTAS MAGNÉTICAS | - 28 - |
| 2.5.2 CARTAS MAGNÉTICAS | - 32 - |
| 3 METODOLOGÍA | - 38 - |
| 3.1 BÚSQUEDA Y RECOPIACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS Y ACTUALES | - 39 - |
| 3.2 BASE DE DATOS PARA UNA CARTA MAGNÉTICA | - 41 - |
| 3.3 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED) | - 43 - |
| 3.4 MÉTODO NUMÉRICO | - 46 - |
| 3.5 MAPAS | - 46 - |
| 3.6 DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES MAGNÉTICAS DE REPETICIÓN EN MÉXICO | - 47 - |
| 4 RESULTADOS | - 48 - |
| 4.1 RECOPIACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS Y ACTUALES DEL OBSERVATORIO MAGNÉTICO DE TELOYUCAN Y LAS ESTACIONES MAGNÉTICAS DE REPETICIÓN | - 49 - |
| 4.2 DATOS ASOCIADOS PARA LA GENERACIÓN DE LA CARTA MAGNÉTICA DE LA ÉPOCA 2010.0 | - 51 - |

| | |
|---|----------------|
| 4.3 CARTAS MAGNÉTICAS DE MÉXICO..... | - 53 - |
| 4.4 DATOS DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN ESPACIAL ASOCIADOS A CADA CARTA MAGNÉTICA | - 55 - |
| 4.5 DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTACIONES MAGNÉTICAS DE REPETICIÓN EN MÉXICO | - 56 - |
| | |
| <u>5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</u> | - 59 - |
| | |
| 5.1 SOBRE LAS CARTAS MAGNÉTICAS PARA MÉXICO. | - 59 - |
| 5.2 COMPARACIÓN ENTRE LAS CARTAS MAGNÉTICAS DE DECLINACIÓN ELABORADAS EN ESTE TRABAJO CON LAS YA DISPONIBLES | - 63 - |
| 5.3 SOBRE EL MÉTODO PARA LA GENERACIÓN DE LAS CARTAS MAGNÉTICAS..... | - 73 - |
| 5.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES MAGNÉTICAS DE REPETICIÓN EN MÉXICO..... | - 77 - |
| 5.5 IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN DE DATOS HISTÓRICOS EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA | - 78 - |
| | |
| <u>6 CONCLUSIONES.....</u> | - 82 - |
| | |
| <u>7 REFERENCIAS</u> | - 84 - |
| | |
| <u>8. APÉDICES.....</u> | - 96 - |
| | |
| APÉNDICE A. CARTAS MAGNÉTICAS DE MÉXICO EN ALTA RESOLUCIÓN | - 96 - |
| APÉNDICE B. DATOS DE LAS ESTACIONES MAGNÉTICAS DE REPETICIÓN Y EL OBSERVATORIO MAGNÉTICO DE TELOYUCAN PARA LAS CARTAS MAGNÉTICAS DE MÉXICO | - 106 - |
| APÉNDICE C. PROCESAMIENTO DE DATOS ADQUIRIDOS EN UNA ESTACIÓN MAGNÉTICA DE REPETICIÓN..... | - 109 - |
| APÉNDICE D. DATOS AUSENTES EN LAS DIFERENTES FUENTES DE INFORMACIÓN SOBRE LOS REGISTROS DEL OBSERVATORIO MAGNÉTICO DE TELOYUCAN..... | - 114 - |
| APÉNDICE E. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS PERTENECIENTES A LAS CARTAS MAGNÉTICAS PARA LAS ÉPOCAS 1990.0, 1960.0, 1932.0 Y 1907.0 | - 116 - |

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para la elaboración de las cartas magnéticas en México, así como una compilación de datos históricos sobre mediciones del campo geomagnético. Para esta metodología se tiene en cuenta la distribución y número de estaciones magnéticas de repetición en épocas pasadas, el procesamiento numérico de los datos medidos, el análisis exploratorio de datos, los métodos numéricos para la estimación espacial de los datos y el despliegue gráfico de las cartas magnéticas. Como un producto de la metodología planteada se presenta la reproducción de las cartas magnéticas históricas del siglo XX.

También, se presenta la búsqueda y recopilación realizada en libros, anuarios y diferentes reservorios de información digital, sobre el acervo asociado a los datos históricos de mediciones del campo geomagnético en México, tanto del Observatorio Magnético de Teoloyucan como de estaciones magnéticas de repetición, con los que actualmente cuenta el Servicio Magnético del Instituto de Geofísica, UNAM. Con estos datos, se realizó el análisis, digitalización y depuración, para generar repositorios asociados a 5 épocas diferentes, los cuales se redujeron para crear cartas magnéticas de sus diferentes componentes (D, I, F y H). Esto permitió analizar la evolución histórica del campo geomagnético en México durante los últimos 100 años para todas las componentes magnéticas y compararlo con las cartas de declinación magnética hechas en su respectiva época.

Por último, se presenta un análisis sobre la distribución de las estaciones magnéticas de repetición en México y se sugieren opciones para mejorar la cobertura territorial que se tiene actualmente.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

México cuenta con un vasto acervo histórico de datos geomagnéticos, así como de cartas de declinación magnética, siendo la más antigua reducida al año 1630. Por ello, se requiere una revisión sobre los métodos para la generación de las cartas magnéticas, ya que hoy día se cuenta con una teoría matemática y estadística más robusta, así como métodos más accesibles para la cartografía. Es necesaria la sistematización de una metodología para la generación de las cartas magnéticas en México ya que en cada época ha cambiado, además, el mejoramiento de las cartas realizadas en los últimos 100 años y sus datos generados ayudarán a modelos numéricos (principalmente utilizados en la orientación satelital y navegación) tanto mundiales como locales a mejorar la precisión en México y zonas aledañas.

Se requiere hacer una compilación de los datos con los que se cuenta actualmente del Observatorio Magnético de Teoloyucan y las estaciones magnéticas de repetición, considerando que el Servicio Magnético del Instituto de Geofísica (UNAM) no ha estado siempre a cargo de él y que diversos procesos históricos hayan implicado la destrucción o pérdida de algunos registros.

El **objetivo general** es desarrollar una propuesta de metodología estándar para la generación de las cartas magnéticas en México y aplicarla a datos históricos y actuales del campo geomagnético.

Como **objetivos particulares** se tienen: I) Recopilación y digitalización de los datos magnéticos históricos con los que cuenta actualmente el Servicio Magnético del Instituto de Geofísica, UNAM. II) Análisis, generación y reducción de las bases de datos para cada carta magnética. III) Analizar la distribución de las estaciones magnéticas de repetición en México para su mejora o complementación.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Geomagnetismo: un concepto con mucha historia.

El geomagnetismo es el estudio del campo magnético de la Tierra: su medición, sus variaciones espaciales y temporales, orígenes; y es utilizado para comprender más acerca del interior y exterior de la Tierra (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007).

El campo magnético terrestre ya era objeto de uso por la humanidad muchos siglos antes de su descubrimiento como tal, y ha tenido importantes influencias tanto históricas como culturales. Las especulaciones sobre anomalías magnéticas son comunes en la historia y el folclore; en el siglo II (E. V.) Claudius Ptolemaeus habló sobre islas con fuerte magnetismo (se piensa que se encontraban cerca de lo que es Borneo hoy día), tal que los barcos con clavos de hierro quedaban atrapados para siempre si pasaban demasiado cerca, o que *montañas magnéticas* sacaban los clavos de hierro de los barcos, haciendo que se rompieran y hundieran (Merrill, 2012); una versión con variantes aparece en el folclore árabe, en el capítulo *Tale of the Third Kalandar* del libro *Las mil y una noches* (Mardrus y Mathers, 1964). Siglos después, se decía que estas estructuras causaban variaciones en la declinación, o sea que, causaban una desviación en la aguja de la brújula respecto al norte verdadero (Merrill, 2012).

Con el avance en el entendimiento del campo geomagnético, se ha descubierto que no sólo tiene importancia antropológica, por ejemplo, existen diversas adaptaciones biológicas en animales (*v.gr.* biomineralización) que usan el campo geomagnético como guía en sus rutas migratorias (Kirschvink *et al.*, 1985), o también que la magnetósfera funciona como escudo para que la atmósfera no sea arrastrada fuera de la Tierra por el

viento solar, y hasta puede influenciar en el estado de oxidación atmosférico (Yamauchi y Wahlund, 2007).

Al hablar del descubrimiento del magnetismo de la Tierra hay que tratar dos cuestiones distintas: la fuerza de atracción que ejerce un imán y la tendencia de alineamiento con el norte (o sur, dependiendo el material) magnético (Kono, 2015).

La primera observación de un imán natural se le atribuye al filósofo griego Tales de Mileto (624-546 *a. E. V.*) quien le dio el nombre de “piedra imán” o “piedra de cargas” (*lodestone* o *loadston* en inglés) (Mitchell, 1937; Smith y Holroyd, 1968). Aunque él no dejó un escrito al respecto, sí lo hizo Aristóteles (384-332 *a. E. V.*) en *De Anima* y también Diógenes Laercio (200-250 *a. E. V.*) en su libro *Vidas, opiniones y sentencias de los filósofos más ilustres* (*Βίοι καὶ γνῶμαι τῶν ἐν φιλοσοφίᾳ εὐδοκιμησάντων*, título original en griego), donde se hacen referencias a la fuerza atractiva de los imanes (Mitchell, 1937). Es de mencionar que el nombre de magnetismo y magnetita (Fe_3O_4) es derivado de que los griegos llamaron a los materiales magnéticos “roca de Magnesia” (*λίθος μαγνησιη*), siendo Magnesia el nombre de algún lugar en Macedonia, Creta o Asia Menor (Kono, 2015). Los antiguos chinos hicieron observaciones similares pero corresponden a tiempos posteriores a los griegos.

Por otro lado, la propiedad de los imanes de alinearse en dirección norte-sur fue descubierta por los chinos, una referencia interesante es mencionada por Wang Chhung en el texto *Lun Hêng* del año 83 *E. V.* “Cuando el cucharón que controla el sur se tira al suelo, se detiene y apunta hacia el sur”, esto haciendo referencia a una cuchara elaborada a partir de una “piedra de imán” (Wang, 1948).

No es claro cuando inició el uso de la brújula en Europa y cuando comenzó a ser empleada en la navegación. De los registros más antiguos se tienen los de Alexander

Neckham (1157-1217) de Inglaterra en los tratados *De Utensilibus* y *De Rerum Naturis* escritos cerca del año 1190, describiendo el uso de una aguja magnética en la navegación para indicar el Norte (Mitchell, 1932).

En 1269, Petrus Peregrinus, publica su famosa obra *Epistola de Magnete*, donde explica propiedades de los imanes basado en observaciones experimentales; de hecho, esto puede considerarse como el primer tratado científico que describe observaciones y experimentos llevados a cabo con el propósito de aclarar un fenómeno natural (Kono, 2015). *Epistola* está compuesto en dos partes, una describe las propiedades de los imanes y la otra las técnicas usadas en los imanes para la construcción de una brújula. Aunque es posible que no todo el material escrito ahí fue descubierto por Peregrinus (Harradon, 1943), eso no lo demerita como el primer escrito científico. Las propiedades de los imanes más importantes descritas por Peregrinus fueron que tienen dos polos magnéticos, la determinación de polaridad de cada polos, las fuerzas entre dos polos magnéticos y que un polo magnético no puede ser aislado.

Comúnmente se cree que la declinación magnética y su variación espacial fueron descubiertas por Cristóbal Colón en su primer viaje a través del Atlántico en 1492. Por los reportes de sus diarios, se sabe que fue consciente del cruce de la línea agónica (línea de declinación cero) (Lanza y Meloni, 2006); aunque, al menos en cuanto a la declinación magnética corresponde, hay indicios para pensar ya había sido reconocida por los chinos y también en Europa antes del viaje de Colón.

En el capítulo 24 del libro *Mèng Xī Bǐ Tán* (nombre dado del sistema de interpretación *Hanyu Pinyin* del chino 夢溪筆談. Interpretado como *The Dream Pool Essays* o *Dream Torrent Essays*, en inglés) escrito por Shen Kuo (沈括) cerca del año 1088

E.V., dice: "tallan la punta de la aguja con la piedra imán; así apuntará hacia el sur. Pero siempre se inclina hacia el este, no apunta perfectamente hacia el sur (方家以磁石磨針鋒. 則能指南. 然常微偏東. 不全南也)" (Needham *et al.*, 2004). El texto explica varias cosas de interés, desde cómo fabricar una aguja magnética y su propiedad de búsqueda del sur, hasta el hecho de que existe una ligera diferencia entre el sur verdadero y su dirección de apuntamiento (es decir, la primera mención de la declinación) (Needham *et al.*, 2004; Kono, 2015). Needham (1962) recopila 18 observaciones de la declinación de la brújula china (figura 1) que cubren aproximadamente el período de los 720-1829 años (Smith y Needham, 1967), de las cuales 9 fueron realizadas antes del viaje de Colón.

| Date A.D. | Place of observation | Latitude N. | Longitude E. | Declination |
|--------------|-------------------------|----------------|-----------------|-------------|
| c. 720 | Chhang-an (Sian) | 34° 16' | 108° 57' | 3-4° E |
| c. 850 | Probably Sian | 34° 16' | 108° 57' | c. 15° E |
| c. 900 | Probably Sian | 34° 16' | 108° 57' | c. 7-5° E |
| c. 1030 | Probably Khaifêng | 34° 52' | 114° 38' | Slightly W |
| c. 1086 | Khaifêng | 34° 52' | 114° 38' | 5-10° W |
| 1115 | Khaifêng | 34° 52' | 114° 38' | c. 15° W |
| c. 1174 | Hangchow | 30° 17' | 120° 10' | 5-10° W |
| c. 1230 | Probably Hangchow | 30° 17' | 120° 10' | 7-5° W |
| c. 1280 | Probably Hangchow | 30° 17' | 120° 10' | 7-5° W |
| c. 1580 | Probably Peking | 39° 54' | 116° 28' | c. 7-5° W |
| c. 1625 | Peking | 39° 54' | 116° 28' | 5-5-7-5° W |
| c. 1680 | Nanking | 32° 4' | 118° 47' | 3° W |
| c. 1680 | Suchow | 31° 23' | 120° 25' | 2-5° W |
| 1690 | Canton | 23° 8' | 111° 16' | 2-5° W |
| 1708 | Shanhaikuan | 40° 2' | 119° 37' | 2° W |
| 1708 | Chiayūkuan | 39° 49' | 98° 32' | 3° W |
| 1817 | Canton | 23° 8' | 111° 16' | 0 |
| 1829 | Peking | 39° 54' | 116° 28' | 1-5° W |

Figura 1. Observaciones de declinación en China en el periodo de 720-1829 (Needham, 1962).

Mitchell (1937), también argumenta que la declinación magnética ya era conocida en Europa antes de los viajes de Colón, ya que durante su segundo viaje a América llevaba una brújula hecha en la región de Flandes, la cual tenía la aguja fijada no en dirección exacta N-S, sino en un punto al este del norte verdadero, el cual compensaba la declinación

en el oeste de Europa central en ese momento; los artesanos de Flandes debían ser conscientes de este concepto.

Todo esto no le quita dos grandes méritos a Colón: mostrar que la declinación magnética varía de una zona a otra y la identificación de la línea agónica (Kono, 2015).

Georg Hartmann fue la primera persona en notar que la aguja de la brújula no era paralela a la superficie de la Tierra, esto fue descrito en una carta en 1544, probablemente introduciendo las ideas del concepto de inclinación magnética. Por otro lado, la primera medición precisa de inclinación la hizo el fabricante de brújulas Robert Norman, alrededor del año 1576 en Londres, el valor obtenido fue de $71^{\circ} 50'$ y la aguja magnética se inclinó hacia abajo en su polo norte, apoyándose en un instrumento que construyó especialmente para medir este cambio en la horizontal. En 1581, Norman publica su medición y discusión en el tratado *The Newe Attractive* (Kono, 2015; Lanza y Meloni, 2006).

Gerhard Kremer (Geraldus Mercator) dio nombre al polo magnético, al conceptualizar que si todas las líneas magnéticas por las cuales se alinean las agujas magnéticas se extendían por la superficie de la Tierra, convergerían en un punto diferente al polo geográfico (Lanza y Meloni, 2006).

En el año 1600, William Gilbert publica *De Magnete*, en el cual plasma los fundamentos para la ciencia de la electricidad con los experimentos ahí descritos. En este tratado existen dos conclusiones íntimamente ligadas y de suma importancia para el geomagnetismo: 1) la Tierra se asemeja a un imán esférico, este experimento lo hizo usando una pequeña aguja suspendida en un pivote para encontrar la dirección de la fuerza magnética en la esfera (terella). 2) La inclinación está determinada por la latitud (magnética), tal y como se observa en la figura 2.

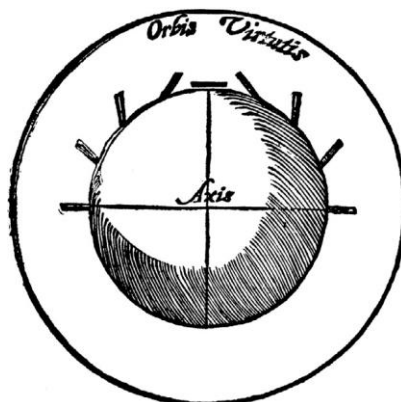


Figura 2. Terella de Gilbert que esquematiza como varía la inclinación magnética respecto a la latitud
(Gilbert, 1600)

Esta breve introducción al descubrimiento y entendimiento del geomagnetismo es la base fundamental que antecede este trabajo, ya que la conceptualización de Gilbert sobre que la Tierra es un cuerpo magnético, “*magnus magnes ipse est globus terrestris*” (van der Sluijs, 2014), dio paso al entendimiento actual del campo magnético terrestre.

Desde otro extremo diferente de la Tierra y de la historia, la cultura maya conocía sobre las propiedades magnéticas de algunas rocas. Un ejemplo es el yacimiento arqueológico de Izapa, Chiapas; donde la población asentada ahí fue más allá de sólo usar brújulas de piedra, ya que al parecer relacionaban el magnetismo con las tortugas marinas. Adyacente a la pared de la pirámide principal, hay una escultura que tiene la apariencia de un caparazón de tortuga hacia arriba, tallado en una sola roca de basalto que, al ser llenada de agua, podría servir como superficies sin fricción necesaria para una aguja hecha de “piedra de imán”. Una de las esculturas con forma de cabeza de tortuga (figura 3) tallada en basalto rico en hierro, muestra una fuerte magnetización tal que desvía las agujas de las brújulas hacia ella al acercarse, dicha escultura fue ejecutada con tanto cuidado que las líneas de fuerza magnética se enfocan en el hocico de la tortuga (Malmstrom, 1976).



Figura 3. Cabeza de tortuga hallada en Izapa tallada en basalto que muestra una fuerte magnetización (Malmström, 2016).

El fechamiento de estas rocas no se ha podido realizar por cuestiones de contaminación magnética pero, algunos autores proponen una fecha ~ 1000 *a. E. V.*, lo que sugiere que los olmecas conocieron el magnetismo aproximadamente un milenio antes que los chinos (Carlson, 1975).

2.2 El campo magnético terrestre

La Tierra se encuentra rodeada por un campo magnético, el cual tiene su origen en el núcleo terrestre, es predominantemente un dipolo axial, con polos magnéticos norte y sur que experimentan inversiones y excursiones periódicas, y que se localizan cerca de los polos geográficos (Nature, 2019). Sobre esta breve y aparentemente simple definición, se abordarán las bases de la descripción del campo geomagnético en este trabajo.

2.2.1 Fuentes del campo magnético terrestre

Al realizar una medición del campo geomagnético en algún punto de la Tierra, se está midiendo la suma de diferentes contribuciones con orígenes diferentes (Lanza y Meloni, 2006).

$$\Rightarrow B = B_0 + B_r + B_c + B_t,$$

B. Valor del campo geomagnético medido en la superficie de la Tierra.

B₀. Campo dipolar, generado en el núcleo fluido, funcionando como dinamo autoexcitada. (~90 %).

B_r. Campo residual, resultante de un proceso de inducción electromagnética generado por corrientes eléctricas inducidas en el manto superior y la corteza.

B_c. Campo cortical, tiene su origen en rocas y minerales de la corteza terrestre.

B_t. Campo externo, producido por corrientes eléctricas que fluyen en la ionósfera y magnetósfera. Es la componente más sensible a variaciones temporales.

Usualmente, la suma del campo dipolar con el campo residual es llamada “Campo Principal” y a la suma de éste con el campo cortical, se le denomina “Campo Interno”, mientras que el término *B_t* recibe el nombre de “Campo Externo” (Muniz, 1997).

2.2.2 Variaciones del campo geomagnético

Al ver que el campo geomagnético tiene diferentes fuentes es normal suponer que no es estático, de hecho, tiene variaciones tanto temporales como espaciales. Las variaciones en el dominio de la frecuencia del campo magnético terrestre existen en todas las escalas de tiempo, desde las radiofrecuencias hasta el registro de inversión (Constable, 2015). Aunque de manera un tanto esquemática, la figura 4 ilustra que la fuente y la morfología de las variaciones de campo dependen de la frecuencia y la amplitud

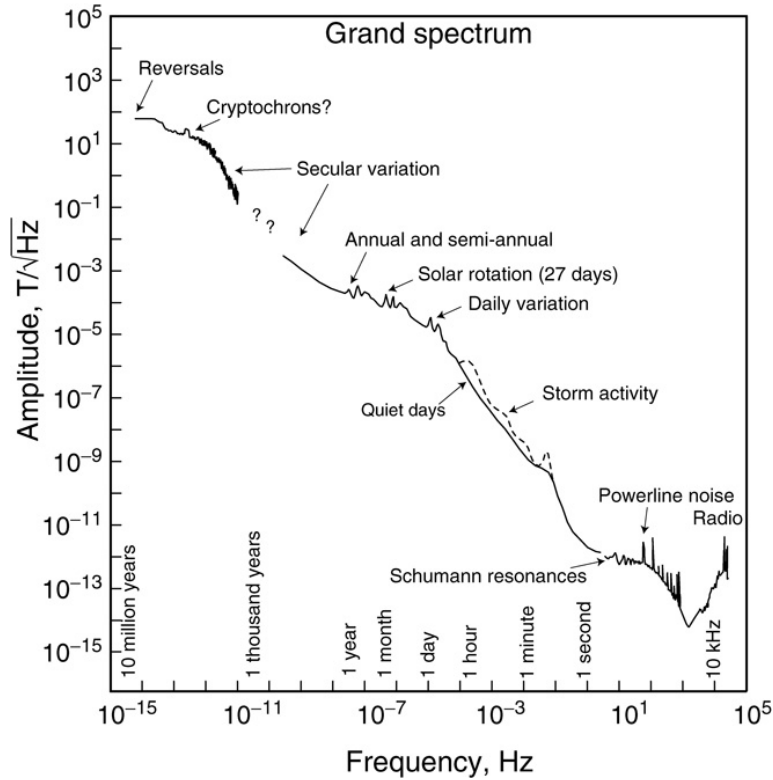


Figura 4. Espectro de amplitud compuesto de variaciones geomagnéticas en función de la frecuencia (Constable y Constable, 2004). Las notas indican los procesos físicos predominantes en las distintas escalas de tiempo.

A modo de complemento, las variaciones de periodo largo que ocurren en el interior de la Tierra, y en las que pueden ser incluidos en los términos B_0 , Br y Bc , se puede decir que serían las variaciones de la “Tierra Sólida”. Por otra parte, Bt representa las variaciones de periodo corto que tienen su origen en las envolturas gaseosas y plasmáticas de la Tierra. La tabla 1 es el espectro geomagnético y muestra estas variaciones.

Tabla 1. Variaciones temporales del campo geomagnético (modificada de Muniz, 1997).

| Banda | Variaciones |
|-------|---|
| 1 | <0.0001 – 0.3 seg. Oscilaciones de altas frecuencias |
| 2 | 0.2 – 100 seg. Micropulsaciones |
| 3 | ~1 min. – 120 min. (<i>Sudden Storm Commencements</i> , por sus siglas en inglés SSC) Comienzos Repentinos de Tormenta |
| 4 | 6 hrs. – 15 días Sq y Variaciones Lunares |
| 5 | 2 – 27.3 días Tormentas magnéticas |
| 6 | 6 – 12 meses Variaciones estacionales |
| 7 | 10.5 – 11.5 años Variaciones con el ciclo de actividad solar |
| 8 | ~300 – 10,000 años Variaciones del campo principal |
| 9 | 1,000 – cientos millones de años Inversiones del campo geomagnético |

2.2.3 Descripción vectorial

El campo geomagnético puede ser descrito de manera vectorial, como lo representa la figura 5. Esta figura se encuentra en un sistema de coordenadas cartesiano, con ejes X, Y, Z, que representan al norte verdadero, al este y al nadir, respectivamente. Si hacemos una medición en la superficie de la Tierra con una brújula, ésta apuntaría a lo que se conoce

cómo “meridiano magnético” o “norte magnético” (H), el cuál es distinto al norte geográfico en todos los puntos del planeta que no se encuentre sobre la línea agónica. El ángulo de diferencia entre el norte geográfico (X) y el norte magnético (H) es conocido cómo declinación magnética (D). F es el vector de intensidad total del campo, del cual H es sólo una proyección azimutal, el ángulo formado entre H y F es la inclinación magnética (I).

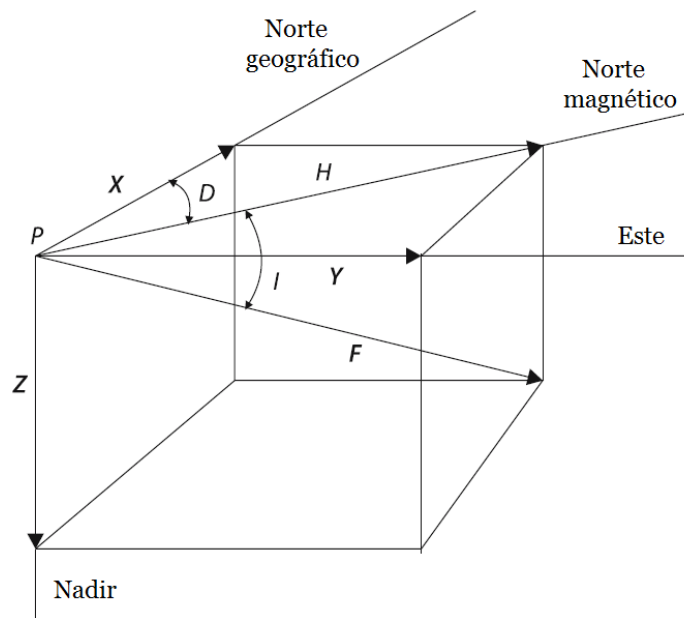


Figura 5. Descripción vectorial del campo geomagnético (modificado de Lanza y Meloni, 2006).

Con esta descomposición vectorial se hace notar que sólo se requiere conocer 3 variables no coplanares para poder deducir las otras 4. La tabla 2 muestra cómo, con base en el sistema de referencias que se tenga o los datos con los que se cuente de acuerdo con los diferentes sistemas coordenados, se pueden obtener las otras variables.

Tabla 2. Expresión vectorial campo geomagnético en diferentes sistemas de referencia y sus respectivas ecuaciones de transformación (recuperado de Cifuentes-Nava, 2009).

| <i>Sistema de referencia</i> | <i>Componentes magnéticas</i> | <i>Ecuaciones de transformación</i> | |
|------------------------------|-------------------------------|--|--|
| Cartesiano | <i>XYZ</i> | $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ $D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$ $Z = Z$ | $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ $D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$ $I = \arctan\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$ $I = \arcsen\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}\right)$ |
| Cilíndrico | <i>HDZ</i> | $X = H \cos(D)$ $Y = H \sen(D)$ $Z = Z$ | $F = \sqrt{H^2 + Z^2}$ $D = D$ $I = \arctan\left(\frac{Z}{H}\right)$ |
| Esférico | <i>DFI</i> | $X = F \cos(I) \cos(D)$ $Y = F \cos(I) \sen(D)$ $Z = F \sen(I)$ | $H = F \cos(I)$ $D = D$ $Z = F \sen(I)$ |

2.2.4 Descripción potencial

Todos los campos magnéticos son originados por corrientes eléctricas, esto es válido hasta dimensiones atómicas. La geometría más importante del campo es la del dipolo magnético, el potencial del dipolo (V) representa ~93%, ese potencial es generado por un momento magnético m a una distancia r desde el centro hacia un ángulo azimutal θ entre el dipolo axial y la dirección radial (Lowrie, 2011)

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \cos \theta}{r^2} .$$

El campo magnético dipolar B es el gradiente del potencial

$$B = -\nabla V,$$

se puede suponer que en las regiones libres de fuentes V son armónicas y satisfacen la ecuación de Laplace (Blakely, 1995)

$$\Rightarrow \nabla^2 V = 0 .$$

Cómo ya se ha abordado, el campo geomagnético tiene fuentes internas y externas, entonces, el potencial en la superficie de la tierra se expresa como

$$V = V_{int} + V_{ext} ;$$

empleando la solución general de la ecuación de Laplace, la variación del potencial en una superficie esférica es descrita por armónicos esféricos en función de la colatitud θ y la longitud ϕ (véase la figura 6 como apoyo geométrico).

La variación del potencial con una distancia radial $\frac{\partial V}{\partial r}$ tiene dos partes: la región donde $r \rightarrow 0$, $\Rightarrow V \propto r^n$; y la región donde $r \rightarrow \infty$, $\Rightarrow V \propto \frac{1}{r^{n+1}}$. Entonces, el potencial de origen interno es

$$V_{int} = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)) P_n^m(\cos\theta), \quad \forall r \geq a$$

y el de origen externo

$$V_{ext} = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{r}{a}\right)^n (G_n^m \cos(m\phi) + H_n^m \sin(m\phi)) P_n^m(\cos\theta), \quad \forall r \leq a$$

donde a es el radio de la Tierra; g_n^m , h_n^m , G_n^m y H_n^m son los llamados coeficientes de Gauss o de Gauss-Schmidt y P_n^m son polinomios de Legendre de grado n y orden m , normalizados acorde a la convención de Schmidt (Lowrie, 2011; Blakely, 1995).

Para el campo magnético principal, los coeficientes de Gauss están definidos con intervalos de 5 años entre los años 1900 y 2015. Se supone que la dependencia de tiempo de los coeficientes de Gauss es lineal en intervalos de 5 años y se especifica mediante la expresión

$$g_n^m(t) = g_n^m(T_0) + g_n^m(T_0)(t - T_0)$$

$$h_n^m(t) = h_n^m(T_0) + h_n^m(T_0)(t - T_0),$$

donde $g_n^m(t)$ y $H_n^m(t)$ representan la variación secular lineal y sus unidades son [nT/año], t es el tiempo de interés en años y T_0 es la época que precede a t que es múltiplo exacto de 5 años (Thébault et al., 2015a).

Al no ser posible medir el potencial geomagnético directamente, los coeficientes de Gauss se calculan a partir de las medidas del Norte X , Este Y y nadir Z realizadas en la superficie de la Tierra (Lowrie, 2011). Estas son las componentes en coordenadas esféricas del campo magnético dipolar $B = -\nabla V$, entonces

$$X = -B_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \Big|_{r=a}$$

$$Y = B_\phi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \Big|_{r=a}$$

$$Z = B_r = \frac{\partial V}{\partial r} \Big|_{r=a},$$

y al evaluar en la superficie de la Tierra en $r = a$

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\{g_n^m + G_n^m\} \cos(m\phi) + \{h_n^m + H_n^m\} \sin(m\phi)) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos\theta)$$

$$Y = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\{g_n^m + G_n^m\} \sin(m\phi) - \{h_n^m + H_n^m\} \cos(m\phi)) \frac{m}{\sin\theta} P_n^m(\cos\theta)$$

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\{(n+1)g_n^m - nG_n^m\} \cos(m\phi) + \{(n+1)h_n^m - nH_n^m\} \sin(m\phi)) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos\theta)$$

Por sí solas, las componentes horizontales no permiten ser separadas en campos externos e internos dado que las componentes norte y este de los coeficientes de Gauss se generan como $g_n^m + G_n^m$ y $h_n^m + H_n^m$. Los campos externos e internos pueden separarse en virtud de que los coeficientes de Gauss se generan en diferentes combinaciones en el campo vertical.

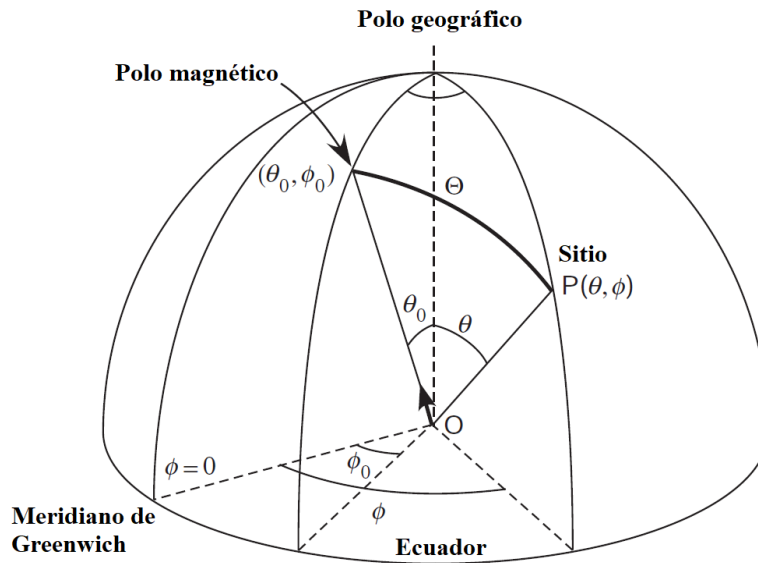


Figura 6. Relaciones angulares del cálculo potencial de un dipolo magnético geocéntrico inclinado (modificado de Lowrie, (2011).

Este tipo de soluciones potenciales son importantes porque constituyen una de las mejores aproximaciones para los modelos del campo geomagnético a escala planetaria, como el modelo IGRF (*International Geomagnetic Field Reference*) o el modelo CHAOS (*CHAMP, Ørsted & SAC-C model*), que emplean desarrollos de armónicos esféricos

(Finlay et al., 2015; Thébault, et al., 2015; Thébault, et al., 2015); esto se aborda con detalles más en el apartado 2.5.

2.3 Breve recuento sobre los datos geomagnéticos de México

México cuenta con una amplia historia de mediciones magnéticas, uno de los libros de mayor valor histórico, en cuanto a geomagnetismo en México se refiere, es el compilado que hizo Rosendo O. Sandoval en 1950: *Elementos magnéticos de la República Mexicana*. Ahí se encuentran todas las mediciones realizadas en el país desde finales del siglo XVI hasta el año de la publicación; por poner algunos ejemplos, están las mediciones más antiguas de declinación magnética de las que se tiene un registro, realizadas por el pirata británico Thomas Cavendish en Cabo Corrientes, La Paz, Cabo San Lucas y Manzanillo, en el año de 1587, también las realizadas en diferentes partes del territorio mexicano en 1630 por Robert Dudley, o las mediciones del explorador Alexander von Humboldt a principios del siglo XIX.

Este acervo es de un altísimo valor histórico y científico ya que muchas de las fuentes ahí citadas de las que se obtuvieron los datos, hoy día no se encuentran de manera digital y las copias de algunos archivos se limitan a contados ejemplares en bibliotecas extranjeras o, simplemente, se encuentran perdidos o fueron destruidos. Cañón (1991) relata en la introducción del libro *Valores magnéticos en la República Mexicana y Centroamérica de 1587 – 1991*, que muchos de los libros que se querían consultar no se encontraban en los archivos de los países en los que deberían encontrarse y, citándolo textualmente:

[...] se tuvo la fortuna de encontrar multitud de cuadernos de Bitácora originales de varios Capitanes de navíos que de 1769 a 1795 hicieron exploraciones entre San Blas, Islas de Revillagigedo, Baja California y lo que entonces se llamó Costa Norte de California, que comprende las actuales costas occidentales de Estados Unidos y Canadá, y la costa sur de Alaska.

Pero es tan grande la cantidad de datos de declinación que no ha sido posible copiar sino una pequeña parte, y aún teniendo toda esa colección habría que darle un tratamiento por demás laborioso, para lo que desgraciadamente no se ha tenido tiempo disponible.

A modo de complemento del libro de Sandoval (1950), Cañón Amaro (1991) publica *Valores magnéticos en la República Mexicana y Centroamérica de 1587 – 1991*. Y más actualizado, se cuenta con el catálogo *Estaciones magnéticas de repetición de la República Mexicana*, realizado por el Servicio Magnético del Instituto de Geofísica, UNAM (Guzmán, 2013).

2.3.1 El Observatorio Magnético de Teoloyucan

El Observatorio Magnético de México ha tenido más de una sede debido a factores como el crecimiento de la mancha urbana y a la instalación de una red de tranvías eléctricos en la Ciudad de México a finales del siglo XIX (Sandoval, 1950). Las sedes previas fueron: Palacio Nacional (1879 – 1887), Observatorio Astronómico en Tacubaya (1889 – 1902) y Cuajimalpa, 1903-1913. Desde 1914 el Observatorio Magnético se encuentra en el pueblo de Teoloyucan, Estado de México (Hernandez-Quintero, *et al.*, 2018); sólo tuvo una ligera reubicación de 800 m en 1978, siendo su posición actual 19° 44' 29.3" N y 99° 11' 18.6" O.

2.3.2 Cartas magnéticas de México

Existe un total 16 cartas de declinación magnética para México, siendo la más antigua reducida para la época de 1630 y la más reciente para el 2010. Han sido publicadas por diferentes instituciones y, cabe mencionar que, las más antiguas no fueron realizadas por servicios institucionales mexicanos. El mayor compilado de estas cartas se encuentra en la publicación *Variaciones de la Declinación Magnética de la República Mexicana desde 1630* de Cañón Amaro, (1989), donde están las cartas de declinación magnética de las épocas 1630, 1700, 1783, 1850, 1890, 1907, 1915, 1932, 1942, 1955, 1960, 1965 y 1985.

Las cartas de las épocas 1630, 1783, 1890, 1915, son recuperadas de publicaciones por reportes del *U.S. Coast and geodetic Survey*. En particular, la carta de 1630 (figura 7) es creada con datos de un texto llamado *Dell 'Arcano del Mare*, escrito por Sir Robert Dudley y publicado por primera vez en 1645 (U. S. Coast and Geodetic Survey, 1888); además el mapa que presenta Cañón está modificado, mostrando sólo lo correspondiente al territorio mexicano. Las cartas de las épocas 1700 y 1850 las realizó Cañón para esa publicación a partir de los datos de libro de Sandoval (1950) antes mencionado, aunque no hay un documento que explique la metodología empleada en su construcción, es probable que haya utilizado métodos lineales de interpolación como lo hacían con mapas de curvas de nivel.

Para la época de 1990 se llevó a cabo una campaña de reocupación de estaciones magnéticas, en la que se visitaron 52 en todo el país. Previamente fueron generadas cartas magnéticas sintéticas para esa época por (Campos et al., 1991). Cabe mencionar, que con los datos de la campaña 1990 se hizo una evaluación preliminar del modelo IGRF para México (Campos et al., 1994), también se realizó una evaluación geoestadística sobre la

distribución de la red de estaciones geomagnéticas (Flores et al., 2000). Para la época de 1995, se publica la carta magnética sintética de Cifuentes y Hernández (1996) basada en modelos de IGRF. Por último, para la carta magnética de la época 2010, se realiza una campaña de reocupación de 41 estaciones magnéticas de repetición y se generan mapas de declinación, de inclinación y de intensidad total, que se encuentran disponibles en la tesis de licenciatura de Guzmán Armenta (2013).

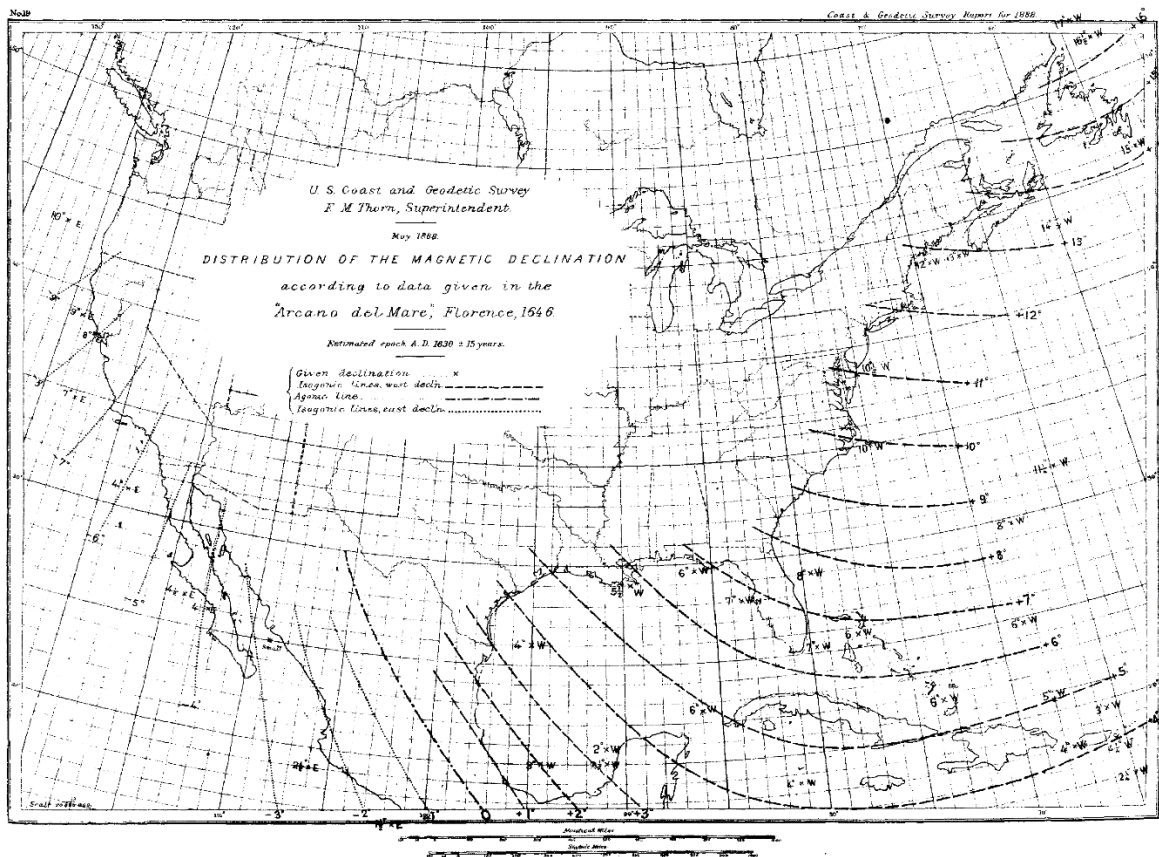


Figura 7. Carta magnética de declinación estimada para la época 1630, acorde a los datos dados en el *Arcano del Mare* (1645), publicado por el U. S. Coast and Geodetic Survey (1888).

2.4 Estaciones magnéticas de repetición

Los observatorios magnéticos permanentes son la fuente más precisa de la variación secular, pero no es posible dar una cobertura adecuada a todo el planeta. Las estaciones magnéticas de repetición proporcionan información importante para complementar los datos del observatorio.

Una estación magnética de repetición se define como una marca fija en el suelo donde se realizan observaciones absolutas de campo magnético recurrentes con temporalidad definida, dichas observaciones siempre se realizan a una altura fija sobre la marca. Puede existir una estación de respaldo a pocos cientos de metros de la estación magnética de repetición, que es llamada estación secundaria (Newitt et al., 1996).

A grandes rasgos, existen dos categorías de las estaciones magnéticas de repetición: De primer orden. 1) Método del observatorio de referencia: se realizan múltiples observaciones absolutas temprano en la mañana y al final de la tarde durante 2 días. 2) Método de variómetro: se determinan continuamente las variaciones del campo magnético en las proximidades de la estación de repetición durante 3 o más días de baja actividad magnética. Se calibran con una precisión de 5 nT o utilizando conjuntos de observaciones absolutas realizadas en la estación de repetición. Se busca obtener registros de al menos dos noches en condiciones de baja actividad magnética, con observaciones absolutas fiables durante el día antes y después de cada noche. De segundo orden. Se realizan frecuentes mediciones absolutas, generalmente durante 6-8 horas centradas en el medio día local. Se busca una precisión de 5 nT o mayor (Newitt et al., 1996).

Para satisfacer múltiples objetivos de manera rentable, se pueden usar diferentes intervalos temporales de reocupación, clasificando en subconjuntos las estaciones de repetición. Por ejemplo, las estaciones se pueden agrupar como: "Clase A", ocupadas cada

2 años; "Clase B", ocupadas cada 5 años; y "Clase-C", ocupadas cada 10 años (Newitt, *et al.*, 1996).

Respecto a la localización de las estaciones magnéticas de repetición, en la práctica, se puede trabajar con un número limitado de mediciones distribuidas aleatoriamente en el espacio (Wienert, 1970). La Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) ha recomendado que, a los efectos del mapeo del campo principal, las mediciones de la superficie de los elementos magnéticos se realicen a una distancia de aproximada de 200 km (Vestine, 1961). Un análisis de las descripciones de redes de estaciones de repetición de 16 países, muestra que el espacio medio entre estaciones varía de 53 a 415 km, con una media de 230 km (Newitt *et al.*, 1996).

Las llamadas "mediciones absolutas" son realizadas por instrumentos absolutos que pueden realizar mediciones del campo magnético en términos de unidades físicas básicas absolutas o constantes físicas universales. Actualmente, los tipos más comunes de instrumentos absolutos son el teodolito *fluxgate* para medir D e I y el magnetómetro de precesión de protones para medir F (Macmillan y Rycroft, 2010).

Las observaciones absolutas realizadas en la estación magnética de repetición deben combinarse con datos de variación continua (de un variómetro *in situ* o de un observatorio de referencia) para obtener una estimación del campo normal o de un valor medio anual equivalente en la estación de repetición (Newitt *et al.*, 1996). Así mismo, se utilizan observaciones astronómicas solares para obtener el norte verdadero en la estación magnética de repetición (Rasson, 2005).

2.5 Usos y aplicaciones de los datos y mediciones magnéticas

Cómo se ha descrito anteriormente, el campo geomagnético es complejo, varía en el espacio y el tiempo, y tiene contribuciones externas e internas. Históricamente, el conocimiento de su morfología y variabilidad ha sido importante en campos como la navegación, el estudio de la atmósfera y la ionósfera, las comunicaciones (cómo las ondas de radio) y los estudios sobre el interior de la Tierra: el manto, el núcleo, la tectónica de placas y sus movimientos, etc. (Turner et al., 2015).

Para todo lo antes mencionado, se necesitan datos, se requieren mediciones constantes y que cubran la mayor extensión posible de la superficie del planeta. Dada esta necesidad, fue creada en 1986 la Red Internacional de Observatorios Magnéticos en Tiempo Real (INTERMAGNET) con el fin de establecer una cooperación mundial de observatorios magnéticos, ayudando en el establecimiento de nuevos observatorios o proporcionando asistencia con la actualización y el mantenimiento de las instalaciones existentes, y promocionando estándares actualizados para medir y registrar el campo magnético de la Tierra (INTERMAGNET contributors, 2020). La imagen 8 muestra los lugares donde actualmente hay un observatorio magnético perteneciente a INTERMAGNET, es de resaltar que el observatorio magnético de México es más cercano a Centroamérica, por lo cual son primordiales las mediciones y datos provenientes de México.

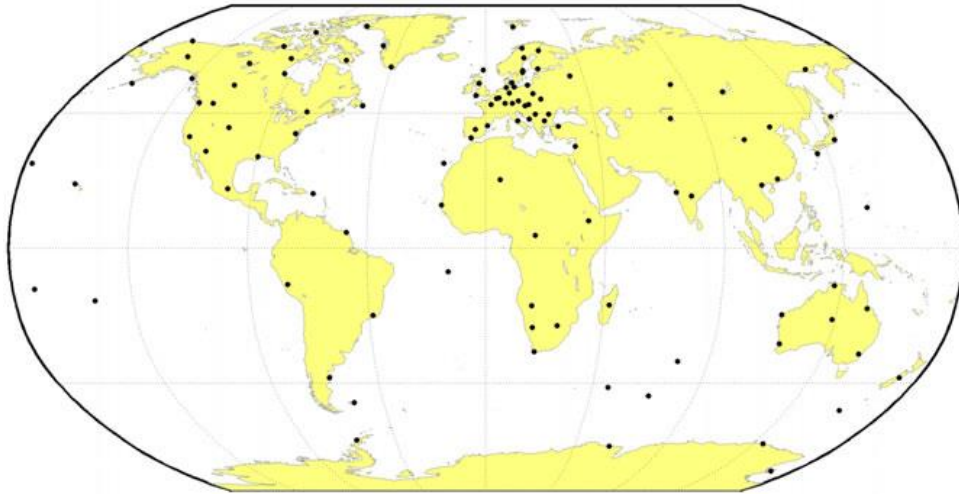


Figura 8. Distribución geográfica de los observatorios magnéticos de INTERMAGNET para enero del 2010 (Matzka et al., 2010).

Para ampliar espacialmente las mediciones se usan las estaciones magnéticas de repetición, que funcionan como pequeños observatorios que realizan mediciones y registros cada cierto número de años (Turner et al., 2015). Las estaciones de repetición a menudo se organizan como redes nacionales; comenzaron a principios de la década de 1830 y con el paso de las décadas se fueron estableciendo muchas más redes de estaciones de repetición en todo el mundo (Gubbins y Herrero-Bervera, 2007). La figura 9 muestra la distribución espacial de estaciones magnéticas de repetición que se pueden consultar por el *World Data Centre for Geomagnetism* y el *World Data Center for Solid Earth Geophysics* desde el año 1900 hasta el 2010 (Matzka et al., 2010). Los puntos marcados no necesariamente generan datos cada 5 o 10 años, ya que la reocupación de una estación magnética de repetición depende de muchos factores: accesibilidad, seguridad, presupuesto, etc.

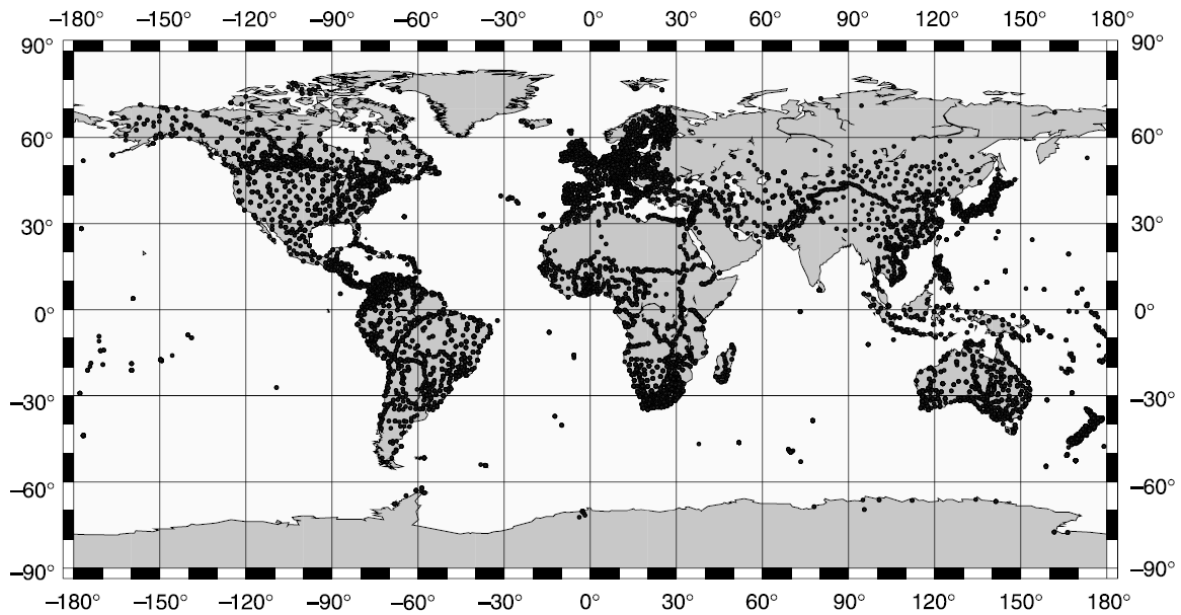


Figura 9. Distribución global de la estaciones magnéticas de repetición desde el año 1900 (Matzka et al., 2010).

2.5.1 Métodos de estimación espacial usados en la generación de cartas magnéticas

Antes de analizar las cartas magnéticas de algunos países, primero se tienen que describir algunos de los métodos numéricos de estimación espacial comúnmente usados en éstas.

Dado un conjunto de puntos en el espacio, se busca una función de aproximación que se ajuste a la forma o tendencia de los datos, sin coincidir necesariamente con los puntos, minimizando la discrepancia entre las mediciones y la función. El ajuste más sencillo de una aproximación por *mínimos cuadrados* a un conjunto de puntos definidos como: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$; es una línea recta del tipo $y_i = a_0 + a_1x + e$, donde e representa la diferencia entre el ajuste y el valor real de las observaciones, entonces $e = y_i - a_0 - a_1x$. El ajuste óptimo de la recta consiste en minimizar la suma de los cuadrados de

los residuos entre el valor medido y el valor calculado con el modelo lineal (Chapra et al., 2007):

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,medida} - y_{i,calculada})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 ;$$

para encontrar el valor mínimo se deriva a S_r respecto a los coeficientes a_0 y a_1 :

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) = 0 ,$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n [(y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i] = 0 ;$$

distribuyendo ambas ecuaciones, se tiene que:

$$\sum_{i=1}^n y_i - n a_0 - a_1 \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i - a_0 \sum_{i=1}^n x_i - a_1 \sum_{i=1}^n (x_i)^2 = 0$$

Este es un sistema de dos ecuaciones simultaneas con dos incógnitas que se resuelve para

a_1 y a_0 como:

$$a_1 = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} ,$$

$$a_0 = \frac{(\sum X^2)(\sum Y) - (\sum XY)(\sum X)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

Mediante el criterio del Hessiano (Apostol, 1980) que se refiere al cálculo de máximos y mínimos en funciones de dos o más variables, se tiene que a_1 y a_0 minimizan la suma de los cuadrados de las desviaciones (Oda Noda et al., 2005).

El procedimiento anterior se puede extender al ajuste de datos con un polinomio de grado superior. Por ejemplo, dado un polinomio de segundo grado (o cuadrático):

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e ,$$

la suma de cuadrados de los residuos sería:

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)^2$$

El caso bidimensional se extiende por inducción a un polinomio de n -ésimo grado:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m + e$$

Así, la determinación de los coeficientes de un polinomio de m -ésimo grado es equivalente a resolver un sistema de $m+1$ ecuaciones lineales simultáneas (Chapra et al., 2007), y el

error estándar se formula como $S_t = \sqrt{\frac{S_r}{n-(m+1)}}$.

Otra función que se ocupa habitualmente es el *polinomio de Taylor*, que busca hallar un polinomio que coincida con una función en un punto dado, tanto en su valor como en el de sus k primeras derivadas. El *polinomio interpolante de Taylor* de grado n para una función suave f_t alrededor de un punto a está dado por la serie truncada de

$$f_t = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_{nm}(x - x_0)^{n-m} (y - y_0)^m$$

donde A_{nm} representa los coeficientes del polinomio (Gasca & Sauer, 2000).

El método de *inverso a la distancia* (*IDW* por sus siglas en inglés) también es frecuentemente usado, está basado en el concepto de la primera ley de Tobler (primera ley de la geografía) y se definió *como todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las distantes*. Su idea general se basa en la suposición de que el valor del atributo de un punto no muestreado es el promedio ponderado de valores conocidos dentro de la vecindad. El *IDW* está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\hat{x}_p = \sum_{i=1}^N w_i x_i$$

$$w_i = \frac{d_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-\alpha}}$$

Donde \hat{x}_p es el valor a calcular, N el número de datos, w_i el valor ponderado, d_i la distancia entre cada punto y α es la potencia (Chen & Liu, 2012).

Por otro lado, Sibson (1980) introdujo las nociones de *vecinos naturales* e *interpolación de vecinos naturales* como un medio para ajustar y suavizar los datos (Sukumar et al., 2001). Este método se basa en el diagrama de Veronoi, el cual es una de las construcciones más usadas para definir un conjunto irregular de puntos; es una agrupación de celdas definidas para una distribución de puntos en R^2 : $N = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$. Cada celda es una región dentro de la cual, cualquier punto x es más cercano a un nodo n_i , que a otro nodo n_j , con $j \neq i$; así, el nodo n_i es el vecino más cercano al punto x . La coordenada natural del punto x respecto a un nodo I , se define como

$$\phi_I(x) = \frac{A_I(x)}{A(x)},$$

donde $A(x)$ es el área de la celda de Veronoi de primer orden asociada al punto x , y $A_I(x)$ el área de la celda de segundo orden asociada al punto x y al nodo I . Dadas estas condiciones, se puede definir la *interpolación de vecino natural* como:

$$u^h(x) = \sum_{I=1}^n \phi_I x^{u_I}$$

Así, se calcula el valor aproximado de la variable de interés $u^h(x)$ en un punto x , a partir de los valores nodales de la variable u_i y de las coordenadas $\phi_I(x)$ (Torres et al., 2008).

2.5.2 Cartas magnéticas

Los datos de las estaciones magnéticas de repetición se utilizan para calcular modelos regionales y globales del campo magnético, ya sea para la representación gráfica del campo magnético en una determinada época o la predicción de sus variaciones hasta por 5 años. Por ejemplo, el modelo CHAOS-6 usó más de 2 años de datos de la misión satelital *Swarm*, y medias mensuales de 160 observatorios magnéticos en su última actualización. Este modelo proporciona información sobre las variaciones temporales del campo geomagnético principal entre 1999 y el 2016, en la superficie terrestre y continuamente hacia abajo hasta la superficie del núcleo (Finlay et al., 2016).

Uno de los modelos más usados es el Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF), que es una serie de modelos numéricos que describen a gran escala el campo magnético principal de la Tierra y su tasa de cambio anual (variación secular) entre las épocas de 1990 y la actualidad. El modelo utiliza una expansión potencial del campo geomagnético expresada por la serie finita:

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times (g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)) P_n^m(\cos\theta),$$

este modelo es alimentado con datos de los observatorios magnéticos de todo el mundo, las mediciones de estaciones magnéticas de repetición y también con datos de satélites de órbita terrestre baja (LEO por sus siglas en inglés) (Thébault, et al., 2015).

El formato de visualización más común es un gráfico isomagnético, es decir, un mapa de contorno de valores iguales de un elemento magnético particular. Estos gráficos se denominan isogónicos para declinación, isoclínicos para inclinación e isodinámicos para componentes de campo particular de igual intensidad, por ejemplo, el campo horizontal. Las cartas isopóricas se refieren a las cartas isomagnéticas de variación secular (Merrill, *et al.*, 1996). La proyección de estos elementos permite un mejor análisis del campo potencial, así como de sus cambios en el tiempo, su origen y pronóstico.

Las cartas magnéticas regionales las generan todos los países que tienen una red de estaciones magnéticas de repetición y observatorios magnéticos; por sus múltiples usos y aplicación algunas son de acceso público, muchas están restringidas, y otras pocas muestran el método con el cual las generan.

Por ejemplo, las cartas magnéticas generadas en Italia son hechas en condiciones ideales en cuanto a la densidad de datos, ya que para el año 2010 su red contaba con 131 estaciones magnéticas de repetición y 2 observatorios magnéticos (figura10). Con los datos recopilados, generan cartas de declinación, inclinación, intensidad total e intensidad vertical; usando como método de estimación espacial una *regresión polinomial de segundo orden* del tipo:

$$E(\phi, \lambda) = a_0 + a_1\phi + a_2\lambda + a_3\phi^2 + a_4\lambda^2 + a_5\phi\lambda;$$

donde E es un elemento geomagnético genérico, ϕ la longitud, λ la latitud (ambas expresadas en grados o minutos de arco), a_0 es el nivel base de los modelos para cada elemento, a_n (con $n = 1, \dots, 5$) son los coeficientes (en nT / grado o nT / minutos de arco) en

longitud y latitud que determinan el gradiente espacial de cada elemento (De Santis et al., 2003; Dominici et al., 2010a).

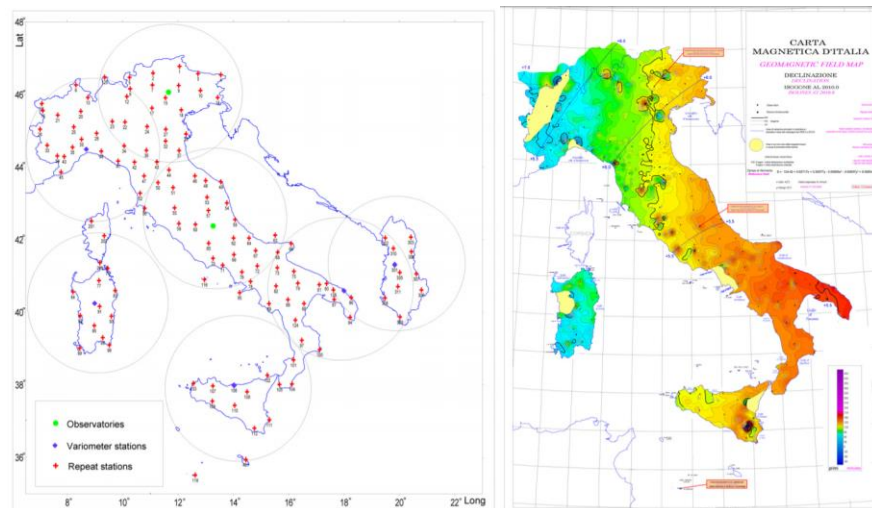


Figura 10. Red de estaciones magnéticas de repetición italiana y carta magnética de declinación para la época 2010.0 en Italia (modificado de Dominici et al., 2010)

Otro ejemplo es el de Bulgaria (figura 11), que presentan una red de 27 estaciones magnéticas de repetición con un observatorio magnético. Al igual que las cartas italianas, usan una *regresión polinomial de segundo orden* como estimador espacial (Metodiev & Trifonova, 2017).

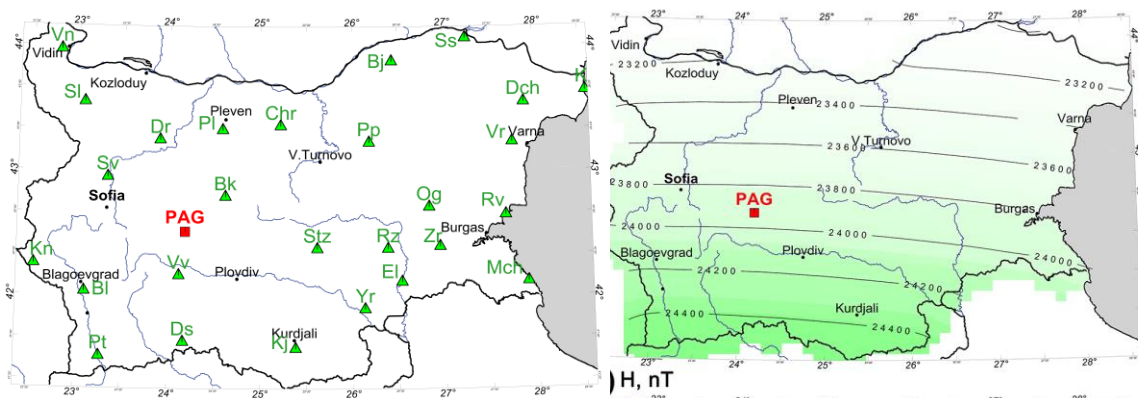


Figura 11. Red de estaciones magnéticas de repetición y carta magnética de intensidad horizontal para la época 2015.0 en Bulgaria (Modificado de Metodiev & Trifonova, 2017).

En el caso de Australia (figura12), para sus cartas regionales de 1985 usan 2 observatorios magnéticos y más de 60 estaciones magnéticas de repetición, procurando una separación media de 370 km entre cada una. A diferencia de las cartas antes mencionadas, aquí usan una *regresión de mínimos cuadrados* para generar los mapas a partir de los datos recabados (Barton, 1988).

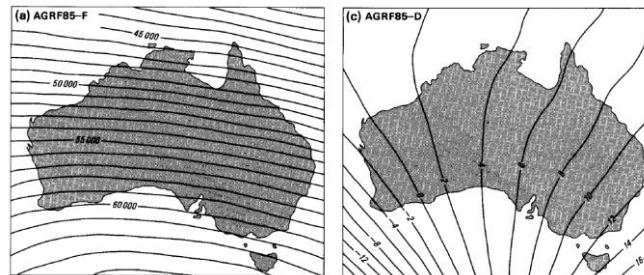


Figura 12. Cartas de intensidad total y declinación magnética para la época 1985.0 en Australia.

En otro tipo de trabajo, Qamili et al., (2010) generan modelos sintéticos para Albania y el suroeste de Italia a partir de tres tipos de datos: los recabados por las estaciones magnéticas de repetición, los sintéticos calculados por el modelo de IGRF y los recabados por datos satelitales de Ørsted y CHAMP (*CHALLENGING Minisatellite Payload*). Usan un modelo de *análisis de armónicos esféricos* para calcular los valores del campo geomagnético entre 1990 y el 2010, junto con una predicción al 2012. De la misma manera, Korte y Haak (2000), usan modelos de *armónicos esféricos* para modelar las variaciones del campo geomagnético sobre toda Europa entre los años 1965 y 1995.

En el caso de China, (Xu et al., 2003) presentan su modelo *ChinaGRF 2000*, en el que las estimaciones espaciales las realizan mediante el uso de *polinomios de Taylor*

ajustados por el método de *mínimos cuadrados* a diferentes niveles de truncamiento; aunque no dan información sobre el número de observatorios y estaciones magnéticas de repetición. En un trabajo posterior, Gao et al., (2005) usan el mismo método para hacer cartas de anomalías geomagnéticas en China, empleando 135 estaciones, 35 observatorios y 38 puntos del *IGRF*.

Por otro lado, en el trabajo de Pérez et al., (2000) presentan una evaluación para la selección óptima de un método de interpolación para cartas magnéticas en la República Cuba, con levantamientos magnéticos realizados entre 1985 y 1988 en dos regiones del país. Los métodos de interpolación son *Kriging Ordinario Puntual (KOP)* e *Inverso a la Distancia*, siendo este último, el método de interpolación que ofreció mejores resultados en cuanto a una menor varianza y menor tiempo de ejecución.

Abe et al., (2013), presentan la carta de declinación magnética de Japón para la época 2010.0, donde la estimación espacial es realizada aproximando *polinomios de segundo orden*, usando datos de 37 estaciones magnéticas de repetición y 5 observatorios. Cabe señalar que siguen el método de (Shirai, 2002) con el que se hizo la carta de la época 2000.0 para ese mismo país.

Hungría presenta una red de 195 estaciones magnéticas de repetición para sus cartas de 1995, aunque no aclaran si son estaciones de primer o segundo orden, o si usan algún observatorio magnético; para esta época emplean *polinomios de segundo orden* para la estimación espacial (Kovacs y Körmendi, 1999). Por otro lado, para la época 2010.0, presentan las cartas magnéticas para las épocas 2010.5, que son realizadas con datos de sólo 13 estaciones magnéticas de repetición y 1 observatorio, empleando *polinomios de primer orden* para aproximar sus cartas al modelo de campo principal (Kovács et al., 2013). En 2018 presentan una carta magnética para la componente x , realizada con un *análisis de*

armónicos esféricos, que para evitar los efectos de borde causados por este tipo de análisis, usaron datos de estaciones de países vecinos, así como de 3 observatorios cerca de su periferia y estaciones virtuales con datos del IGRF (Kovács et al., 2018).

Para las cartas magnéticas de Croacia en la época 2008.5, hacen uso de 12 estaciones magnéticas de repetición primarias, no tienen observatorio magnético pero lo compensan con datos de 3 observatorios cercanos, y el campo magnético principal es representado por medio de un *polinomio de segundo orden* (Brkić et al., 2013). Existe un estudio previo donde hay una campaña de 29 mediciones en el norte de Croacia central, donde usan *interpolación de vecino natural* para la interpolación bidimensional de los datos por ser el método que les dio residuales menores (Vujnović et al., 2004), lo cual es viable ya que el área que está cubriendo es pequeña en comparación de los casos anteriormente mencionados.

De igual manera, Valach et al., (2006) presentan cartas magnéticas de Eslovaquia para la época 2004.5, construidas con apenas 6 estaciones magnéticas de repetición y sin observatorio magnético; para el procesamiento de los datos usan un método de *polinomio lineal* (de primer orden). Este mismo método es usado para las cartas de la época 2007.5 (Dolinsky et al., 2009), aunque esta vez presentan más de 100 puntos de mediciones distribuidos en todo el territorio.

La observación y análisis de los datos, cartas y modelos han hecho que a través de la historia se descubran diferentes fenómenos sobre las variaciones espacio-temporales del campo geomagnético. Los cambios lentos del campo se comenzaron a descubrir hasta el año 1635, cuando Henry Gellibrand comparó registros en Londres, mostrando que la variación secular es un fenómeno real (Jackson y Finlay, 2015). A partir de ese punto, el campo magnético ha cambiado significativamente en los últimos 400 años y se han podido

identificar fenómenos estacionales como la variación diurna (Mead, 1964), la desviación al oeste (*westward drift*) (Crisp et al., 1950), la asimetría hemisferial (Gallet et al., 2009), el decaimiento en la intensidad del dipolo axial (Finlay, 2008), jerks electromagnéticos (Mandea et al., 1999, 2010), entre otros más. Todos estos fenómenos permiten ir desentrañando el complejo esquema magnetohidrodinámico en el interior de la Tierra.

Dado que estos modelos son alimentados con datos de observatorios y de cartas magnéticas locales, el error que pueden tener está relacionado con la densidad de observatorios de cada zona y la actualización constante de las cartas magnéticas de cada región, por lo cual es de suma importancia mantener y continuar con estos proyectos en México.

En la parte práctica, aunque la navegación es la aplicación más notable de los datos, cartas y modelos geomagnéticos, actualmente tienen una amplia variedad de uso: servicios topográficos y cartográficos, empresas de petróleo y gas, puertos, servicios de tránsito aéreo, aeropuertos, servicios militares, cartografía aeronáutica y servicios de seguridad, cartografía costera y fluvial marítima, topógrafos aeromagnéticos y marinos, perforación direccional de alta precisión para gas y petróleo, seguridad de satélites en órbita terrestre, clima espacial, entre otros más (Turner et al., 2015).

3 METODOLOGÍA

En este apartado se presenta la metodología seguida para el desarrollo del presente trabajo, dividida en: búsqueda, recopilación y digitalización de datos históricos y actuales, generación de las bases de datos, análisis exploratorio de datos, selección del método

numérico, creación de los mapas y, por último, la distribución de las estaciones magnéticas de repetición en México.

3.1 Búsqueda y recopilación de datos históricos y actuales

Se realizó un trabajo de búsqueda y recopilación de todos los datos magnéticos generados en el Observatorio Magnético de Teoloyucan desde su fundación y en campañas de reocupación de estaciones magnéticas de repetición, así como mediciones individuales en México de las que se tuviera algún registro. Esta búsqueda de información abarcó desde el rastreo de anuarios del Instituto de Geofísica publicados en la década de 1950, hasta la revisión en centros de datos mundiales.

Respecto al Observatorio Magnético, se inició por revisar los grandes repositorios mundiales. En el *World Data Centre for geomagnetism* (British Geological Survey, 2019) se encontraron archivos con registros de un dato cada hora para los años de 1965 a 1990 y con registros de un dato cada minuto para los años del 2002 al 2008. En INTERMAGNET se encuentran archivos con registros por minuto de los años 2009, 2010 y del 2015 al 2018. Revisando los archivos en discos duros de las computadoras del Observatorio Magnético, se encontraron registros desde junio del año 2001 hasta el presente año 2020. En el libro “Elementos magnéticos de la República Mexicana” (Sandoval, 1950) se hayan registros de medias diarias entre los años de 1879 y 1950.

Por último, se recopilaron los anuarios que publicaban las mediciones y registros del Observatorio entre 1948 y 1976, en ellos se encuentran registros de medias diarias y, a partir de 1965, registros de medias horarias. En particular, los datos del observatorio para la

carta de 1960 fueron obtenidos de anuarios de valores magnéticos de los años 1956 (Instituto de Geofísica - UNAM, 1958), 1957-1958 (Instituto de Geofísica - UNAM, 1961), 1959-1960 (Instituto de Geofísica - UNAM, , 1961), 1962 (Instituto de Geofísica - UNAM, 1963), 1963 (Instituto de Geofísica - UNAM, 1963) y 1964 (Instituto de Geofísica - UNAM, 1964); que a su vez, los datos de dichos anuarios fueron deducidos de los magnetogramas del observatorio de los cuales se obtuvieron las componentes D, H y Z, el resto son valores calculados en la misma publicación. Los datos del observatorio para 1932 fueron extraídos de la publicación de Sandoval (1950). Finalmente, cómo no se cuenta con registros del observatorio para el año 1907, se optó por montar un “observatorio virtual” usando datos mensuales y anuales del modelo IGRF-13, descargados del *Magnetic Field Calculators* (NOAA, s.f.), con la misma geolocalización del observatorio.

Respecto a las estaciones magnéticas de repetición, el reservorio más grande de información fue el libro de Sandoval (1950) mencionado en el párrafo anterior y el libro “Valores magnéticos de la República Mexicana y Centroamérica” del Ing. Cañón (1991), En ellos se encuentran miles de mediciones magnéticas que se han realizado en todo el país desde el año 1587 hasta 1991. Dichas publicaciones se encuentran como libros escaneados y con esas imágenes fue que se buscaron, estado por estado, todas las mediciones que componen a las tablas de las cartas que se generan en este trabajo (tablas 10, 11, 12, 13 y 14). Adicionalmente, como apoyo y complemento, se usó el “Catalogo del Servicio Magnético” (p.p.) y registros del *Geological British Survey*, que cuenta con un interesante reservorio de mediciones desde el año 1909 hasta el 2002.

Posteriormente, se determinaron las épocas con mayores densidades de datos para una época particular a reducir, con un mínimo de 30 estaciones distribuidas de la forma más

homogénea posible; procurando que no haya demasiadas estaciones cercanas, ya que en muchas ocasiones se contaba con 8 mediciones en un área menor a 50 km² (sobre todo en el centro del país), lo cual puede generar sesgos en el análisis. Así, se determinó que las épocas más viables para trabajar en las reconstrucciones de las cartas magnéticas son 2010, 1990, 1960, 1932 y 1907.

3.2 Base de datos para una carta magnética

La base de datos que se ocupa en una carta magnética incluye varios rubros: datos de observaciones en campo, los promedios mensuales del observatorio de la región y el promedio anual de dicho observatorio; todo esto para obtener un conjunto de datos reducidos al año en que se genera la carta magnética.

Los rubros utilizados para esta base se pueden dividir en 3:

1. Datos de campo: Son los tomados durante las campañas de reocupación de las estaciones de repetición, deben contener el nombre de la estación, fecha de la medición, coordenadas geográficas de dicha estación y los valores medidos de declinación (D), inclinación (I) e intensidad total (F), tal y como lo indica la tabla 3. Cabe señalar que se realizan de 3 a 8 mediciones solares y absolutas cada vez que se reocupa una estación de repetición, los datos obtenidos son procesados para obtener un valor final de D, I y F. Los detalles de dicho procesado se encuentran descritos en el apéndice A.

Tabla 3. Datos de campo

| Estación | Año | Mes | Día | Lat | Long | MEDICIÓN | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|------|----------|-------|--------|
| | | | | | | D [°] | I [°] | F [nT] |
| | | | | | | | | |

2. Datos del observatorio magnético: Son requeridos el promedio de D, I y F del año al que se realiza la reducción y el promedio del día en el que se realizó la medición (Newitt *et al.*, 1996). Para mantener un método consistente en todas las cartas magnéticas se trabajó con el promedio mensual y no el promedio diario, debido a que la gran mayoría de los registros de las estaciones magnéticas de repetición cuentan sólo con el mes en que fueron tomados (tabla 4).

Tabla 4. Datos del observatorio

| <i>TEO</i> | <i>Año de reducción</i> | | <i>TEO</i> | <i>Mes</i> | |
|------------|-------------------------|--------|------------|------------|--------|
| D [°] | I [°] | F [nT] | D [°] | I [°] | F [nT] |

3. Datos reducidos: Con lo compilado anteriormente, se realiza la reducción de los datos al año establecido dada la relación (Newitt, *et al.*, 1996):

$$B = B_o + B(t) - B_o(t),$$

donde B es el valor del campo geomagnético, B_o es el promedio anual del campo medido en el Observatorio, $B(t)$ es el valor del campo medido en el tiempo t y $B_o(t)$ es el valor del campo en el observatorio al tiempo t . Posterior a la reducción de las componentes D , I y F , se pueden calcular los valores de H , Z , X e Y (señaladas con un *) dadas las relaciones trigonométricas de la tabla 2 (que se encuentra en la introducción de la tesis), con ello se obtienen las 7 componentes vectoriales del campo geomagnético (tabla 5).

Tabla 5. Datos reducidos

| <i>Reducción al año _____</i> | | | | | | |
|-------------------------------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| D [°] | I [°] | F [nT] | H [nT]* | Z [nT]* | X [nT]* | Y [nT]* |

3.3 Análisis exploratorio de datos (AED)

El AED es un conjunto de técnicas estadísticas y gráficas que permiten establecer un buen entendimiento básico del comportamiento de los datos y de las relaciones existentes entre las variables que se estudian (Díaz y Casar, 2009). Su objetivo principal es comprender qué datos se tiene, qué posibles tendencias hay y, por lo tanto, qué pruebas estadísticas serán apropiadas para usar (Cox, 2017).

Se realizó el AED para los datos de todas las cartas, en esta sección se presentan sólo las de la carta de la época 2010.0, el resto se encuentran el en apéndice E. Para este caso en particular se usaron los siguientes estadígrafos (tabla 6): el número total de datos (N), media, desviación estándar, oblicuidad, curtosis, coeficiente de variación, mínimo, primer cuartil ($Q1$), mediana, tercer cuartil ($Q3$), máximo y rango intercuartil ($Q3-Q1$). Para el análisis visual de los datos se usaron histogramas (figura 13) y también se graficó la distribución de cada variable respecto a la longitud (eje X) y la latitud (eje Y) (figura 14).

Tabla 6. Estadígrafos asociados a los datos de las componentes magnéticas para la época 2010.0.

| Época | Comp. | N | Media | Desv. Est. | Oblucuidad | Curtosis | Coef. Var. |
|--------|-------|----------|----------|------------|------------|----------|------------|
| 2010.0 | D | 41 | 6.78 | 3.29 | -0.51 | -0.47 | 0.49 |
| | I | 41 | 51.08 | 4.55 | -0.17 | -1.03 | 0.09 |
| | F | 41 | 43097.49 | 2639.33 | -0.11 | -1.03 | 0.06 |
| | H | 41 | 26833.74 | 1016.51 | -0.36 | -0.81 | 0.04 |
| | | Mín | (Q1) | Median | (Q3) | Max | (Q3 - Q1) |
| 2010.0 | D | -1.31 | 4.52 | 7.41 | 9.21 | 12.16 | 4.69 |
| | I | 43.21 | 47.60 | 51.26 | 54.79 | 58.94 | 7.19 |
| | F | 38185.90 | 40864.80 | 43166.80 | 45135.90 | 47800.09 | 4271.10 |
| | H | 24660.45 | 26028.15 | 26992.31 | 27555.58 | 28442.88 | 1527.43 |

Para determinar el número de clases a considerar en los histogramas se usó la regla de Sturges: $c = 1 + \log_2(N)$, donde N es el número de muestras (Scott, 2009). Por lo que se usaron 6 clases en todos los histogramas.

2010.0

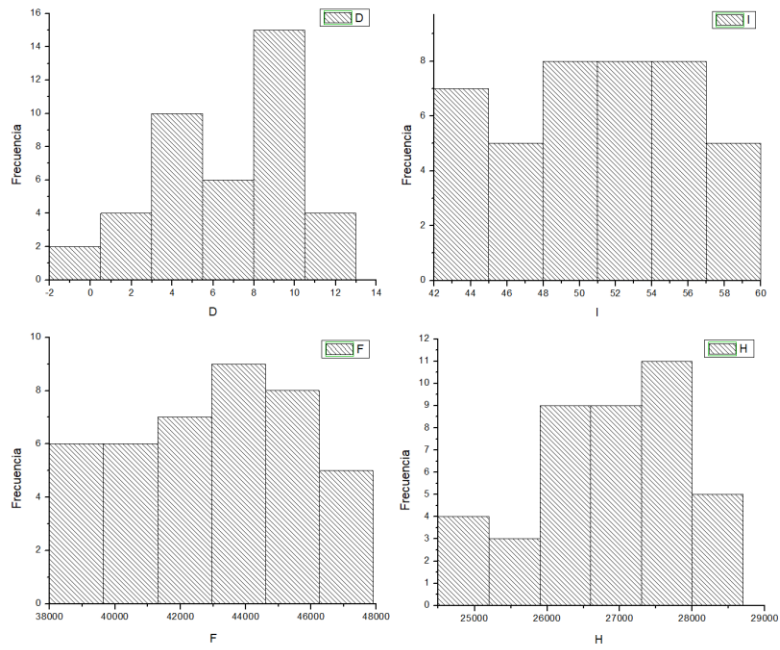


Figura 13. Histogramas de frecuencia de las componentes D, I, F y H, para la época 2010.0.

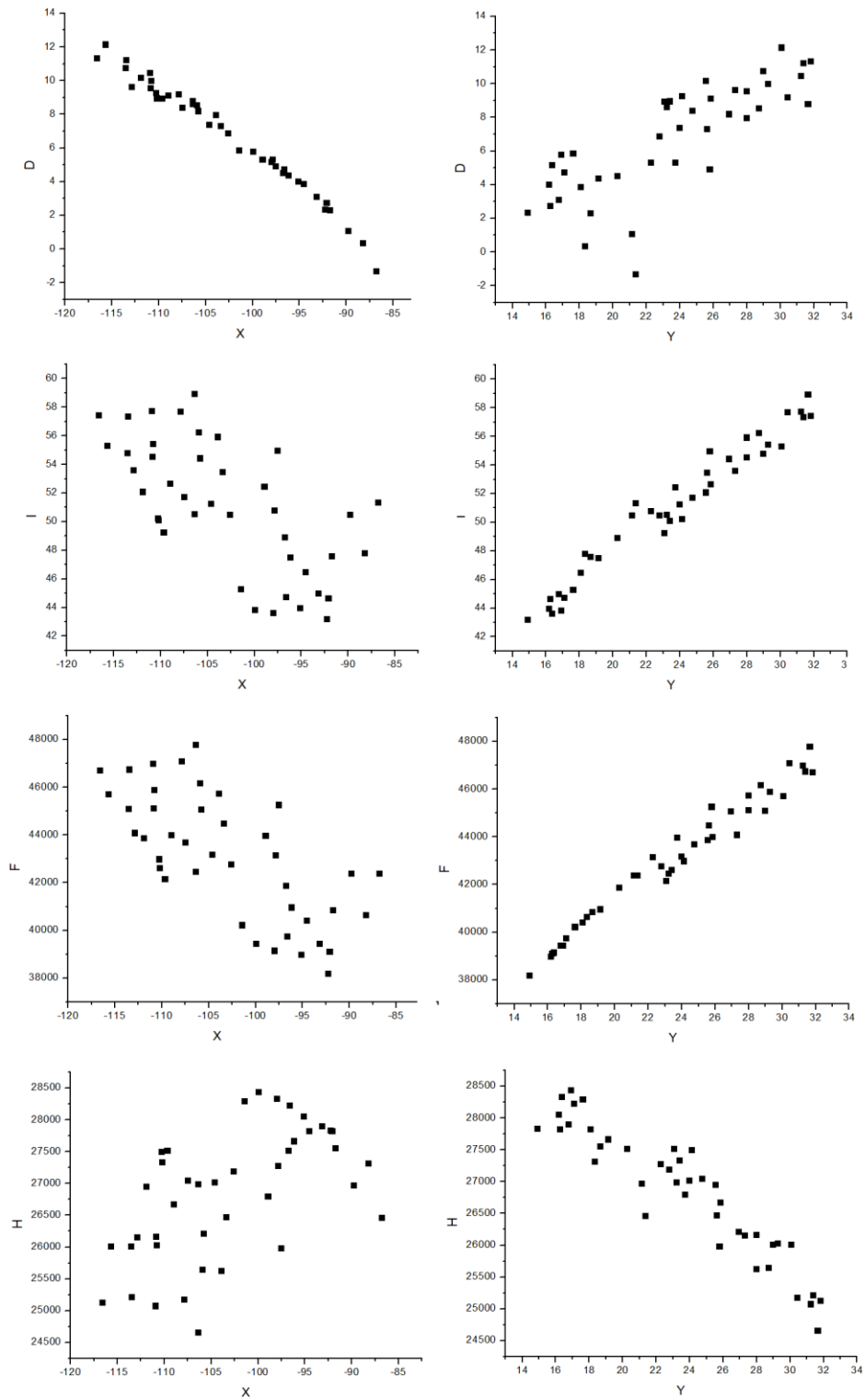


Figura 14. Distribución de las diferentes componentes del campo geomagnético sobre el eje horizontal y vertical para la época 2010.0.

3.4 Método numérico

Se realizaron pruebas con diferentes métodos numéricos para buscar el que brindara la mejor aproximación al campo magnético principal: *curvatura mínima*, *vecino cercano*, *regresiones polinomiales de diferente orden*, *ponderación de distancia inversa*, *polinomio local*, entre otros (figura 27 en la sección de discusión). Después de analizar cada método, dadas las condiciones del número de datos y extensión espacial (la discusión de la selección del método se encuentra en la sección 5.3), se optó por usar una *regresión polinomial de orden 2*, del tipo

$$E(\phi, \lambda) = a_0 + a_1\phi + a_2\lambda + a_3\phi^2 + a_4\lambda^2 + a_5\phi\lambda ;$$

al igual que las metodologías seguidas por De Santis et al., (2003) y Dominici et al., (2010) en el método de las cartas de Italia, así como por Metodiev y Trifonova, (2017) con las cartas de Bulgaria, por mencionar algunos casos.

Primero se realizó la estimación espacial con todas las estaciones disponibles y se calcularon los valores residuales, que son la diferencia entre los datos reales y la estimación. Con estos datos residuales se calculó el error estándar de estimación como:

$$\sigma = \pm\sqrt{[vv]/n - 6} ,$$

donde $[vv]$ es la suma del cuadrado de los valores residuales, n es el número de estaciones y 6 el número de coeficientes (Dominici et al., 2010a). Las estaciones con residuales mayores a 3σ fueron eliminadas.

3.5 Mapas

Los mapas fueron hechos en el programa *Surfer 14*, de la compañía *Golden Software*. Cada despliegue gráfico de la estimación polinomial tiene como límites las coordenadas en

dirección X de -118° a -86° y en dirección Y de 14° a 33° , con el fin de abarcar todo el territorio mexicano.

Los mapas iniciales se obtuvieron de la base de datos del Mapa Digital de México (INEGI, 2015), se usó la capa “Mapa base a nivel estatal y mapa general. Formato raster” (CONABIO, 2006) y fue modificada en sus límites dimensionales, reduciendo las coordenadas del mapa, teniendo como límites: 14° en latitud sur, 33° en latitud norte, -86° en longitud este y -118° en latitud oeste.

Con los límites bien establecidos del territorio mexicano, se creó un archivo *.bln* a partir de digitalizar punto a punto la frontera a trabajar, para cortar el *grid* hecho a partir de la *regresión polinomial*.

Finalmente, se sobreponen todas las capas y son agregadas las ubicaciones de cada estación magnética de repetición y el observatorio magnético, así como los detalles estéticos y la información correspondiente a cada carta.

3.6 Distribución de estaciones magnéticas de repetición en México

Para este apartado se crearon dos mapas donde las estaciones magnéticas de repetición fueron distribuidas, tomando como punto de partida la posición geográfica del Observatorio Magnético de Teoloyucan, con una separación promedio de 400 km y 200 km respectivamente, con el fin de cubrir todo el territorio mexicano. De la misma manera, se colocaron círculos con radio de 400 km y 200 km a la distribución actual de estaciones magnéticas de repetición en México, para evaluar el alcance de la cobertura del campo geomagnético con el que se cuenta actualmente.

4 RESULTADOS

Los resultados se presentan en 5 etapas:

En la sección 4.1 se presenta una revisión sobre los registros magnéticos de México: datos históricos del Observatorio Magnético de Teoloyucan y mediciones de estaciones magnéticas de repetición realizadas en México.

En la sección 4.2, se presentan la tabla de datos asociados a la carta magnética para la época 2010. Los datos de las épocas 1990.0, 1960.0, 1932.0 y 1907.0 se encuentran en el apéndice B.

En la sección 4.3, se presentan las cartas magnéticas (D, I, F, y H) de México para la época 2010 (figura 15). Todas las cartas presentes en este trabajo muestran la posición de las estaciones magnéticas de repetición con un círculo verde y con un círculo rojo la posición del Observatorio Magnético de Teoloyucan. Para facilitar la visualización de cada mapa isogónico, se muestra en color rojo la línea agónica (de declinación cero) y en color verde las de declinación 5° y 10° . roja. En el apéndice A, se encuentran todas las cartas magnéticas en alta resolución de las componentes magnéticas D, I, F y H para las épocas 2010, 1990, 1960, 1932 y 1907 (figuras 28 a 47). El número de estaciones magnéticas de repetición empleadas en cada carta se especifica en la tabla 7 y los datos de cada estación se encuentran en las tablas de datos reducidos del apéndice B.

En la sección 4.4, se presentan los datos relacionados con el método de estimación espacial de cada carta.

En la sección 4.5, se presentan mapas para analizar la distribución de las estaciones magnéticas de repetición en México, así como la distribución que podrían tener tomando

como base la posición del Observatorio Magnético de Teoloyucan, para una mejor cobertura en la medición el campo magnético principal.

4.1 Recopilación de datos históricos y actuales del Observatorio Magnético de Teoloyucan y las estaciones magnéticas de repetición

Otra tarea que se llevó a cabo en este trabajo fue la búsqueda de todos los registros existentes y accesibles del observatorio magnético de Teoloyucan, ya que por diversas vicisitudes, los registros tienen varias discontinuidades, se encuentran en diferentes formatos y en diferentes fuentes o reservorios de información. Actualmente, se cuenta con una base de datos (Tabla 7) con todos los registros compilados en fuentes escritas, impresas y en reservorios internacionales de información cómo lo son la *International Real-time Magnetic Observatory Network* (INTERMAGNET contributors, 2020) o el *World Data Centre for geomagnetism* (British Geological Survey, 2019).

La tabla 7 muestra los diferentes reservorios de datos que tienen registros del Observatorio Magnético de Teoloyucan, siendo que hay información desde la fundación del “Observatorio Meteorológico y Magnético Central de Palacio Nacional” en 1879. Conforme el tiempo ha pasado y la tecnología ha mejorado, el número de datos se van incrementando ya que los intervalos de tiempo en que se realizan las mediciones se van haciendo menores, pasando en 100 años de tener un dato diario, a uno cada minuto. Así mismo, la tabla 8 resume los reservorios de información sobre mediciones magnéticas en territorio mexicano, así como las épocas que abarcan.

Los datos digitales del *World Data Centre for geomagnetism e Intermagnet* fueron revisados para detectar las épocas en que los registros tienen huecos y son interrumpidos. Las tablas 17, 18 y 19 del apéndice D señalan los datos ausentes de los documentos que brindan ambos reservorios. Los datos de 1990 en adelante se encuentran en dos formatos: por minuto y por hora.

Tabla 7. Resumen de la recopilación de datos generados en el Observatorio Magnético de Teoloyucan.

| Observatorio magnético TEO | | | | |
|---|---|---------------------------|-----------------------------|--------------------|
| <i>Base de datos</i> | <i>Años</i> | <i>Intervalo de datos</i> | <i>Formatos disponibles</i> | <i>archivo</i> |
| Libro: Elementos magnéticos de la República Mexicana. Rosendo O. Sandoval, (1950) Primera parte | 1879 - 1950 | 1 d | Libro escaneado | .pdf |
| Anales del I. GEF, UNAM | 1948-1953 / 1955 (2) - 1964 | 1 d | Libro escaneado | .pdf |
| | 1965 - 1976 | 1 h | | |
| World Data System | 1965 - 1990 | 1 h | IAGA2002 | teo1981ghor.hor |
| | 2002 - 2008 | 1 h / 1 min | | Teo200812dmin.min |
| Magnetogramas escaneados | 1962 / 1964 / 1966 - 1968 / 1979 1990 / 1995 / 2000 / 2002 | 24 h | Escaneos | .tif |
| Intermagnet | 2009 - 2010 / 2015 - 2018 | 1 h / 1 min | .min | Teo20170822min.min |
| Datos del servicio magnético | Junio 2001 - 2020 | 1 min | | |

Tabla 8. Resumen de la recopilación de datos sobre estaciones magnéticas de repetición medidas en México.

| Estaciones magnéticas de repetición | | | |
|---|----------------------------------|-----------------------------|----------------|
| <i>Base de datos</i> | <i>Años</i> | <i>Formatos disponibles</i> | <i>archivo</i> |
| Libro: Elementos magnéticos de la República Mexicana. Rosendo O. Sandoval, (1950) Segunda parte | 1587 - 1950 | Libro escaneado | .pdf |
| | | Digital | |
| Libro: Valores magnéticos de la República Mexicana y Centroamérica Ing. Carlos Cañón Amaro (1991) Segunda parte | 1950 - 1991 | Libro escaneado | .pdf |
| Catálogo del servicio magnético (2015) | 1950 - 2013 | | |
| Geological British Survey | 1901 - 2002 | Digital | .txt |
| Esta tesis | 2010 / 1990 / 1960 / 1932 / 1907 | Digital | .pdf |

4.2 Datos asociados para la generación de la carta magnética de la época 2010.0

Tabla 9. Datos de estaciones magnéticas de repetición, del observatorio magnético de Teoloyucan y su reducción para la carta magnética de la época 2010.0 (páginas 45 y 46).

| # | Estación | Año | Mes | Día | Long [°] | Lat [°] | MEDICIÓN | | | | TEO (año 2010) | | | | TEO (Promedio mensual) | |
|----|----------------------|------|-----|-----|-----------|---------|----------|---------|---------|--------|----------------|---------|--------|---------|------------------------|--|
| | | | | | | | D [°] | I [°] | F [nT] | D [°] | I [°] | F [nT] | D [°] | I [°] | F [nT] | |
| 1 | La Paz | 2008 | 12 | 12 | -110.3255 | 24.1123 | 9.536 | 50.3016 | 43194.9 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 2 | San José del Cabo | 2008 | 12 | 13 | -109.6870 | 23.0626 | 9.2059 | 49.3179 | 42365.9 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 3 | Todos Santos | 2008 | 12 | 14 | -110.2133 | 23.3920 | 9.2324 | 50.1774 | 42829.1 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 4 | Y de Sto Domingo | 2008 | 12 | 15 | -111.9019 | 25.5193 | 10.434 | 52.1602 | 44080.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 5 | San Ignacio | 2008 | 12 | 17 | -112.9005 | 27.2898 | 9.8909 | 53.68 | 44294.1 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 6 | Bahía de los Angeles | 2008 | 12 | 18 | -113.5574 | 28.9534 | 11.0315 | 54.855 | 45313.4 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 7 | El Rosario | 2008 | 12 | 19 | -115.7272 | 30.0530 | 12.4217 | 55.3804 | 45916.6 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 8 | Ensenada | 2008 | 12 | 20 | -116.6102 | 31.8094 | 11.6009 | 57.5144 | 46912.4 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.8397 | 47.5799 | 41339.3 | |
| 9 | Matamoros | 2009 | 2 | 8 | -97.5297 | 25.7719 | 5.0432 | 54.9831 | 45338.9 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 10 | Cd Victoria | 2009 | 2 | 9 | -98.9542 | 23.7150 | 5.4342 | 52.4674 | 44051.5 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 11 | Tampico | 2009 | 2 | 10 | -97.8833 | 22.2569 | 5.4368 | 50.8065 | 43234.7 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 12 | Nautla | 2009 | 2 | 12 | -96.7906 | 20.2386 | 4.6263 | 48.9184 | 41939.9 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 13 | Veracruz | 2009 | 2 | 13 | -96.1792 | 19.1267 | 4.4973 | 47.53 | 41040.3 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 14 | Minatitlán | 2009 | 2 | 14 | -94.5676 | 18.0532 | 3.9736 | 46.5042 | 40493.7 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 15 | Cd del Carmen | 2009 | 2 | 16 | -91.7660 | 18.6578 | 2.4249 | 47.6077 | 40932.7 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 16 | Nuevo Casas Grandes | 2009 | 12 | 14 | -107.8781 | 30.4035 | 9.3115 | 57.7062 | 47180.8 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 17 | Nogales | 2009 | 12 | 16 | -110.9733 | 31.2274 | 10.5925 | 57.7629 | 47069.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 18 | Pto Peñasco | 2009 | 12 | 18 | -113.5213 | 31.3531 | 11.3424 | 57.364 | 46823.1 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 19 | Hermosillo | 2009 | 12 | 20 | -110.8478 | 29.2567 | 10.1029 | 55.468 | 45974.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 20 | Guaymas | 2009 | 12 | 21 | -110.8859 | 27.9875 | 9.6729 | 54.5749 | 45203.8 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 21 | Los Mochis | 2009 | 12 | 23 | -108.9789 | 25.8179 | 9.2473 | 52.7013 | 44081.1 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 22 | Culiacán | 2009 | 12 | 24 | -107.4932 | 24.7425 | 8.5165 | 51.7637 | 43760.2 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 23 | Mazatlán | 2009 | 12 | 26 | -106.3956 | 23.1919 | 8.7468 | 50.5457 | 42537.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 24 | Oaxaca | 2010 | 12 | 7 | -96.6614 | 17.0947 | 4.7363 | 44.748 | 39752.8 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.6843 | 47.5258 | 41206.9 | |
| 25 | Salina Cruz | 2010 | 12 | 9 | -95.1538 | 16.1713 | 4.0369 | 43.976 | 38990.2 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | |
| 26 | Tuxtla Gutiérrez | 2010 | 12 | 11 | -93.2026 | 16.7415 | 3.1117 | 44.9841 | 39447.3 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | |
| 27 | Comitán | 2010 | 12 | 13 | -92.1167 | 16.2543 | 2.7449 | 44.6601 | 39127.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | |
| 28 | Tapachula | 2010 | 12 | 15 | -92.2951 | 14.8852 | 2.3476 | 43.2052 | 38185.9 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | |
| 29 | Pinotepa Nacional | 2011 | 10 | 27 | -98.0388 | 16.3378 | 5.1326 | 43.6207 | 39067.5 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 30 | Zihuatanejo | 2011 | 10 | 28 | -101.4626 | 17.6078 | 5.7993 | 45.2849 | 40140.9 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 31 | Acapulco | 2011 | 11 | 25 | -99.9764 | 16.9033 | 5.7489 | 43.843 | 39361.6 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 32 | Zacatecas | 2011 | 12 | 13 | -102.6433 | 22.7768 | 6.8295 | 50.4954 | 42677.4 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 33 | Durango | 2011 | 12 | 15 | -104.6611 | 23.9696 | 7.3465 | 51.242 | 43099.9 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 34 | Torreón | 2011 | 12 | 17 | -103.4179 | 25.6080 | 7.2785 | 53.4514 | 44394.6 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 35 | Chihuahua | 2011 | 12 | 19 | -105.9613 | 28.7176 | 8.4838 | 56.2355 | 46092.5 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 36 | Cd Juárez | 2011 | 12 | 21 | -106.4250 | 31.6361 | 8.7427 | 58.9206 | 47711.6 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 37 | Jaco | 2011 | 12 | 23 | -103.9547 | 27.9577 | 7.9234 | 55.9167 | 45665.1 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 38 | Parral | 2011 | 12 | 29 | -105.7895 | 26.9233 | 8.1523 | 54.4245 | 44999.8 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.5206 | 47.4962 | 41050.6 | |
| 39 | Merida | 2013 | 8 | 28 | -89.7844 | 21.1363 | 0.7984 | 50.4044 | 42181.3 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.2831 | 47.4425 | 40915.5 | |
| 40 | Puerto Juárez | 2013 | 9 | 1 | -86.7976 | 21.3308 | -1.6093 | 51.2861 | 42158.8 | 5.5791 | 47.5175 | 41139.0 | 5.2831 | 47.4425 | 40915.5 | |
| 41 | Chetumal | 2013 | 9 | 3 | -88.2356 | 18.3087 | 0.0812 | 47.7201 | 40440.5 | 5.5674 | 47.5175 | 41139.0 | 5.2831 | 47.4425 | 40915.5 | |

| # | Estación | Año | Mes | Día | Long [°] | Lat [°] | REDUCCIÓN A LA ÉPOCA 2010.0 | | | | | | | | | | RESIDUALES | | | | |
|----|----------------------|------|-----|-----|-----------|---------|-----------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|------------|--|--|--|--|
| | | | | | | | D [°] | I [°] | F [inT] | H [inT]* | Z [inT]* | X [inT]* | Y [inT]* | D [°] | I [°] | F [inT] | H [inT]* | | | | |
| 1 | La Paz | 2008 | 12 | 12 | -110.3255 | 24.1123 | 9.2754 | 50.2391 | 42994.7 | 27498.7 | 33050.9 | 27139.2 | 4432.3 | 0.0439 | -0.0914 | -14.0 | 97.6 | | | | |
| 2 | San José del Cabo | 2008 | 12 | 13 | -109.6870 | 23.0626 | 8.9453 | 49.2554 | 42165.7 | 27521.0 | 31945.8 | 27186.3 | 4279.3 | 0.0050 | -0.0920 | -75.2 | 36.2 | | | | |
| 3 | Todos Santos | 2008 | 12 | 14 | -110.2133 | 23.3920 | 8.9718 | 50.1149 | 42628.9 | 27535.8 | 32710.5 | 27001.3 | 4263.0 | -0.1522 | 0.1398 | 66.8 | -95.2 | | | | |
| 4 | Y de Sto Domingo | 2008 | 12 | 15 | -111.9019 | 25.5193 | 10.1734 | 52.0977 | 43879.8 | 26956.1 | 34623.8 | 26532.3 | 4761.2 | 0.3160 | 0.0150 | 60.7 | 20.2 | | | | |
| 5 | San Ignacio | 2008 | 12 | 17 | -112.9005 | 27.2898 | 9.6303 | 53.6175 | 44093.9 | 26155.3 | 35498.9 | 25786.7 | 4375.5 | -0.7247 | 0.0090 | -68.4 | -68.6 | | | | |
| 6 | Bahía de los Angeles | 2008 | 12 | 18 | -113.5574 | 28.9534 | 10.7709 | 54.7925 | 45113.2 | 26009.5 | 36860.6 | 25551.3 | 4860.7 | 0.0467 | -0.0053 | -4.8 | 8.9 | | | | |
| 7 | El Rosario | 2008 | 12 | 19 | -115.7272 | 30.0530 | 12.1611 | 55.3179 | 45716.4 | 26013.6 | 37593.6 | 25429.9 | 5480.1 | 0.6936 | -0.0287 | 1.9 | 56.8 | | | | |
| 8 | Ensenada | 2008 | 12 | 20 | -116.6102 | 31.8094 | 11.3403 | 57.4519 | 46712.2 | 25131.5 | 39375.6 | 24640.8 | 4941.8 | -0.5499 | 0.0188 | 4.0 | -32.3 | | | | |
| 9 | Matamoros | 2009 | 2 | 8 | -97.5297 | 25.7719 | 4.9380 | 54.9747 | 45271.0 | 25982.7 | 37072.4 | 25886.3 | 2236.5 | -0.0813 | 0.0073 | 6.3 | -13.3 | | | | |
| 10 | Cd Victoria | 2009 | 2 | 9 | -98.9542 | 23.7150 | 5.3290 | 52.4590 | 43983.6 | 26800.5 | 34875.4 | 26684.6 | 2489.1 | -0.2623 | 0.0086 | 5.9 | -5.0 | | | | |
| 11 | Tampico | 2009 | 2 | 10 | -97.8833 | 22.2569 | 5.3316 | 50.7981 | 43166.8 | 27283.8 | 33451.0 | 27165.7 | 2535.2 | 0.2140 | -0.0169 | 2.0 | 29.7 | | | | |
| 12 | Nautla | 2009 | 2 | 12 | -96.7906 | 20.2386 | 4.5211 | 48.9100 | 41872.0 | 27520.1 | 31558.0 | 27434.5 | 2169.3 | -0.1512 | 0.0213 | 19.6 | -11.1 | | | | |
| 13 | Veracruz | 2009 | 2 | 13 | -96.1792 | 19.1267 | 4.3921 | 47.5216 | 40972.4 | 27669.1 | 30218.5 | 27587.9 | 2119.0 | -0.0524 | -0.0044 | -38.1 | -22.9 | | | | |
| 14 | Minatitlán | 2009 | 2 | 14 | -94.5676 | 18.0532 | 3.8684 | 46.4958 | 40425.8 | 27829.4 | 29321.8 | 27766.0 | 1877.5 | 0.0826 | 0.0120 | 21.1 | 5.3 | | | | |
| 15 | Cd del Carmen | 2009 | 2 | 16 | -91.7660 | 18.6578 | 2.3197 | 47.5993 | 40864.8 | 27555.6 | 30176.5 | 27533.0 | 1115.3 | 0.0666 | 0.0058 | 6.1 | -0.3 | | | | |
| 16 | Nuevo Casas Grandes | 2009 | 12 | 14 | -107.8781 | 30.4035 | 9.2063 | 57.6978 | 47112.9 | 25176.4 | 39821.8 | 24852.1 | 4028.0 | -0.0701 | 0.0143 | 18.3 | -10.6 | | | | |
| 17 | Nogales | 2009 | 12 | 16 | -110.9733 | 31.2274 | 10.4873 | 57.7545 | 47001.1 | 25077.3 | 39752.1 | 24658.4 | 4564.5 | 0.2640 | 0.0118 | -7.0 | -26.5 | | | | |
| 18 | Pto Penasco | 2009 | 12 | 18 | -113.5213 | 31.3531 | 11.2372 | 57.3556 | 46755.2 | 25220.8 | 39369.5 | 24737.3 | 4914.8 | 0.2951 | 0.0084 | 10.8 | -9.5 | | | | |
| 19 | Hermosillo | 2009 | 12 | 20 | -110.8478 | 29.2567 | 9.9977 | 55.4596 | 45906.1 | 26028.1 | 37814.1 | 25632.9 | 4518.7 | -0.0077 | -0.0386 | 8.5 | 72.9 | | | | |
| 20 | Guaymas | 2009 | 12 | 21 | -110.8859 | 27.9875 | 9.5677 | 54.5665 | 45135.9 | 26167.9 | 36776.2 | 25803.9 | 4349.4 | -0.3028 | 0.0185 | 9.7 | -19.8 | | | | |
| 21 | Los Mochis | 2009 | 12 | 23 | -108.9789 | 25.8179 | 9.1421 | 52.6929 | 44013.2 | 26675.8 | 35008.0 | 26337.0 | 4238.4 | 0.0730 | 0.0160 | -34.0 | -41.4 | | | | |
| 22 | Culliacán | 2009 | 12 | 24 | -107.4932 | 24.7425 | 8.4113 | 51.7553 | 43692.3 | 27046.4 | 34314.8 | 26755.5 | 3956.3 | -0.1126 | -0.0003 | 53.1 | 43.9 | | | | |
| 23 | Mazatlán | 2009 | 12 | 26 | -106.3956 | 23.1919 | 8.6416 | 50.5373 | 42469.1 | 26992.3 | 32787.8 | 26685.9 | 4055.7 | 0.6065 | 0.0274 | -27.4 | -61.1 | | | | |
| 24 | Oaxaca | 2010 | 12 | 7 | -96.6614 | 17.0947 | 4.7363 | 44.7480 | 39752.8 | 28232.8 | 27985.6 | 28136.4 | 2331.2 | 0.0989 | -0.0068 | 27.1 | 37.5 | | | | |
| 25 | Salina Cruz | 2010 | 12 | 9 | -95.1538 | 16.1713 | 4.0369 | 43.9760 | 38990.2 | 28058.5 | 27073.1 | 27988.9 | 1975.3 | -0.0275 | -0.0039 | -19.8 | -17.3 | | | | |
| 26 | Tuxtla Gutiérrez | 2010 | 12 | 11 | -93.2026 | 16.7415 | 3.1117 | 44.9841 | 39447.3 | 27901.2 | 27885.7 | 27860.1 | 1514.6 | -0.0612 | -0.0075 | -1.2 | 13.4 | | | | |
| 27 | Comitán | 2010 | 12 | 13 | -92.1167 | 16.2543 | 2.7449 | 44.6601 | 39127.0 | 27830.6 | 27502.4 | 27798.7 | 1332.8 | 0.1369 | -0.0030 | -2.1 | 8.8 | | | | |
| 28 | Tapachula | 2010 | 12 | 15 | -92.2951 | 14.8852 | 2.3476 | 43.2052 | 38185.9 | 27834.0 | 26142.6 | 27810.6 | 1140.1 | -0.3698 | -0.0023 | -12.4 | -25.9 | | | | |
| 29 | Pinolepa Nacional | 2011 | 10 | 27 | -98.0388 | 16.3378 | 5.1912 | 43.6419 | 39156.0 | 28335.9 | 27023.5 | 28219.7 | 2563.8 | 0.1188 | 0.0071 | -1.8 | -15.5 | | | | |
| 30 | Zihuatanejo | 2011 | 10 | 28 | -101.4626 | 17.6078 | 5.8579 | 45.3061 | 40229.4 | 28294.1 | 28598.1 | 28146.3 | 2887.7 | -0.2722 | 0.0323 | 45.9 | -5.9 | | | | |
| 31 | Acapulco | 2011 | 11 | 25 | -99.9764 | 16.9033 | 5.8075 | 43.8642 | 39450.1 | 28442.9 | 27337.0 | 28296.9 | 2878.0 | 0.1442 | -0.0436 | -41.7 | 17.1 | | | | |
| 32 | Zacatecas | 2011 | 12 | 13 | -102.6433 | 22.7768 | 6.8881 | 50.5166 | 42765.9 | 27192.9 | 33007.1 | 26996.6 | 3261.2 | 0.0283 | -0.0021 | -10.4 | -2.5 | | | | |
| 33 | Durango | 2011 | 12 | 15 | -104.6611 | 23.9696 | 7.4051 | 51.2632 | 43188.4 | 27024.8 | 33688.2 | 26799.5 | 3483.0 | -0.2117 | -0.0243 | -10.4 | 29.0 | | | | |
| 34 | Torreón | 2011 | 12 | 17 | -103.4179 | 25.6080 | 7.3371 | 53.4726 | 44483.4 | 26476.6 | 35745.4 | 26259.8 | 3381.2 | -0.0579 | 0.0035 | 12.3 | 7.1 | | | | |
| 35 | Chihuahua | 2011 | 12 | 19 | -105.9613 | 28.7176 | 8.5424 | 56.2567 | 46181.0 | 25652.3 | 38401.1 | 25367.7 | 3810.4 | -0.0051 | -0.0050 | 1.9 | 12.3 | | | | |
| 36 | Cd Juárez | 2011 | 12 | 21 | -106.4250 | 31.6361 | 8.8013 | 58.9418 | 47800.1 | 24660.4 | 40947.7 | 25377.9 | 3773.2 | -0.0820 | -0.0052 | -1.4 | -1.8 | | | | |
| 37 | Jaco | 2011 | 12 | 23 | -103.9547 | 26.9233 | 7.2920 | 55.9379 | 45753.6 | 25626.2 | 37903.7 | 25779.9 | 3558.5 | 0.1814 | 0.0003 | -15.4 | -21.1 | | | | |
| 38 | Parral | 2011 | 12 | 29 | -105.7895 | 26.9233 | 8.2109 | 54.4457 | 45088.3 | 26217.7 | 36682.3 | 25948.9 | 3744.3 | -0.0998 | 0.0004 | 1.6 | 1.6 | | | | |
| 39 | Mérida | 2013 | 8 | 28 | -89.7844 | 21.1363 | 1.0944 | 50.4993 | 42404.9 | 26973.2 | 32720.3 | 26968.3 | 515.2 | 0.2669 | -0.0075 | 1.3 | 12.6 | | | | |
| 40 | Puerto Juárez | 2013 | 9 | 1 | -86.7976 | 21.3308 | -1.3133 | 51.3610 | 42382.4 | 26464.0 | 33104.7 | 26457.1 | -606.5 | -0.3116 | 0.0090 | -3.1 | -12.6 | | | | |
| 41 | Chetumal | 2013 | 9 | 3 | -88.2356 | 18.3087 | 0.3655 | 47.7950 | 40664.1 | 27317.5 | 30121.7 | 27317.0 | 174.3 | 0.2838 | -0.0026 | 3.9 | 9.4 | | | | |

4.3 Cartas magnéticas de México

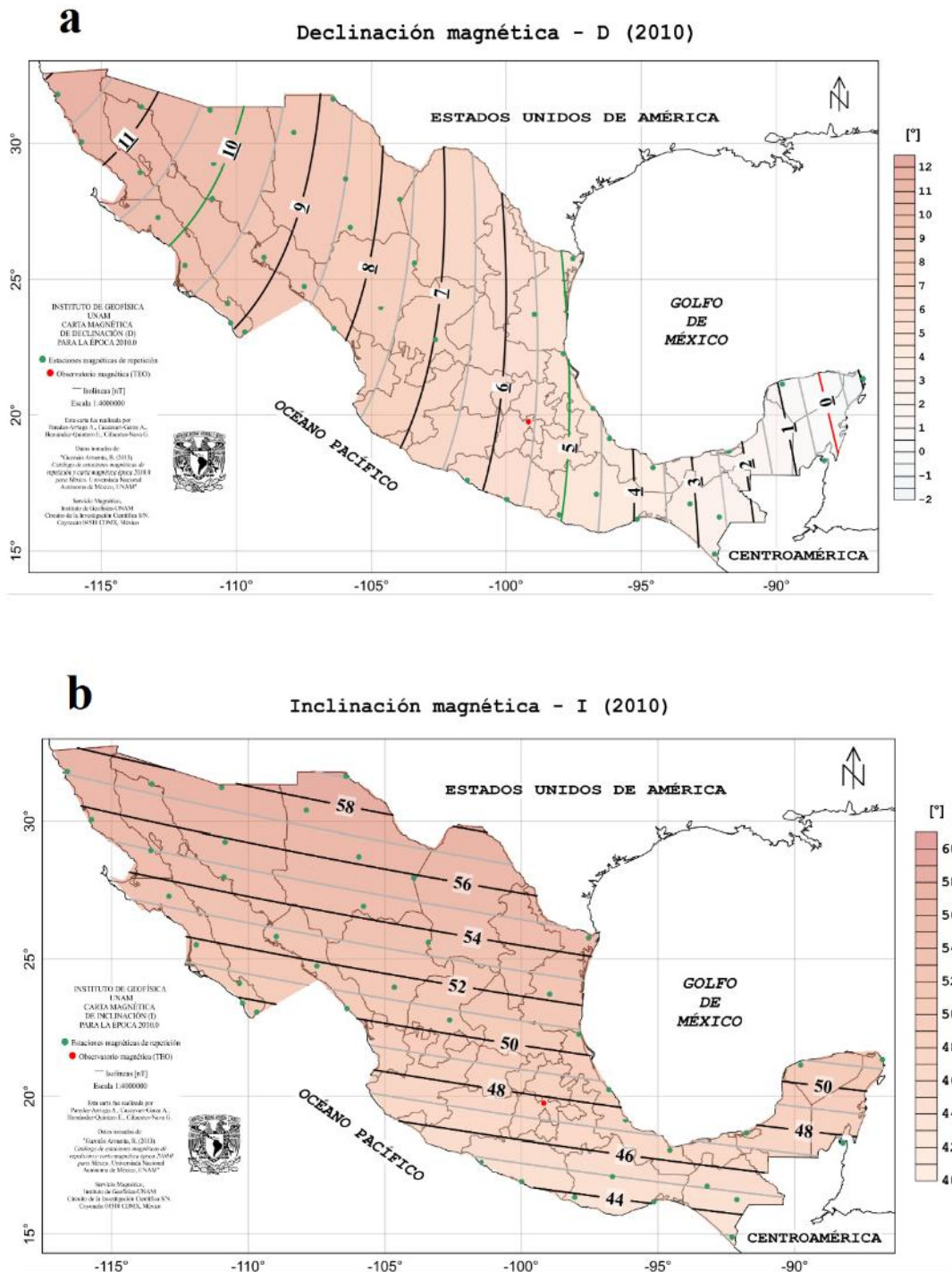


Figura 15.1 Cartas magnéticas de declinación (a) e inclinación(b), para la época 2010 en México.

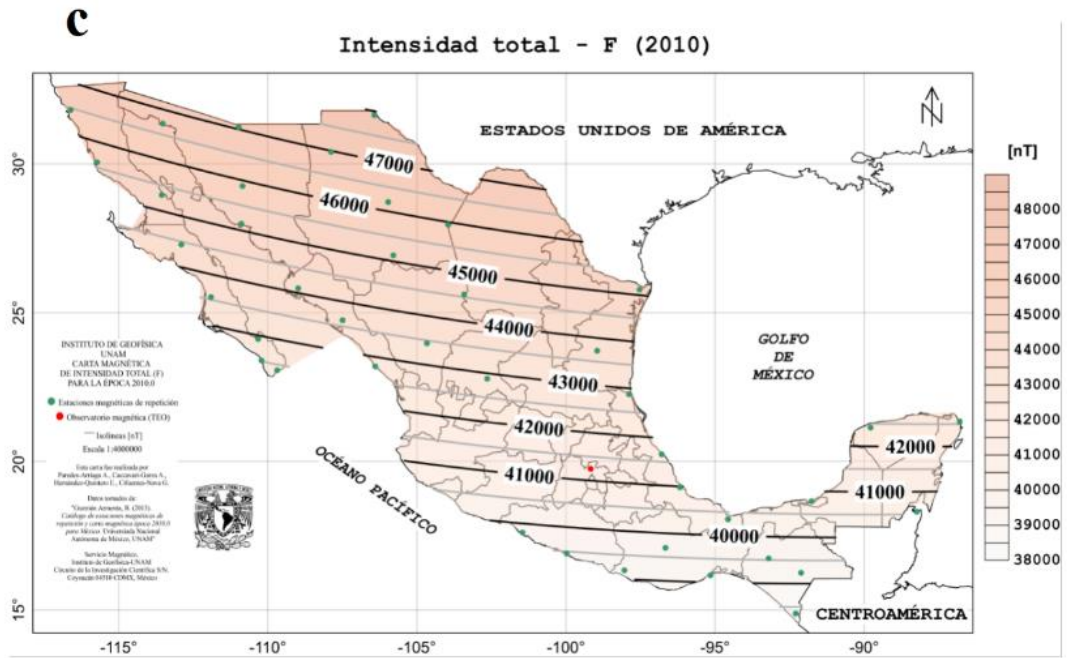


Figura 15.2 Cartas magnéticas de intensidad total (c) e intensidad horizontal (d) para la época 2010 en México.

4.4 Datos del método de estimación espacial asociados a cada carta magnética

Es esta sección se presentan los datos asociados a la estimación espacial de cada carta magnética: coeficientes de la regresión polinomial (a_0, \dots, a_5), error asociado a la estimación (σ), coeficiente de correlación múltiple (R^2) y número de estaciones magnéticas de repetición empleadas en cada carta magnética (n).

Tabla 10. Datos asociados a la estimación espacial de cada carta magnética.

| Comp. | Coef. | 2010.0 | 1990.0 | 1960.0 | 1932.0 | 1907.0 |
|-------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| D | a_0 | -113.111 | -108.585 | -63.684 | -55.919 | -48.526 |
| | a_1 | -2.293 | -2.327 | -1.545 | -1.465 | -1.312 |
| | a_2 | -1.404 | -1.635 | -1.490 | -1.646 | -1.870 |
| | a_3 | -0.011 | -0.012 | -0.008 | -0.008 | -0.008 |
| | a_4 | -0.005 | 0.001 | 0.003 | 0.008 | 0.002 |
| | a_5 | -0.017 | -0.016 | -0.014 | -0.014 | -0.019 |
| | σ | 0.288 | 0.291 | 0.473 | 0.379 | 0.275 |
| | R^2 | 0.976 | 0.961 | 0.928 | 0.938 | 0.950 |
| n | 41 | 45 | 47 | 46 | 32 | |
| I | a_0 | 22.635 | 46.919 | 78.846 | 99.084 | 41.557 |
| | a_1 | -0.142 | 0.321 | 1.067 | 1.532 | 0.558 |
| | a_2 | 1.511 | 1.539 | 2.006 | 2.293 | 2.675 |
| | a_3 | -0.002 | 0.000 | 0.005 | 0.007 | 0.003 |
| | a_4 | -0.009 | -0.009 | -0.003 | -0.006 | -0.007 |
| | a_5 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.008 | 0.010 |
| | σ | 0.226 | 0.289 | 0.354 | 0.459 | 0.223 |
| | R^2 | 0.995 | 0.995 | 0.992 | 0.989 | 0.995 |
| n | 41 | 45 | 46 | 46 | 32 | |
| F | a_0 | 3618.561 | 29968.152 | 35852.480 | 22964.390 | 19360.159 |
| | a_1 | -495.603 | -5.011 | 61.387 | -159.955 | 80.583 |
| | a_2 | 953.880 | 1080.651 | 1101.178 | 1347.640 | 2651.049 |
| | a_3 | -2.381 | 0.057 | 0.196 | -0.421 | 2.243 |
| | a_4 | 0.857 | 2.450 | 0.665 | 4.733 | 3.398 |
| | a_5 | 3.716 | 5.419 | 4.702 | 8.882 | 20.651 |
| | σ | 186.757 | 225.841 | 218.202 | 229.322 | 253.438 |
| | R^2 | 0.988 | 0.987 | 0.990 | 0.986 | 0.974 |
| n | 41 | 45 | 46 | 42 | 30 | |
| H | a_0 | 19390.001 | 22301.613 | 7163.663 | -24311.488 | 15456.435 |
| | a_1 | 159.666 | -128.931 | -536.108 | -1238.902 | -298.523 |
| | a_2 | -36.981 | -43.193 | -335.117 | -595.909 | 220.623 |
| | a_3 | -0.669 | -0.459 | -3.095 | -6.925 | -1.257 |
| | a_4 | -7.980 | -7.718 | -13.821 | -15.378 | -313.406 |
| | a_5 | -1.487 | -1.076 | -6.315 | -9.468 | -0.714 |
| | σ | 145.540 | 139.643 | 157.436 | 306.344 | 168.659 |
| | R^2 | 0.957 | 0.963 | 0.959 | 0.945 | 0.961 |
| n | 41 | 45 | 46 | 42 | 30 | |

4.5 Distribución de las estaciones magnéticas de repetición en México

El diseño de una red de monitoreo está basada, a grandes rasgos, en la selección de puntos de muestreo y la frecuencia temporal de muestreo, con el fin de determinar una característica física, química y/o biológica (Loaiciga et al., 1992), así mismo, puede tener diferentes objetivos subyacentes (Prakash, 2014).

La Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) recomienda que, para la cartografía del campo magnético principal, las mediciones en estaciones magnéticas de repetición se realicen con una separación aproximada de 200 km (Vestine, 1961), ya que así se pueden distinguir características con longitudes de onda superiores a 400 km, lo cual es un espaciamiento considerado adecuado dado que la variación secular es un fenómeno que se origina en el núcleo de la Tierra, al menos 2900 km debajo de la corteza (Newitt et al., 1996). Una revisión sobre las redes de estaciones magnéticas de repetición en 16 países, muestra que el esparcimiento entre estaciones varía de 53 km a 415 km, con una media de 230 km (Newitt et al., 1996). Para la determinación de la variación secular, es más valioso tener series de tiempo más densas en menos estaciones, que series de tiempo dispersas en un número mayor de estaciones (Coordination Committee for Common European Repeat Station Surveys, 2003).

Las figuras 16 a y b muestran la distribución de estaciones magnéticas de repetición a las que se les colocó un círculo con radio equivalente a 400 km y 200 km, con el fin de evaluar la distribución de las estaciones magnéticas de repetición en el país. Los mapas de las figuras 17 a y b muestran una posible distribución de las estaciones magnéticas de repetición, usando como eje el Observatorio Magnético de Teoloyucan.

Estos mapas tienen la finalidad de apoyar al mejoramiento de la distribución de estaciones magnéticas de repetición en México mostrando las zonas en el país que requieren alguna estación de repetición o que tienen más mediciones de las requeridas.

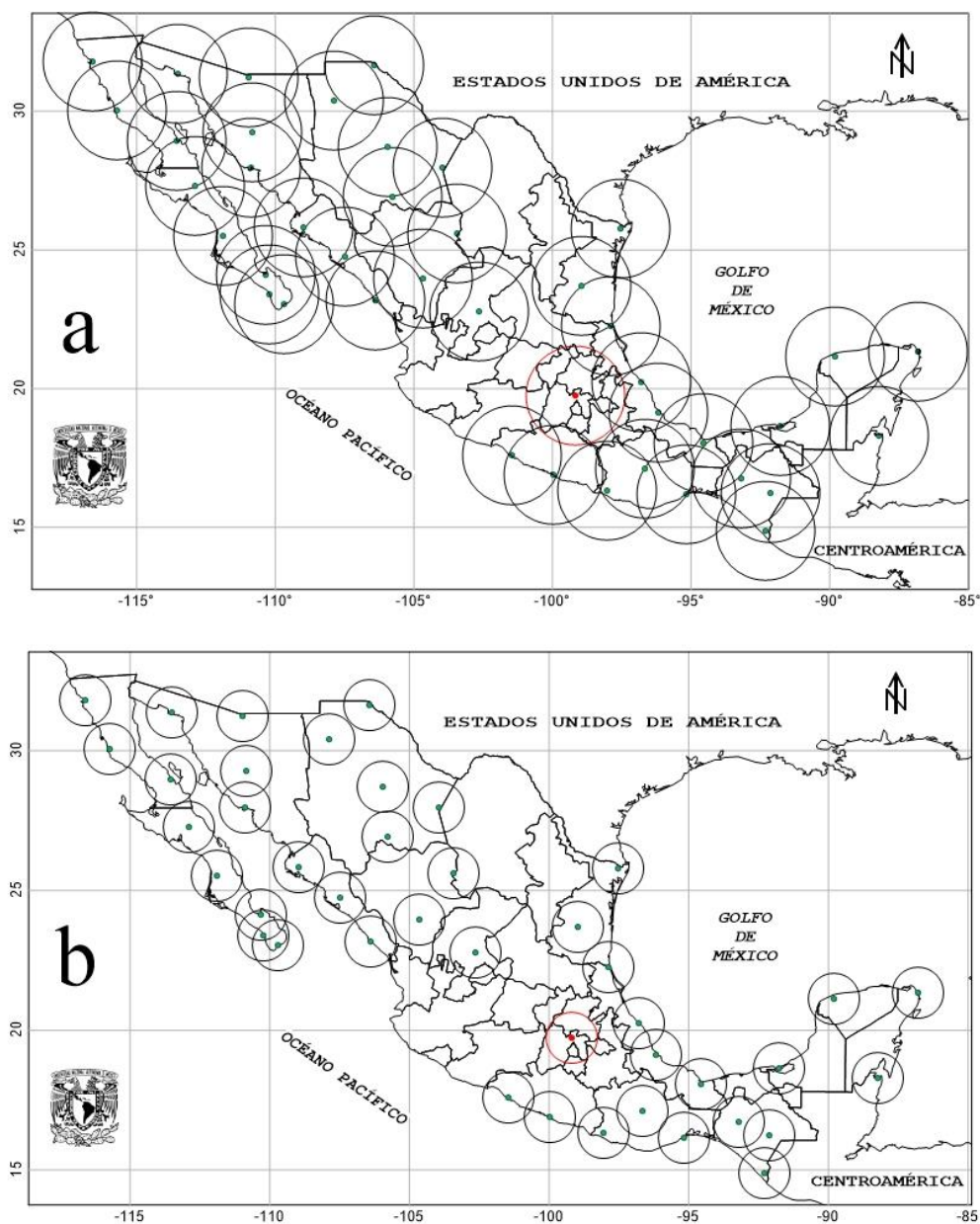


Figura 16. Red de estaciones magnéticas de repetición utilizada en la carta magnética de México para la época 2010.0, con diámetro de 400 km (a) y con diámetro de 200 km(b). El círculo rojo corresponde al Observatorio Magnético de Teoloyucan.

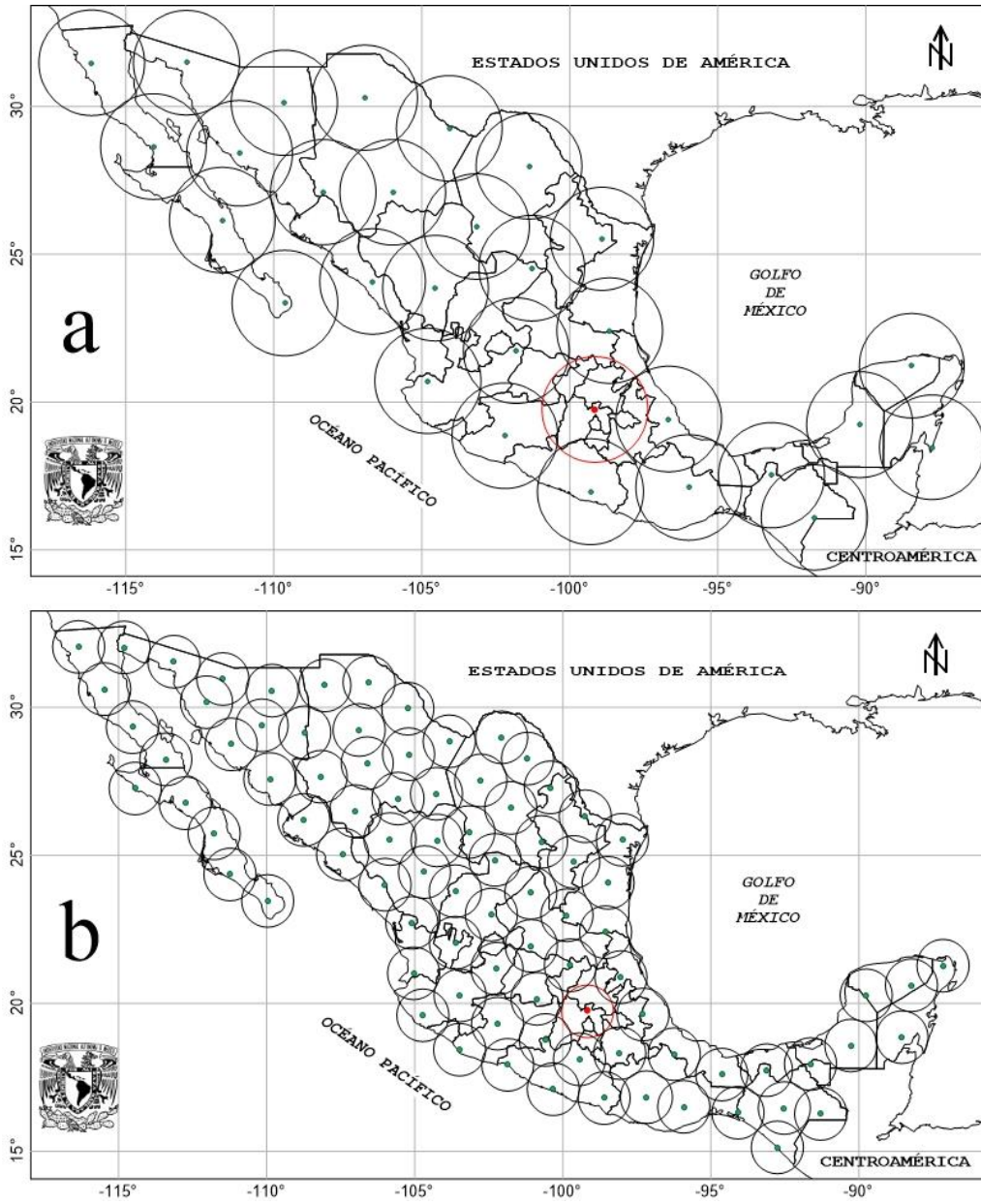


Figura 17. Mapa hipotético con las distribuciones de estaciones magnéticas de repetición basadas en la posición geográfica del Observatorio Magnético de Teoyucan. Se tendrían 29 estaciones distanciadas ~400 km (a) y 87 estaciones si la distancia media fuera ~200 km (b). El círculo rojo corresponde al Observatorio Magnético de Teoyucan.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La discusión de este trabajo se presenta en 5 bloques: 1) sobre las cartas magnéticas generadas en este trabajo, 2) la comparación de las cartas de declinación con las previamente existentes, 3) la implementación de una *regresión polinomial de segundo orden* como método de estimación espacial para generar las cartas magnéticas, 4) la actual distribución de estaciones magnéticas de repetición en México y 5) sobre la importancia en la conservación de los datos históricos relevantes en Ciencias de la Tierra.

5.1 Sobre las cartas magnéticas para México.

Todas las cartas magnéticas, a excepción de la de 1907, se han generado correctamente utilizando entre 41 y 47 estaciones magnéticas de repetición. Las cartas de 2010 y 1990 utilizan 41 y 45 datos respectivamente para cada variable (D, I, H y F), mientras que para 1960 se usan 47 datos de declinación y 46 para la inclinación, intensidad total e intensidad horizontal; para 1932 se utilizan 46 datos para declinación e inclinación, 42 para intensidad total y 45 para intensidad horizontal.

Para 1907 se usaron 32 estaciones para declinación e inclinación y 30 para ambas intensidades. Aunque en los libros de Sandoval (1950) y Cañón (1991) se cuenta con un registro más amplio de estaciones, los datos tienen errores de medición, precisión, y/o transcripción, que pueden deberse a muchas circunstancias, desde una tormenta solar o una anomalía cortical hasta por un fallo de los equipos o una mala transcripción de los documentos.

Declinación:

Para el 2010, la línea agónica (de declinación 0°) se encuentra sobre Yucatán y Quintana Roo. Este es el único mapa que muestra valores negativos, siendo de -1° la isógona que cruza por Quintana Roo. Entre los años de 1960 y el 2010, la declinación magnética muestra una deriva al oeste. Este fenómeno, también conocido como *Westward drive*, ha sido ampliamente documentado desde mediados del siglo XX (Crisp et al., 1950; E. H. Vestine y Kahle, 1968; Olson y Aurnou, 1999; Dumberry y Finlay, 2007).

Para 1960 y 1932, la declinación se puede dividir en una zona norte y una zona sur, donde la zona sur continúa la deriva al oeste y las isolíneas muestran una posición cuasi vertical; por otro lado, a partir de la isolínea de 10° , la zona norte tiende a inclinarse horizontalmente. Para 1907, todas las isolíneas se encuentran más al oeste que las de 1932, lo cual indica que de 1907 a 1932 la declinación magnética sufrió una deriva al este y, posterior a 1932, la deriva fue al oeste. Esto da evidencia de posibles anomalías en la tasa de variación anual o secular del campo geomagnético sobre el territorio mexicano. En el trabajo de Avilés, (2014), se reportan evidencias de aceleraciones en la variación del campo en ciertas zonas del país.

Inclinación:

Esta es la componente más estable en el espacio y tiempo dentro del periodo de análisis, las isolíneas muestran una disposición horizontal con una ligera inclinación de $\sim 10^\circ$. Desde 1907 hasta el 2010 los valores máximos oscilan entre los 58° y 59° en Sonora, Chihuahua y Baja California, y los mínimos entre los 41° y 44° al sur de Oaxaca y

Chiapas. Si se usa como referencia la isolínea de 50°, su posición varía en menos de 3° en latitud a lo largo de 100 años.

Intensidad total:

Al observar los mapas de intensidad total, se evidencia que en los últimos 100 años la intensidad del campo magnético está disminuyendo paulatinamente. Las isolíneas muestran una disposición horizontal ligeramente inclinadas.

Intensidad horizontal:

Esta es una variable calculada como $H = F \cdot \cos(I)$, entonces, al ser una componente en la que a la intensidad total se le aplica una transformación lineal, también refleja la tendencia a decrecer con el paso de los años sobre todo el territorio mexicano.

La figura 18 muestra la variación de las componentes del campo geomagnético medidas en el observatorio magnético de Teoloyucan entre los años 1910 y 2010, donde se ven los cambios de la declinación, inclinación e intensidad. La figura 19 muestra los cambios de declinación magnética del año 1907 al 2014 en la región de Mérida, Yucatán. Ambas tendencias mostradas en las figuras 18 y 19 son consistentes con la variación observada en las cartas. Por el intervalo de tiempo entre las 5 cartas aquí presentadas no es posible hacer un análisis de variación secular, sin embargo, los cambios generales en todo el territorio mexicano son observables.

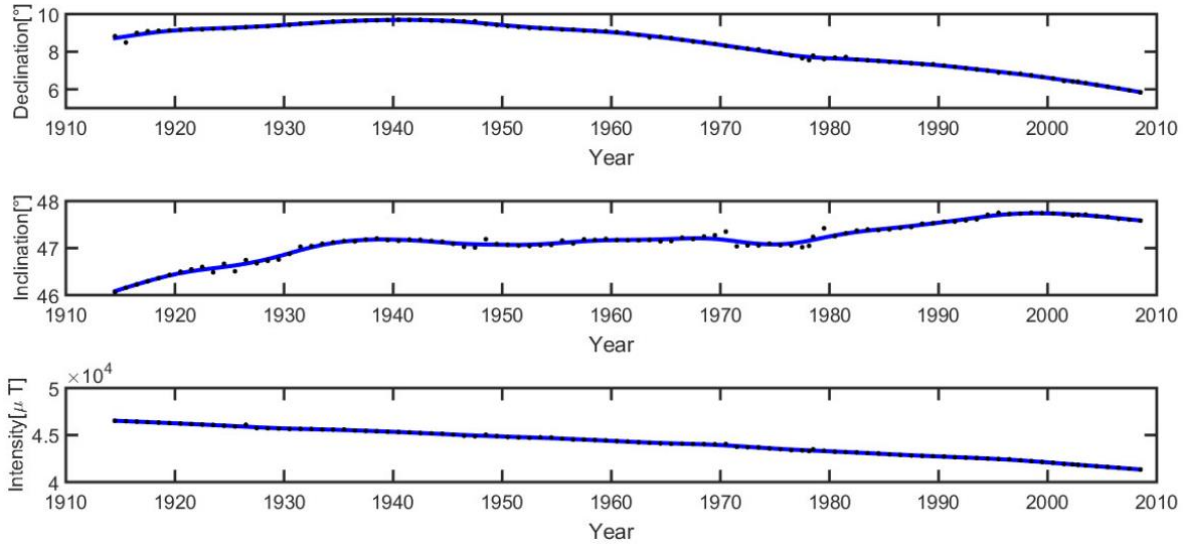


Figura 18. Curvas representativas de las componentes del campo geomagnético medidas en el observatorio magnético de Teoloyucan durante 100 años (Hernandez-Quintero, *et al.*, 2018).

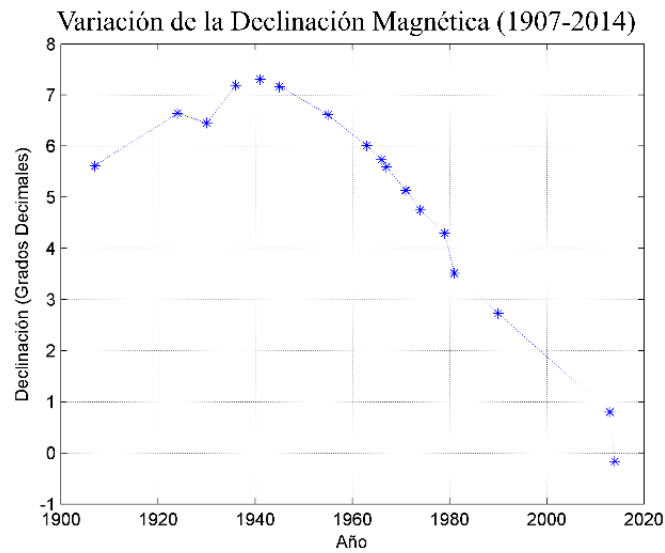


Figura 19. Curva de declinación magnética de 1907 a 2014 medida en Mérida, Yucatán (Jiménez Romero, 2020)

5.2 Comparación entre las cartas magnéticas de declinación elaboradas en este trabajo con las ya disponibles

En este apartado se utilizan las cartas magnéticas de declinación publicadas en su época respectiva y las cartas nuevas realizadas para este trabajo, para comparar la distribución de la isógonas.

La carta realizada por el Observatorio Astronómico de Tacubaya en 1907 (figura 20), muestra isógonas sinuosas, por ejemplo, las de 7.5° y 8.5° cruzan la República con curvas irregulares y sin tendencia alguna. La carta generada en este trabajo da una idea más clara sobre la morfología de las isolíneas, mostrándolas sin irregularidades corticales o de muestreo, ya que para la época era mucho más complicado tener mediciones con errores pequeños. Para los medios de comunicación de la época es impresionante que se haya podido realizar una campaña tan amplia como para ocupar (originalmente) 70 estaciones.

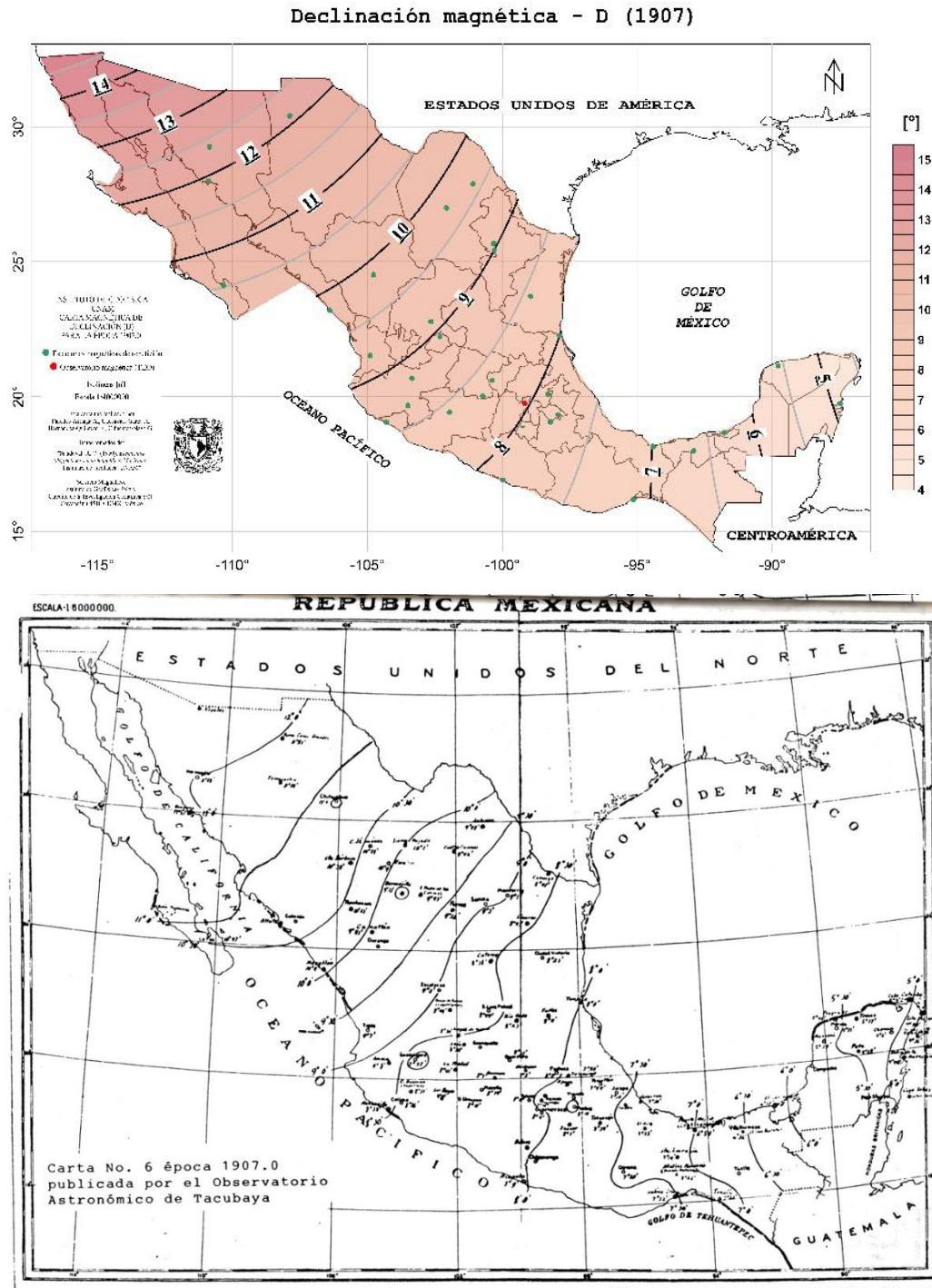


Figura 20. Mapas de declinación magnética para la época 1907.0. Arriba el mapa generado en este trabajo y abajo el mapa del Observatorio Astronómico de Tacubaya en 1907.

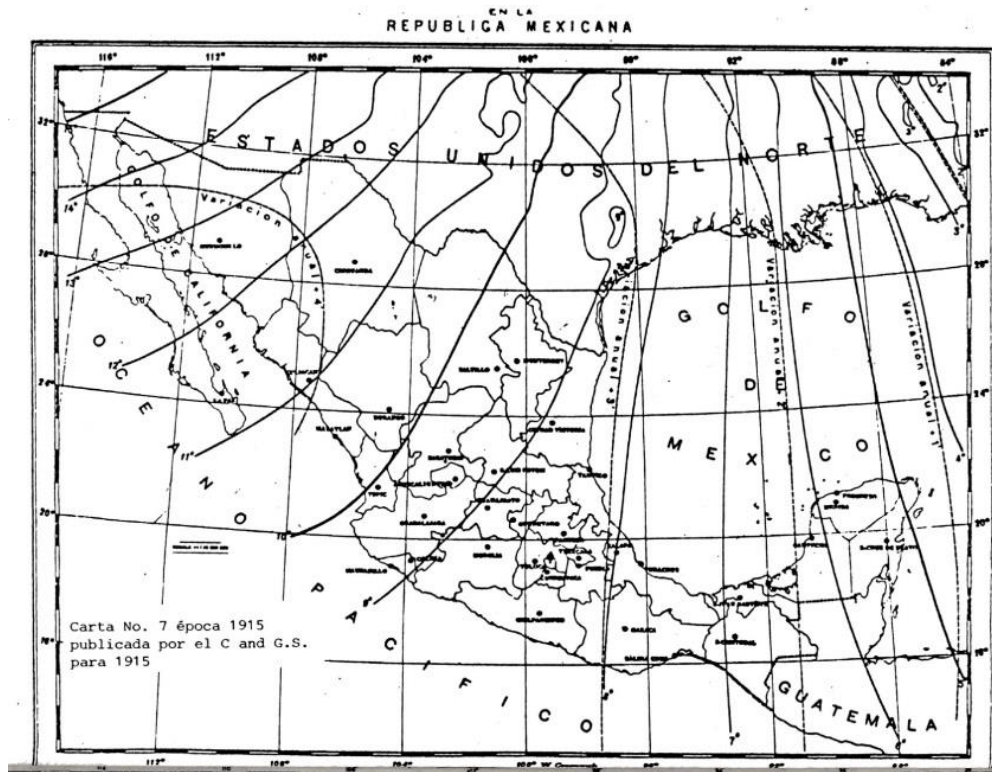


Figura 21. Carta Magnética de la República Mexicana publicada por el *C and G.S.* correspondiente a la época 1915.0 (Cañon, 1989).

A primera vista, las isógonas de 13° y 14° en el nuevo mapa son generadas por el interpolador, ya que no hay estaciones en Baja California ni en el noroeste de Sonora, pero éstas también se observan en el mapa de declinación de 1915 (figura 21), el cuál fue realizado por el *C. & G. S.* con los datos de la campaña de 1907 con una corrección por variación secular (Cañon, 1989); dicha carta es mucho más parecida a la generada en este trabajo y eso puede ser debido a que el *C. & G. S.* usaba un método que hiciera más suaves las curvas entre cada estación de repetición.

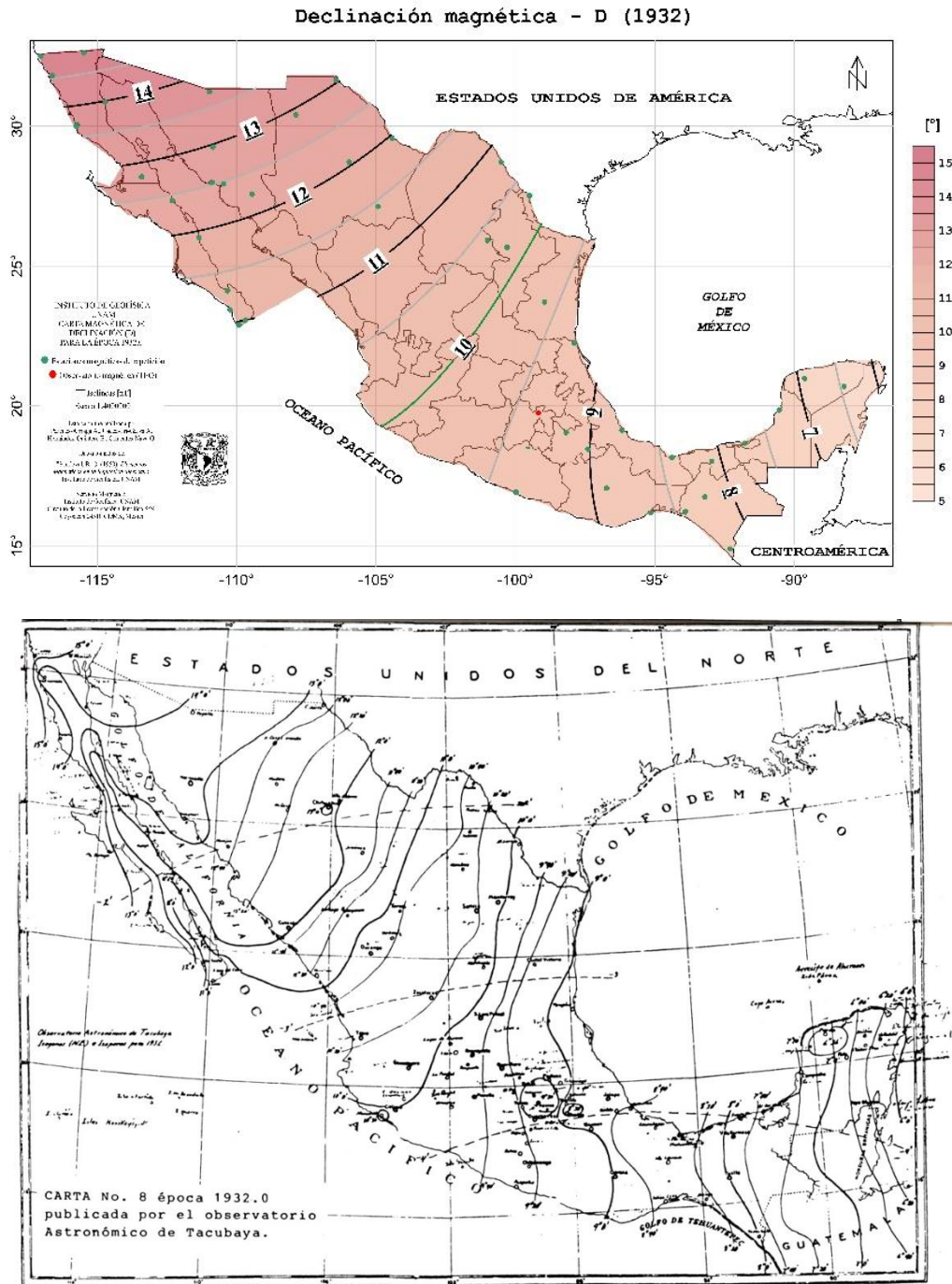


Figura 22. Mapas de declinación magnética para la época 1932.0. Arriba el mapa generado en este trabajo y abajo el mapa del Observatorio Astronómico de Tacubaya en 1932.

La carta de 1932 (figura 22) es la primera realizada completamente por una dependencia mexicana, resalta la curvatura de la declinación sobre Baja California. Cañón (1989) da a entender que las isolíneas a lo largo del territorio nacional son tan irregulares debido al mayor número de estaciones que son empleadas en el mapa, pero es muy posible que esto sea debido al método de estimación espacial, ya que está mostrando la morfología del campo principal afectada por las irregularidades corticales o ionosféricas. Con el nuevo mapa no se observa este efecto.

En la carta de 1960 (figura 23) se usaron 40 estaciones, con datos de la carta de 1952 ajustándolos calculando la variación secular (Cañón, 1959). Las cartas ya son más parecidas, las isolíneas muestran una morfología similar, aunque son más sinuosas en el norte de la república para la carta antigua, en la nueva carta se ven ligeramente desplazadas al oeste. En esta carta, (Cañón, 1966) dice explícitamente que “no se pueden ver las anomalías locales por la falta de datos, aunque sí fueron quitados los puntos que sobresalían cómo anomalías.



Figura 24. Carta Magnética de la República Mexicana publicada por el Instituto de Geofísica correspondiente a la época 1965.0 (Cañón, 1966).

Por otro lado, las isógonas de la carta de 1965 (figura 24) muestran una morfología más suave y similar a las mostradas en la nueva carta de 1960, esto no es debido al bajo número de estaciones, sino al mejoramiento del método numérico. Cañón (1965) menciona que “para encontrar los isopuntos de grado cerrado tales como 5°, 6°, y 7°, etc., se hizo una interpolación lineal tomando como base 3 estaciones. Esto da mayor precisión que si se interpola entre dos estaciones; se obtuvieron todos los isopuntos posibles y se unieron a discreción, con lo que obtuvieron las líneas isógonas”; y aunque seguía siendo un método un tanto arbitrario, muestra que ya se tenía clara la idea sobre el mapeo de la morfología de declinación magnética del campo principal.

Las cartas de 1990 (figura 25) muestran un gran parecido entre sí. El modelo realizado en 1990 muestra isógonas un poco más sinuosas en las curvas de 9°, 8° y 7°, y se desconoce el método interpolador que se empleó.

Las cartas para el año 2010 (figura 26) fueron realizadas con la misma base de datos y muestran diferencia en la morfología de las isógonas. Entre los cambios más significativos, se ven más regulares las isógonas de 5° y 6°, la de 10°, no muestra un cambio abrupto al cruzar de Sonora a Baja California Sur y la línea agónica cambia ligeramente su posición sobre Quintana Roo. La carta hecha en el 2014 muestra las tasas de variación al igual que las de 1990 y 1965.

Declinación magnética - D (1990)

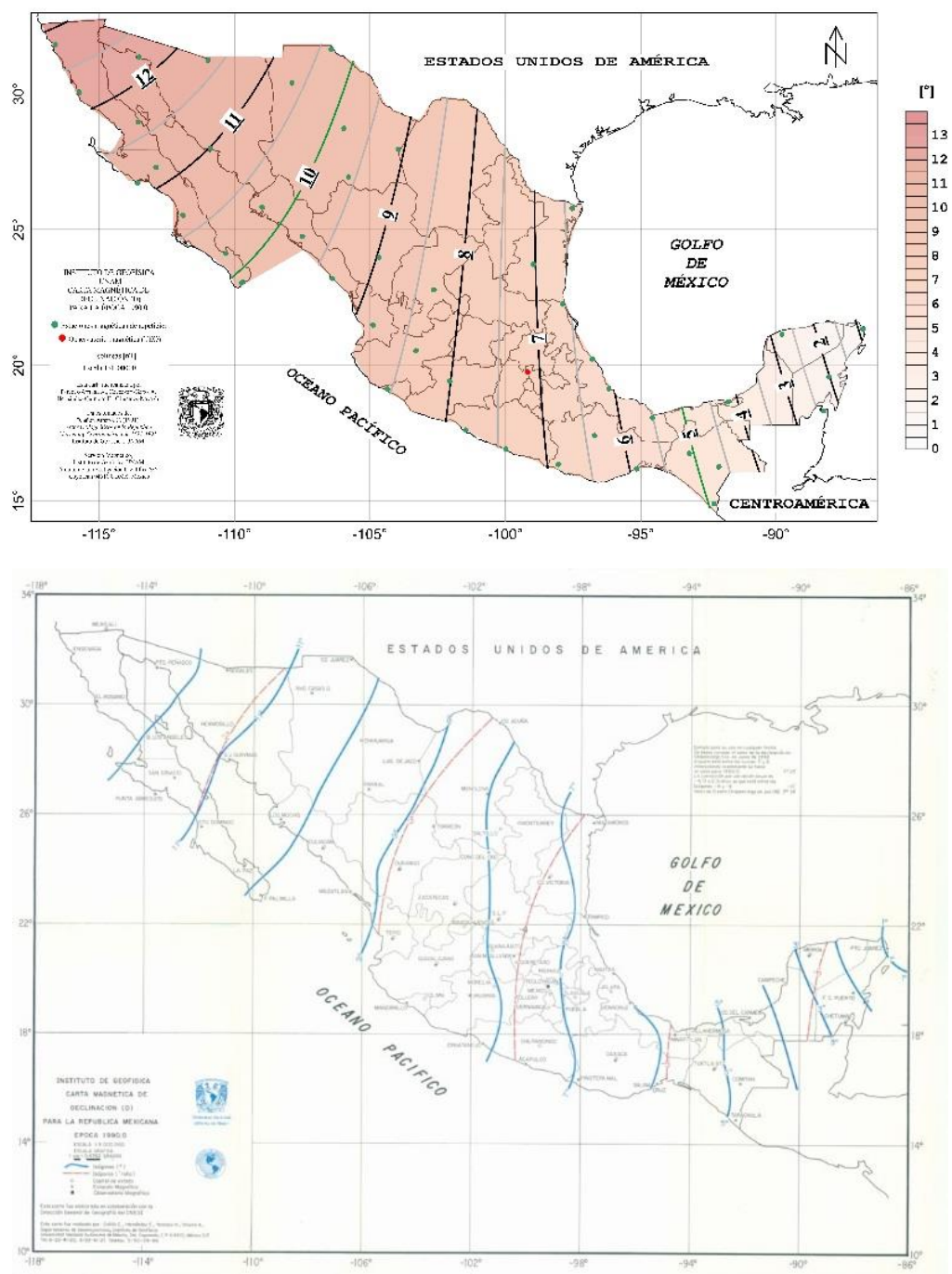


Figura 25. Mapas de declinación magnética para la época 1990.0. A la izquierda se muestra el mapa generado en este trabajo y a la derecha el mapa del trabajo conjunto del Instituto de Geofísica y el INEGI (Cañon *et al.*, 1993).

5.3 Sobre el método para la generación de las cartas magnéticas.

Se busca generar a partir de un método numérico, una malla continua usando los datos discretos con los que se cuenta; para ello se deben usar funciones analíticas que a través de combinaciones lineales, permitan obtener una aproximación o interpolación.

Con lo visto en la sección 2.5.1, la mayoría de los países o territorios geográficos usan dos métodos numéricos para estimación espacial de los datos de manera constante: *regresiones polinomiales de primer o segundo orden*, y *análisis de armónicos esféricos*. Los análisis de armónicos esféricos se ocupan generalmente en territorios extensos donde la curvatura del planeta es un factor relevante, abarcando varios países, continentes o a nivel global; están sujetos a fuertes efectos de borde, además de requerir una densidad de datos importante, generalmente son empleados cuando se buscan hacer predicciones de las fluctuaciones del campo geomagnético en los siguientes 5 años. En cambio, las *regresiones polinomiales* se usan generalmente cuando se busca hacer cartas de una época determinada, la densidad de datos puede ser muy variable, por ejemplo, una distribución densa y homogénea como en caso de Italia para la época 2010.0 donde se tienen 131 estaciones magnéticas de repetición y 2 observatorios (Dominici et al., 2010b), o una distribución menos densa como en Croacia para la época 2008.5, donde generan cartas con 12 estaciones magnéticas de repetición y datos de 3 observatorios magnéticos que se encuentra fuera de su territorio (Brkić et al., 2013).

Al analizar los estadígrafos del AED (tablas 6 y 20), vemos que la desviación estándar es alta, sobre todo para la declinación, lo cual es algo que se espera ya que son datos de mediciones distribuidas por todo el país y el campo geomagnético no es estático,

esto también es corroborado por el coeficiente de variación. Al observar los diferentes cuartiles, el mínimo, máximo y la mediana, se observa que los datos no tienen una distribución preferencial para algún valor o conjunto de valores particular, salvo para la declinación en 1907, donde el rango intercuartil es de 1.8.

Al analizar los histogramas de frecuencias de las componentes magnéticas en diferentes épocas (figuras 13, 51, 53, 55 y 57), se puede ver que las distribuciones de D y F son las que más cambian, esto es de esperarse ya que son las variables más dinámicas, por el contrario, I no cambia de manera significativamente, mostrando una distribución homogénea, salvo para la época de 1907.0 que tiene un par de datos en la primera clase del histograma, lo que podría indicar posibles datos anómalos.

Los diagramas de dispersión muestran una clara dirección preferencial de las componentes magnéticas en todas las épocas, la declinación incrementa de manera *cuasi*-homogénea de sur a norte y en menor intensidad, de oeste a este; la inclinación e intensidad total incrementan de oeste a este, mientras que la intensidad horizontal incrementa de este a oeste de manera menos pronunciada. Se pueden apreciar datos muy dispersos en las componentes F y H de la época 1932.0 y en la componente H de la época 1907.0, lo cuales son *outliers*.

Se realizaron pruebas con diferentes métodos de interpolación y aproximación; en un principio se buscó usar Kriging pero los datos son no estacionarios. La figura 27 muestra 8 métodos de estimación espacial diferentes aplicados a los datos de la declinación magnética del año 2010, estas pruebas ayudaron a elegir el método óptimo para las cartas magnéticas del país. El campo magnético principal está descrito por una función suave a gran escala, las curvas más pronunciadas en la declinación magnética se llegan a expresar

en los 0° y 90° , por lo que si el método muestra curvas demasiado sinuosas o “islas” es descartado. Los métodos de *curvatura mínima* y *distancia inversa ponderada* (junto con sus variaciones) generan algunas curvas entre las isógonas de 9° , 10° y 11° en la zona correspondiente a Baja California. La *interpolación de vecino natural* genera ciertos cambios abruptos dependiendo de la densidad de los datos y su valor, y la *interpolación de vecino cercano* es la más irregular, mostrando cambios tan abruptos que vuelven a la función no diferenciable. La *regresión polinomial de primer orden* muestra sólo la dirección de máximo cambio de todos los datos y las isógonas son prácticamente líneas rectas. Por todo lo descrito en este párrafo y basados en las metodologías que siguen otros países como Italia (De Santis et al., 2003; Dominici et al., 2010a) y Bulgaria (Metodiev y Trifonova, 2017), se optó por usar una *regresión polinomial de segundo orden* como método de estimación espacial para todas las cartas magnéticas de este trabajo.

La tabla 10 muestra los coeficientes a_0, \dots, a_5 de la *regresión polinomial de segundo orden* realizada para cada carta magnética, σ es el error estándar de estimación que está dado en las unidades de la variable, R^2 es el coeficiente de determinación y n el número de estaciones magnéticas de repetición usadas.

El error estándar de estimación (σ) para la declinación e inclinación magnéticas siempre es menor a 0.5° , lo cual es bastante aceptable para la densidad de estaciones en cada carta, siendo incluso menor a 0.3° en tres de las cinco cartas. Para las intensidades totales y horizontales, este error oscila entre 140 y 310 nT, lo cual es dos órdenes de magnitud por debajo de los valores medidos, representando un error menor al 1% en la mayoría de las cartas.

Respecto al coeficiente de determinación (R^2), 17 de 20 cartas tienen una $R^2 > 0.95\%$, las otras tres tienen una $R^2 > 0.925$ y son para la declinación de 1932 y 1960, así como para la intensidad horizontal de 1932.

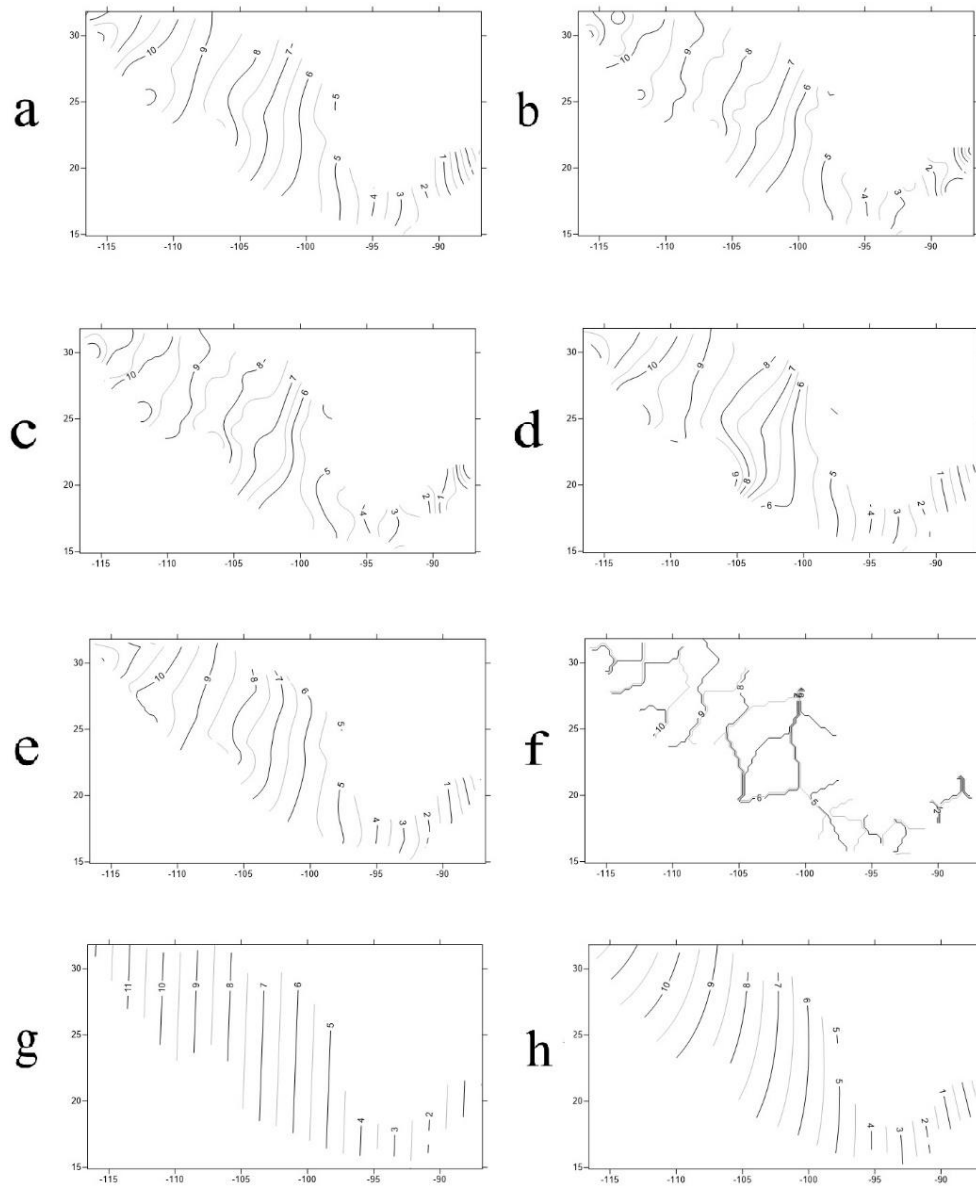


Figura 27. Interpolación de los datos de declinación magnética para la época 2010.0. a) *curvatura mínima*, b) *distancia inversa ponderada (IDW)*, c) *distancia inversa ponderada con potencia de 3^{er} orden*, d) *método modificado de Shepard (IDW)*, e) *interpolación vecino natural*, f) *interpolación de vecino cercano*, g) *regresión polinomial de primer orden*, h) *regresión polinomial de segundo orden*.

5.4 Distribución espacial de las estaciones magnéticas de repetición en México

La figura 16 apoya a la visualización de la densidad de estaciones magnéticas de repetición en México para la campaña 2010.0. Para el caso en que las estaciones tienen un diámetro de cobertura de 400 km, se observa que la mayor parte del país se encuentra muestreado adecuadamente con las 41 estaciones magnéticas de repetición, sin embargo, hay huecos notables que se podían cubrir con 3 estaciones nuevas: 1) entre el este de Coahuila y el norte de Nuevo León, 2) en el centro de Jalisco y 3) entre San Luis Potosí y Guanajuato.

Para fines de estudios geomagnéticos más detallados que requieren una separación entre estaciones de 200 km o menor, la distribución actual de estaciones magnéticas de repetición debería, por mínimo, duplicarse, ya que actualmente quedaría demasiado espaciada (figura 16b). La figura 17b, cubre la superficie del país con 87 estaciones magnéticas de repetición, lo cual sería ideal para análisis y muestreos futuros en México. Esto no significa que la distribución de estaciones actual sea ineficiente, a pesar de que se tiene un número de estaciones que podría considerarse bajo, son estaciones con datos bastante certeros en la gran mayoría de los casos; Newitt et al., (1996) menciona algo muy interesante al respecto: *“Se debe alcanzar un equilibrio entre el número de estaciones ocupadas y el intervalo de tiempo entre ocupaciones. Como regla general, no se debe sacrificar la precisión de los datos obtenidos de cada estación para ocupar más estaciones”*.

5.5 Importancia de la conservación de datos históricos en las Ciencias de la Tierra

Ya ha sido abordado el hecho de que México cuenta con un amplio registro histórico de datos geomagnéticos; este trabajo continúa un esfuerzo para la búsqueda, recopilación, y análisis de dicho acervo.

Los libros de Sandoval (1950) y Cañón (1991) han sido previamente digitalizados como imágenes pero los datos no son manipulables de forma digital; al comienzo de este trabajo se intentó pasar esas imágenes a archivos de tipo *.xls* o *.csv* mediante diferentes *software* de reconocimiento óptico de caracteres (OCR por sus siglas en inglés) pero estos programas aún les falta mucho desarrollo para ser funcionales con caracteres numéricos en tablas, y más al tratarse de bases de datos numéricos, así que esa posibilidad fue descartada.

El acervo de los datos del observatorio magnético de Teoloyucan y las estaciones magnéticas de repetición debe ser conservado y poco a poco, trabajar en la digitalización y análisis de los archivos y documentos que lo requieran, ya que aún hay muchos trabajos que pueden realizarse con ellos.

Por todo esto, las tablas de datos de los apéndices B y D, las cartas magnéticas del apéndice A y los resúmenes de las tablas 7 y 8 en la sección de resultados (4.3), son un acercamiento moderno a la minería y análisis de estos datos, así como a su conservación.

Este tipo de problemas con las bases de datos históricos no es propio del geomagnetismo en México, prácticamente se encuentra en todas las ramas científicas que cuentan con amplios historiales de mediciones. Por todo lo anterior, la conservación y análisis de datos históricos en las Ciencias de la Tierra es prístino para el entendimiento de fenómenos dinámicos de diversas naturalezas.

Tratamiento de datos históricos

Es importante mencionar que no todos los datos recopilados fueron usados para la generación de las cartas magnéticas, se buscaron cuidar diferentes aspectos como el valor de cada variable y su distribución, para encontrar los conjuntos de datos que brindaran la muestra mejor representada; por esta razón las cartas de una misma época pueden no estar construidas con el mismo número de estaciones.

Cada base de datos tuvo particularidades para la reducción a una época específica, las más significativas son:

- La reducción se hace con un valor promedio mensual y no con uno diario del observatorio, esto para hacer homogéneo el proceso con las cinco épocas diferentes abordadas en este trabajo.
- Al no tener datos para febrero de 1991 del observatorio, para la reducción de las estaciones en ciudad Victoria y Tampico se utilizaron los datos promedio de diciembre de 1990 que eran el mes más próximo con información.
- Oaxaca y Valladolid se midieron en diciembre de 1930, por la falta de datos del observatorio se redujo con los valores de noviembre.
- Existe una medición en la estación de Matamoros hecha en 1927 pero no dice el mes en que se tomó y al no existir más información al respecto, fue descartada.
- La estación de Acapulco en 1931 fue medida en marzo pero no se tiene datos de ese mes en el observatorio, se usó un valor medio entre febrero y abril.
- No se incluyeron las estaciones de chihuahua del año 1906 porque las mediciones estaban afectadas por perturbaciones locales (Sandoval, 1950)

- Para la carta de 1907, se cuentan con datos medidos en las estaciones de repetición de D, I, H y Z pero no de F, así que se cambió el método de hacer los cálculos de los datos reducidos, siendo aquí F una variable calculada y no medida.
- Para la base de datos de la carta correspondiente a la época de 1907.0, se contaba con más de 40 estaciones pero debido a los errores que presentaban muchos de los datos medidos, la base fue reducida a las 32 estaciones mostradas en el apéndice B.

Estaciones magnéticas de repetición que se han mantenido a través de las décadas

La última campaña de reocupación de estaciones magnéticas de repetición fue para la carta de la época 2010.0 y constó de 41 estaciones, con base en esas estaciones se buscó las que se ha repetido en otras cartas, con la idea de localizar algunas de las estaciones con un mayor seguimiento temporal. En las tablas del anexo B para las cartas de 1990 a 1907 se muestra una línea horizontal, las estaciones por encima de esa línea se visitaron en la campaña del 2010. La tabla 11 muestra las estaciones que han sido reocupadas en las diferentes cartas magnéticas de este trabajo, de las cuales 11 han sido reocupadas en todas las campañas (1907 – 2010) y otras 7 han sido reocupadas desde la campaña para la carta de 1932.

Hoy día es complicada la logística para la reocupación de estaciones magnéticas de repetición y, lamentablemente, muchas estaciones se han perdido por el crecimiento de la mancha urbana en diferentes regiones, otras se han vuelto de difícil acceso y algunas otras más son inaccesibles por cuestiones de inseguridad en el territorio mexicano; además de que el presupuesto para ello también influye, por los costos elevados de transporte, equipo e infraestructura. De cualquier forma, es importante que se procure continuar con la

reocupación de las estaciones más antiguas en periodos regulares de tiempo, preferentemente cada 5 años (o en su defecto cada 10 años), porque son los puntos geolocalizados clave para la realización de análisis sobre los cambios del campo magnético terrestre en el territorio mexicano a mediano y largo plazo.

Tabla 11. Estaciones magnéticas de repetición que han sido reocupadas en las cartas magnéticas tomando como base las estaciones de la campaña para la carta de la época 2010.0

| 2010 | Estación | 1990 | Estación | 1960 | Estación | 1932 | Estación | 1907 | Estación |
|------|----------------------|------|------------------------|------|----------------------|------|---------------------|------|---------------------|
| 1 | La Paz | 1 | La Paz | 1 | La Paz (A) | 1 | La Paz | 1 | La Paz |
| 2 | San José del Cabo | 2 | San José del Cabo | 2 | La Paz (B) | 2 | San José del Cabo | 2 | Cd Victoria |
| 3 | Todos Santos | 3 | Y de Sto Domingo | 3 | San José del Cabo | 3 | El Rosario | 3 | Tampico |
| 4 | Y de Sto Domingo | 4 | San Ignacio | 4 | Y de Sto Domingo | 4 | Ensenada | 4 | Veracruz |
| 5 | San Ignacio | 5 | Bahía de los Angeles | 5 | Bahía de los Angeles | 5 | Cd Victoria | 5 | Cd del Carmen |
| 6 | Bahía de los Angeles | 6 | El Rosario | 6 | El Rosario | 6 | Tampico | 6 | Nuevo Casas Grandes |
| 7 | El Rosario | 7 | Ensenada | 7 | Ensenada (A) | 7 | Veracruz | 7 | Hermosillo |
| 8 | Ensenada | 8 | Matamoros | 8 | Ensenada (B) | 8 | Cd del Carmen | 8 | San José, Guaymas |
| 9 | Matamoros | 9 | Cd Victoria | 9 | Matamoros | 9 | Nuevo Casas Grandes | 9 | Mazatlán |
| 10 | Cd Victoria | 10 | Tampico | 10 | Cd Victoria | 10 | Nogales | 10 | Salina Cruz |
| 11 | Tampico | 11 | Veracruz | 11 | Tampico (B) | 11 | Hermosillo | 11 | Acapulco |
| 12 | Nautla | 12 | Minatitlán | 12 | Veracruz | 12 | San José, Guaymas | 12 | Zacatecas |
| 13 | Veracruz | 13 | Cd del Carmen | 13 | Minatitlán | 13 | Salina Cruz | 13 | Chihuahua (A) |
| 14 | Minatitlán | 14 | Nuevo Casas Grandes | 14 | Cd del Carmen | 14 | Tuxtla Gutiérrez | 14 | Mérida |
| 15 | Cd del Carmen | 15 | Nogales | 15 | Nuevo Casas Grandes | 15 | Tapachula | | |
| 16 | Nuevo Casas Grandes | 16 | Pto Peñasco | 16 | Nogales | 16 | Acapulco | | |
| 17 | Nogales | 17 | San José, Guaymas | 17 | Pto Peñasco | 17 | Chihuahua | | |
| 18 | Pto Peñasco | 18 | Los Mochis | 18 | San José, Guaymas | 18 | Cd Juárez | | |
| 19 | Hermosillo | 19 | Culiacán | 19 | Los Mochis | 19 | Mérida | | |
| 20 | Guaymas | 20 | Mazatlán | 20 | Culiacán | | | | |
| 21 | Los Mochis | 21 | Oaxaca | 21 | Mazatlán | | | | |
| 22 | Culiacán | 22 | Salina Cruz | 22 | Oaxaca | | | | |
| 23 | Mazatlán | 23 | Tuxtla Gutiérrez | 23 | Salina Cruz | | | | |
| 24 | Oaxaca | 24 | Comitán | 24 | Tuxtla Gutiérrez | | | | |
| 25 | Salina Cruz | 25 | Tapachula | 25 | Tapachula | | | | |
| 26 | Tuxtla Gutiérrez | 26 | Pinotepa Nacional | 26 | Acapulco | | | | |
| 27 | Comitán | 27 | Zihuatanejo | 27 | Zacatecas | | | | |
| 28 | Tapachula | 28 | Acapulco | 28 | Durango | | | | |
| 29 | Pinotepa Nacional | 29 | Zacatecas | 29 | Torreón | | | | |
| 30 | Zihuatanejo | 30 | Durango | 30 | Cd Juárez | | | | |
| 31 | Acapulco | 31 | Chihuahua (Aeropuerto) | 31 | Laguna de Jaco | | | | |
| 32 | Zacatecas | 32 | Cd Juárez | 32 | Mérida | | | | |
| 33 | Durango | 33 | Laguna de Jaco | 33 | Puerto Juárez | | | | |
| 34 | Torreón | 34 | Parral | 34 | Chetumal | | | | |
| 35 | Chihuahua | 35 | Mérida | | | | | | |
| 36 | Cd Juárez | 36 | Puerto Juárez | | | | | | |
| 37 | Jaco | 37 | Chetumal | | | | | | |
| 38 | Parral | | | | | | | | |
| 39 | Mérida | | | | | | | | |
| 40 | Puerto Juárez | | | | | | | | |
| 41 | Chetumal | | | | | | | | |

| | |
|--|--|
| | Estaciones que se encuentran en las 5 cartas |
| | Estaciones de 1097 pero que no se encuentran en alguna de las otras cartas |
| | Estaciones que se encuentran de 1932 en adelante |
| | Estaciones que se encuentran de 1960 en adelante |
| | Estaciones que se encuentran en 1990 y 2010 |

6 CONCLUSIONES

1. Se sistematizó una metodología estándar como propuesta para la generación de las cartas magnéticas en México, que tiene en cuenta el análisis siguiente:

- la distribución y número de las estaciones magnéticas de repetición,
- El AED y los métodos numéricos para la estimación espacial de los datos,
- el despliegue gráfico de las cartas magnéticas,
- la adecuada reproducción de las cartas magnéticas (históricas) del siglo pasado,
- la formas de reducir los datos medidos en las estaciones magnéticas de repetición.

Esta metodología se resume en los siguientes pasos: 1) procesamiento de datos adquiridos en las estaciones magnéticas de repetición, 2) procesamiento de datos del Observatorio Magnético de Teoloyucan, 3) creación de una base de datos y reducción a una época determinada, 4) análisis exploratorio de datos, aplicación de un método numérico de estimación espacial y análisis del error estándar, 5) generación de las cartas magnéticas.

2. Teniendo en cuenta la naturaleza de los datos del campo geomagnético, se concluye que la *regresión polinomial de segundo orden* es el método óptimo de estimación espacial para la generación de las cartas en México.

3. Adicionalmente, se realizó la depuración de los datos históricos de campo geomagnético que se presentan en las tablas 12, 13, 14, 15 y 16 de datos asociados a las cartas magnéticas en sus siete componentes, para las épocas 2010, 1990, 1960, 1932 y 1907.

4. Se crearon exitosamente las cartas magnéticas de México en sus componentes D, I, F y H, para las cinco épocas a las que se redujeron los datos; generando por primera vez cartas magnéticas de las componentes I, F y H para las épocas de 1960, 1932 y 1907, así como una carta de H para 1990.

5. Se mejoró el despliegue gráfico de las cartas magnéticas, así como la tendencia de las isógonas para 1960, 1932 y 1907.

6. Se hace evidente la observación en la disminución de la intensidad total del campo geomagnético, reportada en bibliografía a nivel global, así como a la deriva al oeste de la declinación magnética durante los últimos 100 años.

7. Se considera que la metodología utilizada y las cartas de este trabajo contribuirán para el análisis de futuros modelos de campo geomagnético que pronostiquen de manera local la tendencia secular, ya que se sabe que el IGRF no es lo suficientemente preciso en la zona de la costa pacífica de México.

Como una recomendación del presente trabajo, se debe procurar mantener lo más completo posible acervo de datos geomagnéticos de México, así como su accesibilidad y su manejo, ya que aún faltan análisis diversos por realizar y muy probablemente se pueden reconstruir más cartas magnéticas de otras épocas anteriores.

7 REFERENCIAS

- Abe, S., Ueda, I., Shirai, H., Goto, K., & Ebina, Y. (2013). Geomagnetic Surveys by the Geospatial Information Authority of Japan and the Contribution of the Kakioka Magnetic Observatory. *Data Science Journal*, 12(0), G1–G8. <https://doi.org/10.2481/dsj.G-033>
- Apostol, T. M. (1980). *Calculus. 2: Multivariable calculus and linear algebra, with applications to differential equations and probability*. Wiley.
- Avilés Esquivel, T. A. (2014). Descripción y análisis de la variación secular del campo geomagnético en la república mexicana. *Universidad Nacional Autónoma de México*, 68.
- Barton, C. E. (1988). Global and Regional Geomagnetic Reference Fields. *Exploration Geophysics*, 19(3), 401–416. <https://doi.org/10.1071/EG988401>
- Belgium Royal Meteorological Institute. (1997). Soleil Software. *Geomagnetic Observatory os Dourbes*.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press.
- British Geological Survey. (2019). *WDC Geomagnetism Data Portal*. <http://www.wdc.bgs.ac.uk/dataportal>
- Brkić, M., Šugar, D., Pavasović, M., Vujić, E., & Jungwirth, E. (2013). Croatian geomagnetic field maps for 2008.5 epoch. *Annals of Geophysics*, 55(6).
- Campos Enríquez, J. J., Campos Enriquez, J. O., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1991). Variación secular y cartas de los elementos del campo geomagnético en México. *Geofísica Internacional*, 30(Num. 2), 107–116.
- Campos-Enriquez, J. O., Hernandez-Quintero, E., Nolasco-Chávez, H., Orozco-Torres, A., Cañon-Amaro, C., Alvarez-García, G., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1994). A preliminary assessment of

- the IGRF-1990 for Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82(2), 105–111.
[https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90083-3)
- Cañón Amaro, C. (1989). Variaciones de la Declinación Magnética de la República Mexicana desde 1630. *Comunicaciones Técnicas del Instituto de Geofísica, UNAM*.
- Cañón Amaro, C. (1991). *Valores Magnéticos en la República Mexicana y Centroamérica de 1587-1991*. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Cañón-Amaro, C. (1959). Carta magnética de la República para la época de 1960.0. *Anales del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México*, 5, 171–177.
- Cañón-Amaro, C. (1966). Carta de isógonas para la República Mexicana para la época 1965.0. *Anales del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México*, 11, 27–29.
- Cañón-Amaro, C., Hernández-Quintero, E., Nolasco, H., & Orozco, A. (1993). *Cartas Magnéticas de la República Mexicana para la época 1990.0* (Instituto de Geofísica UNAM-Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI.) [Map].
- Carlson, J. B. (1975). Lodestone Compass: Chinese or Olmec Primacy?: Multidisciplinary analysis of an Olmec hematite artifact from San Lorenzo, Veracruz, Mexico. *Science*, 189(4205), 753–760. <https://doi.org/10.1126/science.189.4205.753>
- Chapra, S. C., Canale, R. P., & e-libro, C. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill Interamericana.
- Chen, F.-W., & Liu, C.-W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy and Water Environment*, 10(3), 209–222. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319-1>
- Childress, D. H. (2009). *El enigma de los olmecas y las calaveras de cristal*.
- Cifuentes Nava, G., & Hernández Quintero, E. (1996). Cartas Magnéticas Sintéticas Época 1995.0 para la República Mexicana. *Reportes internos del Instituto de Geofísica, UNAM*.

- Cifuentes-Nava, G. (2009). *MONITOREO GEOMAGNÉTICO DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL*.
Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29315.91682>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - CONABIO. (2006).
Mapa base a nivel estatal y mapa general. Formato raster [Map].
- Constable, C. G., & Constable, S. C. (2004). Satellite magnetic field measurements: Applications in studying the deep Earth. En R. S. J. Sparks & C. J. Hawkesworth (Eds.), *Geophysical Monograph Series* (Vol. 150, pp. 147–159). American Geophysical Union.
<https://doi.org/10.1029/150GM13>
- Constable, S. (2015). Geomagnetic Induction Studies. En *Treatise on Geophysics* (pp. 219–254). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00101-9>
- Coordination Committee for Common European Repeat Station Surveys. (2003).
Recommendations for European repeat magnetic station surveys,. <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/GeoMag/eurepstat.html>
- Cox, V. (2017). Exploratory Data Analysis: What Data Do I Have? En V. Cox, *Translating Statistics to Make Decisions* (pp. 47–74). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2256-0_3
- Crisp, E., Freedman, C., Gellman, H., & Nixon, J. (1950). The westward drift of the Earth's magnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243(859), 67–92. <https://doi.org/10.1098/rsta.1950.0014>
- De Santis, A., Gaya-Piqué, L., Dominici, G., Meloni, A., Torta, J. M., & Tozzi, R. (2003). *Italian Geomagnetic Reference Field (ITGRF): Update for 2000 and secular variation model up to 2005 by autoregressive forecasting*. <https://doi.org/10.4401/ag-3422>
- Díaz Viera, M. A., & Casar González, R. (2009). *Geoestadística aplicada: Análisi Exploratorio de Datos*. Notas del curso: Geoestadística aplicada, PCT, UNAM. http://www.esmg-mx.org/media/courses/geoestadistica/presentaciones/CG2_2009.pdf

- Dolinsky, P., Valach, F., Váczyová, M., & Hvozďara, M. (2009). Geomagnetic ground survey in Slovakia for the 2007.5 epoch. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39 (3), 255–272.
- Dominici, G., Meloni, A., Di Ponzio, A., & Miconi, M. (2010a). *Italian Magnetic Network and magnetic reference fields at 2010.0*. <https://doi.org/10.4401/ag-5411>
- Dominici, G., Meloni, A., Di Ponzio, A., & Miconi, M. (2010b). *Italian Magnetic Network and magnetic reference fields at 2010.0*. <https://doi.org/10.4401/ag-5411>
- Dudley, S. R. (1645). *Dell'Arcano del Mare*.
- Dumberry, M., & Finlay, C. C. (2007). Eastward and westward drift of the Earth's magnetic field for the last three millennia. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1–2), 146–157.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.026>
- Finlay, C. C. (2008). Historical variation of the geomagnetic axial dipole. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 170(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.029>
- Finlay, C. C., Olsen, N., Kotsiaros, S., Gillet, N., & Tøffner-Clausen, L. (2016). Recent geomagnetic secular variation from Swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 112.
<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0486-1>
- Finlay, C. C., Olsen, N., & Tøffner-Clausen, L. (2015). DTU candidate field models for IGRF-12 and the CHAOS-5 geomagnetic field model. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 114.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0274-3>
- Flores-Ruiz, J. H., Marines-Campos, R., Hernandez-Quintero, J. E., Campos-Enriquez, J. O., & Urrutia-Fucugauchi, J. (2000). Evaluación Geo-Estadística de la Red de Estaciones Magnéticas de la República Mexicana. *Revista Geofísica*, 52/53, 107.

- Gallet, Y., Hulot, G., Chulliat, A., & Genevey, A. (2009). Geomagnetic field hemispheric asymmetry and archeomagnetic jerks. *Earth and Planetary Science Letters*, 284(1–2), 179–186.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.028>
- Gao, J.-T., An, Z.-C., Gu, Z.-W., Han, W., Zhan, Z.-J., & Yao, T.-Q. (2005). Selection of the Geomagnetic Normal Field and Calculation of Geomagnetic Anomalous Field. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(1), 66–73. <https://doi.org/10.1002/cjg2.627>
- Gasca, M., & Sauer, T. (2000). Polynomial interpolation in several variables. *Advances in Computational Mathematics*, 12(4), 377–410. <https://doi.org/10.1023/A:1018981505752>
- Gilbert, W. (1956). De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure. *excudebat Petrus Short*.
- Gubbins, D., & Herrero-Bervera, E. (Eds.). (2007). *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*. Springer.
- Guzmán Armenta, B. (2013). *Catálogo de estaciones magnéticas de repetición y carta magnética época 2010.0 para México*. Universiada Nacional Autónoma de México, UNAM.
- Harradon, H. D. (1943). Some early contributions to the history of geomagnetism: I. *Journal of Geophysical Research*, 48(1), 3. <https://doi.org/10.1029/TE048i001p00003>
- Hernández-Quintero, E., Goguitchaichvili, A., García-Ruiz, R., Cervantes-Solano, M., & Cifuentes-Nava, G. (2018). MÁS DE 100 AÑOS ININTERRUMPIDOS DE REGISTRO GEOMAGNÉTICO EN MÉXICO: IMPLICACIONES EN LA DATACIÓN ABSOLUTA DE ALGUNOS EDIFICIOS HISTÓRICOS. *Arqueología Iberoamericana*, 39, 36–43.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.3475444>.
- INEGI. (2015). *Mapa Digital de México* [Map].
- INTERMAGNET contributors. (2020). *International Real-time Magnetic Observatory Network*.
<https://www.intermagnet.org/index-eng.php>

- Jackson, A., & Finlay, C. (2015). Geomagnetic Secular Variation and Its Applications to the Core. En *Treatise on Geophysics* (pp. 137–184). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00099-3>
- Jiménez Romero, W. C. (2020). *ESTUDIO INTEGRAL GEOMAGNÉTICO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE CHICHÉN ITZÁ, YUCATÁN*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Kirschvink, J. L., Jones, D. S., & MacFadden, B. J. (Eds.). (1985). *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: A New Biomagnetism* (Vol. 5). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0313-8>
- Kono, M. (2015). Geomagnetism: An Introduction and Overview. En *Treatise on Geophysics* (pp. 1–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00095-6>
- Korte, M., & Haak, V. (2000). Modelling European magnetic repeat station and survey data by SCHA in search of time-varying anomalies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 122(3–4), 205–220. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(00\)00194-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00194-1)
- Kovács, P, Csontos, A., Vadasz, G., & Heilig, B. (2018). Current practice of the Hungarian Repeat station surveys: Measurement, data processing, interpretation. *COBS Journal*.
- Kovacs, P., & Körmendi, A. (1999). Geomagnetic repeat station survey in Hungary during 1994–1995 and the secular variation of the field between 1950 and 1995. *Geophysical Transactions*, 42.
- Kovács, Péter, Csontos, A., Heilig, B., & Koppán, A. (2013). Hungarian repeat station survey, 2010. *Annals of Geophysics*, 55(6).
- Lanza, R., & Meloni, A. (2006). *The earth's magnetism: An introduction for geologists*. Springer.
- Loaiciga, H. A., Charbeneau, R. J., Everett, L. G., Fogg, G. E., Hobbs, B. F., & Rouhani, S. (1992). Review of Ground-Water Quality Monitoring Network Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1), 11–37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:1(11))

- Lowrie, W. (2011a). *A student's guide to geophysical equations*. Cambridge University Press.
- Lowrie, W. (2011b). *A student's guide to geophysical equations*. Cambridge University Press.
- Macmillan, S., & Rycroft, M. J. (2010). The Earth's Magnetic Field. En R. Blockley & W. Shyy (Eds.), *Encyclopedia of Aerospace Engineering* (p. eae322). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae322>
- Malmstrom, V. H. (1976). Knowledge of magnetism in pre-Columbian Mesoamerica. *Nature*, 259(5542), 390–391. <https://doi.org/10.1038/259390a0>
- Malmström, V. H. (2016). Before the Maya: How Time Began in america. *Hanover, New Hampshire 03755 U. S. A.*
- Mandea, M., Gibert, D., Le Mouël, J.-L., Hulot, G., & Saracco, G. (1999). An estimate of average lower mantle conductivity by wavelet analysis of geomagnetic jerks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B8), 17735–17745.
<https://doi.org/10.1029/1999JB900135>
- Mandea, M., Holme, R., Pais, A., Pinheiro, K., Jackson, A., & Verbanac, G. (2010). Geomagnetic Jerks: Rapid Core Field Variations and Core Dynamics. *Space Science Reviews*, 155(1–4), 147–175. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9663-x>
- Mardrus, J. C., & Mathers, E. P. (1964). *The book of the thousand nights and one night: Rendered into English from the literal and complete French translation of Dr J.C. Mardrus by Powys Mathers*. Bibliophile Books.
- Matzka, J., Chulliat, A., Mandea, M., Finlay, C. C., & Qamili, E. (2010). Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space. *Space Science Reviews*, 155(1–4), 29–64.
<https://doi.org/10.1007/s11214-010-9693-4>
- Mead, G. D. (1964). Deformation of the geomagnetic field by the solar wind. *Journal of Geophysical Research*, 69(7), 1181–1195. <https://doi.org/10.1029/JZ069i007p01181>

- Merrill, R. T. (2012). *Our magnetic Earth: The science of geomagnetism* (Paperback ed). The University of Chicago Press.
- Merrill, R. T., McElhinny, M. W., & McFadden, P. L. (1996). *The magnetic field of the earth: Paleomagnetism, the core, and the deep mantle*. Academic Press.
- Metodiev, M., & Trifonova, P. (2017). Bulgarian Geomagnetic Reference Field (BulGRF) for 2015.0 and secular variation prediction model up to 2020. *Annales Geophysicae*, 35(5), 1085–1092. <https://doi.org/10.5194/angeo-35-1085-2017>
- Mitchell, A. C. (1932). Chapters in the history of terrestrial magnetism. *Journal of Geophysical Research*, 37(2), 105. <https://doi.org/10.1029/TE037i002p00105>
- Mitchell, A. C. (1937). Chapters in the history of terrestrial magnetism. *Journal of Geophysical Research*, 42(3), 241. <https://doi.org/10.1029/TE042i003p00241>
- Muniz Barreto, L. (1997). *El Geomagnetismo*. Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
<http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3218276>
- National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA). (s.f.). *Magnetic Field Calculators*.
<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?model=igrf#declination>
- Nature, S. (2019). *Geomagnetism*. <https://www.nature.com/subjects/geomagnetism?proof=true>
- Needham, J., Ling, W., & Needham, J. (2004). *Physics* (Reprint). Cambridge Univ. Press.
- Newitt, L. R., Barton, C. E., & Bitterly, J. (1996). *Guide for magnetic repeat station surveys. Observatorio Magnético de Teoloyucan, valores magnéticos correspondientes al 1° y 2° semestre de 1956*. (1958). Instituto de Geofísica, UNAM.
- Observatorio Magnético de Teoloyucan, valores magnéticos para 1962*. (1963). Instituto de Geofísica, UNAM.
- Observatorio Magnético de Teoloyucan, valores magnéticos para el año de 1964*. (1964). Instituto de Geofísica, UNAM.

Observatorio Magnético de Teoloyucan, valores magnéticos para los años 1957 y 1958. (1961).

Instituto de Geofísica, UNAM.

Observatorio Magnético de Teoloyucan, valores magnéticos para los años 1959 y 1960. (1961).

Instituto de Geofísica, UNAM.

Oda Noda, B., Universidad Nacional Autónoma de México, & Facultad de Ciencias. (2005).

Introducción al análisis gráfico de datos experimentales. UNAM, Facultad de Ciencias.

Olson, P., & Aurnou, J. (1999). A polar vortex in the Earth's core. *Nature*, 402(6758), 170–173.

<https://doi.org/10.1038/46017>

Peregrinus, P. (1269). *The letter of Petrus Peregrinus on the Magnet* (Vol. 1).

Pérez, R., García, L. M., Álvarez, R., & Díaz, M. (2000). Selección óptima del método de interpolación en el tratamiento de las bases de datos: Una aplicación en la construcción de las cartas magnéticas. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio. La Habana-Cuba.*

Prakash, O. (2014). OPTIMAL MONITORING NETWORK DESIGN FOR EFFICIENT IDENTIFICATION OF UNKNOWN GROUNDWATER POLLUTION SOURCES. *International Journal of Geomate.*

<https://doi.org/10.21660/2014.11.3248>

Qamili, E., De Santis, A., Cianchini, G., Duka, B., Gaya-Piqué, L. R., Dominici, G., & Hyka, N. (2010).

Two geomagnetic regional models for Albania and south-east Italy from 1990 to 2010 with prediction to 2012 and comparison with IGRF-11. *Earth, Planets and Space*, 62(10), 833–841. <https://doi.org/10.5047/eps.2010.07.011>

Rasson, J. L. (2005). About absolute geomagnetic measurements in the observatory and in the field. *Institut royal météorologique de Belgique.*

Sandoval, R. O. (1950). *Elementos Magnéticos en la República Mexicana.* Instituto de Geofísica, UNAM.

- Scott, D. W. (2009). Sturges' rule. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 1(3), 303–306. <https://doi.org/10.1002/wics.35>
- Shirai, H. (2002). Magnetic charts for the epoch 2000. *Journal of the Geographical Survey Institute*, 99, 1–8.
- Sibson, R. (1980). Sibson, R. (1980, January). A vector identity for the Dirichlet tessellation. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 87(1), 151–155.
- Smith, K. M., & Holroyd, P. (1968). Magnetism. En *Engineering Principles for Electrical Technicians* (pp. 231–258). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-012985-3.50018-2>
- Smith, P. J., & Needham, J. (1967). Magnetic Declination in Mediaeval China. *Nature*, 214(5094), 1213–1214. <https://doi.org/10.1038/2141213b0>
- Sukumar, N., Moran, B., Yu Semenov, A., & Belikov, V. V. (2001). Natural neighbour Galerkin methods. *International journal for numerical methods in engineering*, 50(1), 1–27.
- Thébault, E., Finlay, C. C., Alken, P., Beggan, C. D., Canet, E., Chulliat, A., Langlais, B., Lesur, V., Lowes, F. J., Manoj, C., Rother, M., & Schachtschneider, R. (2015). Evaluation of candidate geomagnetic field models for IGRF-12. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 112. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0273-4>
- Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coïsson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., ... Zvereva, T. (2015). International Geomagnetic Reference Field: The 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>
- Torres, L. A. G., Garzón-Alvarado, D. A., & Garzón, M. A. R. (2008). Aplicación del método de elementos naturales a problemas estructurales. *Ingeniería e Investigación*, 28(1), 5–14.

- Turner, G. M., Rason, J., & Reeves, C. (2015). Observation and Measurement Techniques. En *Treatise on Geophysics* (pp. 91–135). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00098-1>
- U. S. Coast and Geodetic Survey. (1888). *Report of the Superintendent of the U.S. Coast and Geodetic Survey Showing the Progress of Work. Appendix 6.*
- U.S. Naval Observatory. (2006). *The Multiyear Interactive Computer Almanac 1800-2050* (V. 2.1). V. 2.1, Article V. 2.1.
- Valach, F., Vaczyova, M., & Dolinsky, P. (2006). New Slovak geomagnetic repeat station network. *Earth, Planets and Space*, 58(6), 751–755. <https://doi.org/10.1186/BF03351978>
- Valores magnéticos para la República Mexicana, 1963.* (1963). Instituto de Geofísica, UNAM.
- van der Sluijs, M. A. (2014). A Common Miscitation of William Gilbert. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(16), 137–137. <https://doi.org/10.1002/2014EO160005>
- Vestine, E. H., & Kahle, A. B. (1968). The Westward Drift and Geomagnetic Secular Change. *Geophysical Journal International*, 15(1–2), 29–37. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1968.tb05743.x>
- Vestine, Ernest Harry. (1961). Instruction manual on world magnetic survey. *International Union of Geodesy and Geophysics. Monograph, no. 11.*
- Vujnović, C., Verbanac, G., Orešković, J., Marki, A., Marić, K., Lisac, I., & Ivandić, M. (2004). Results of the preliminary geomagnetic field strength measurements in the northern part of middle Croatia. *Grofizika*, 21(1), 1–13.
- Wang, C.-T. (1948). Discovery and application of magnetic phenomena in China. 1 The lodestones spoon of the Han. *Chinese Journal of Archaeology*, 3.
- Wienert, K. A. (1970). Notes on Geomagnetic Observatory and Survey Practice. *UNESCO*, 217.

Xu, W.-Y., Xia, G.-H., An, Z.-C., Chen, G.-X., Zhang, F.-Y., Wang, Y.-H., Tian, Y.-G., Wei, Z.-G., Ma, S.-Z., & Chen, H.-F. (2003). Magnetic survey and ChinaGRF 2000. *Earth, Planets and Space*, 55(4), 215–217. <https://doi.org/10.1186/BF03351750>

Yamauchi, M., & Wahlund, J.-E. (2007). Role of the Ionosphere for the Atmospheric Evolution of Planets. *Astrobiology*, 7(5), 783–800. <https://doi.org/10.1089/ast.2007.0140>

8. APÉDICES

Apéndice A. Cartas magnéticas de México en alta resolución

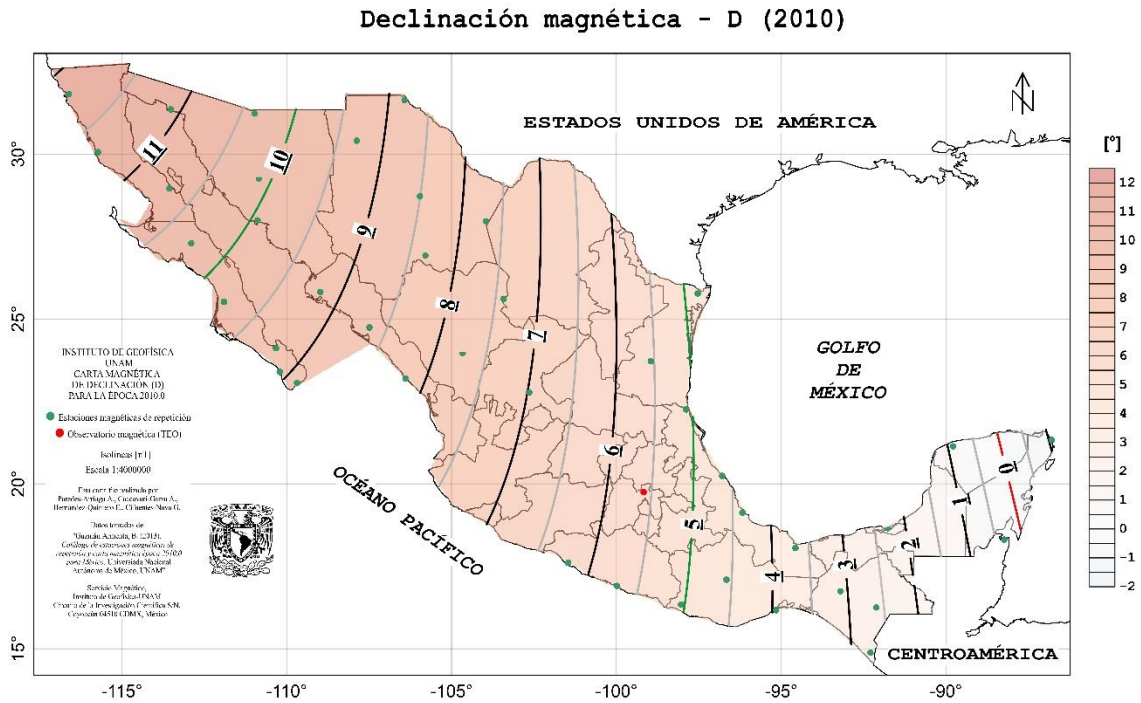


Figura 28. Carta de declinación magnética para la época 2010 en México.

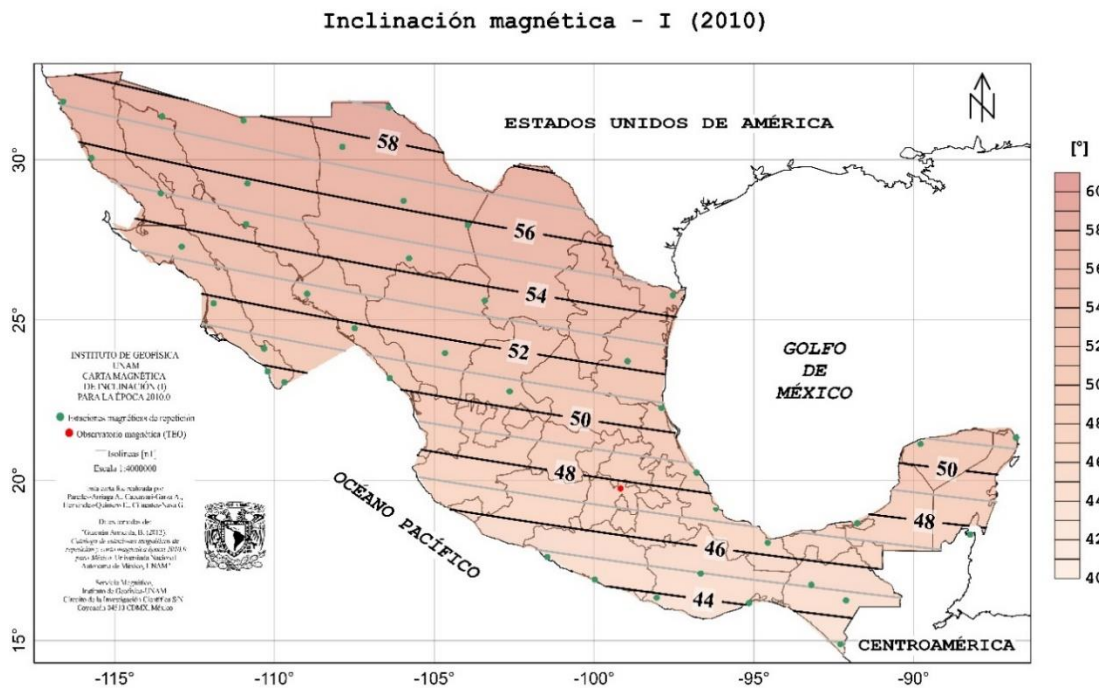


Figura 29. Carta de inclinación magnética para la época 2010 en México.

Intensidad total - F (2010)

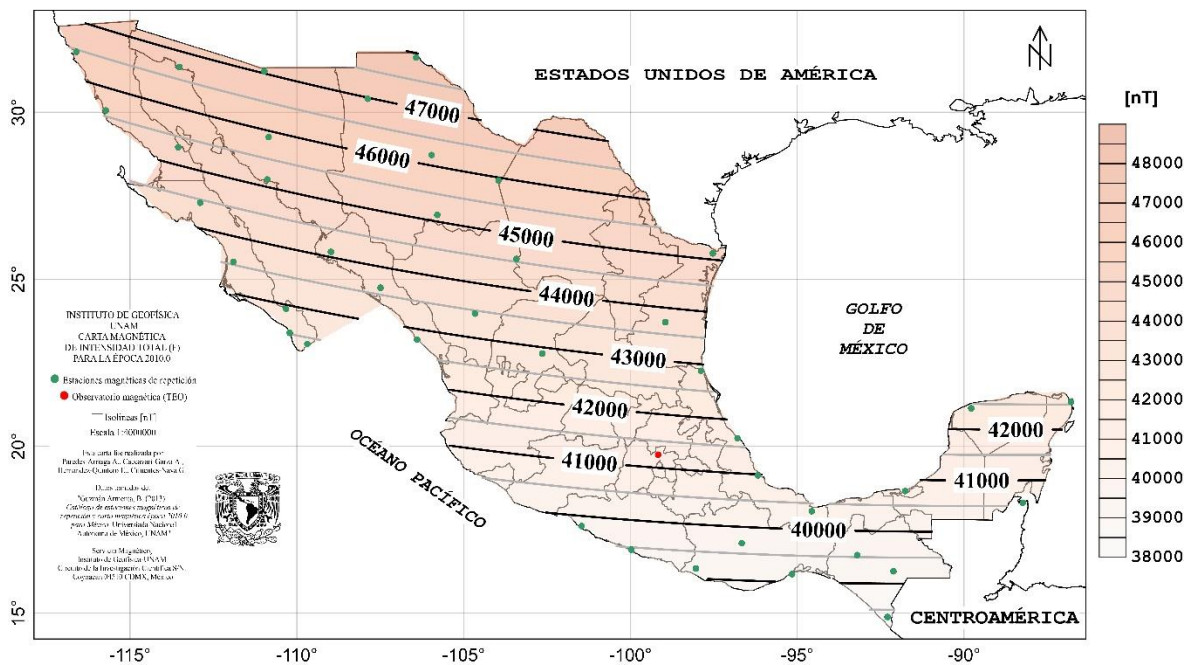


Figura 30. Carta de intensidad magnética total para la época 2010 en México.

Intensidad horizontal - H (2010)

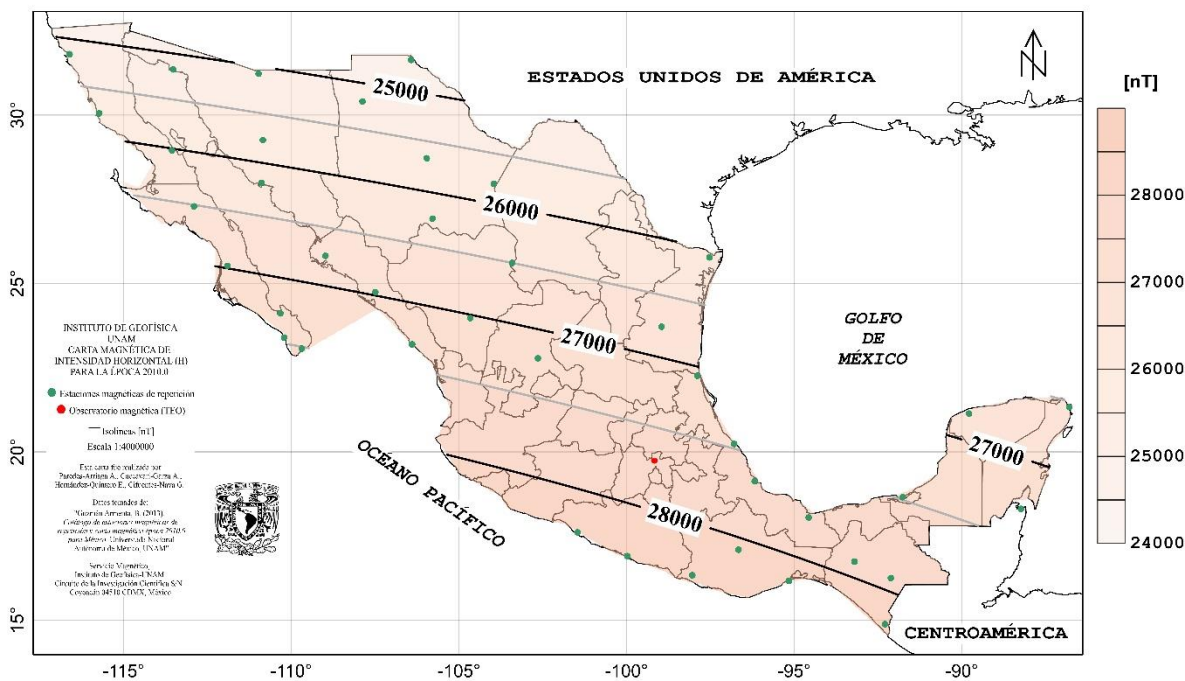


Figura 31. Carta de intensidad magnética horizontal para la época 2010 en México.

Declinación magnética - D (1990)

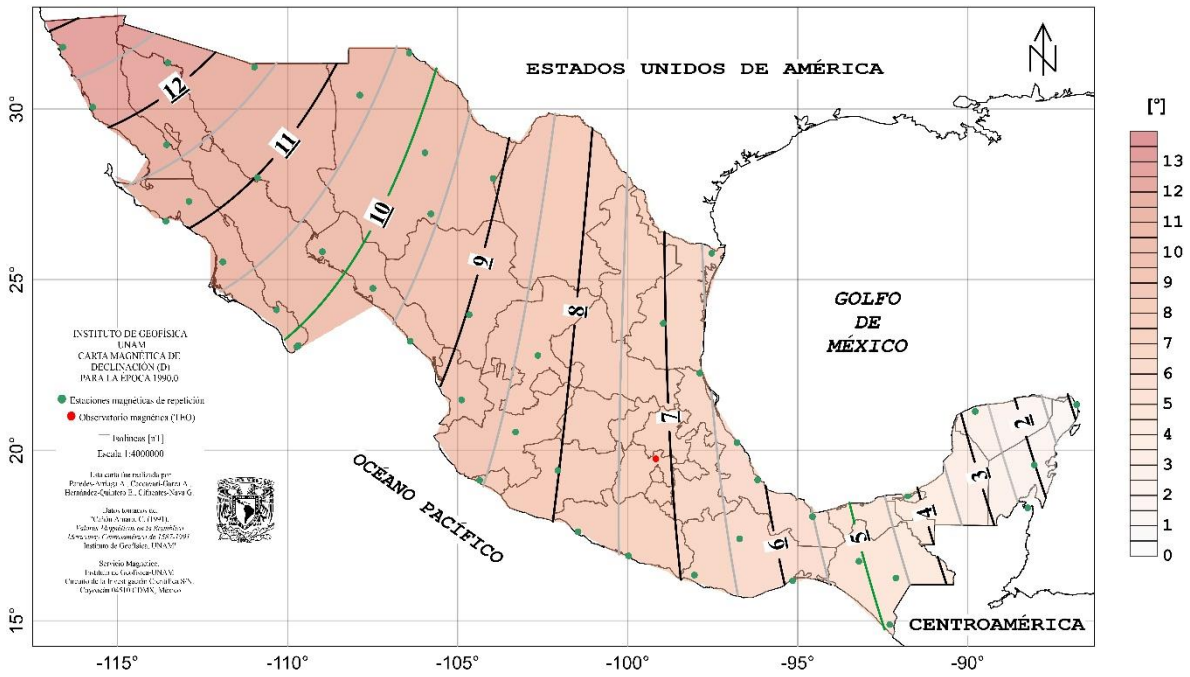


Figura 32. Carta de declinación magnética para la época 1990 en México.

Inclinación magnética - I (1990)

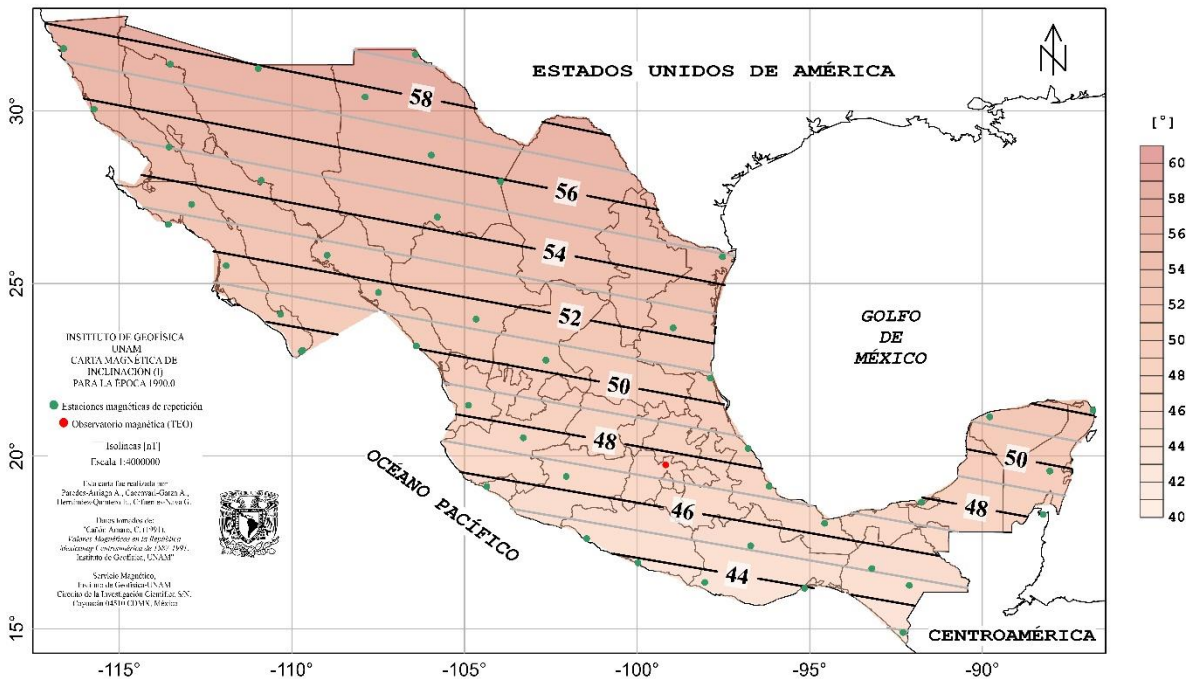


Figura 33. Carta de inclinación magnética para la época 1990 en México

Intensidad total - F (1990)

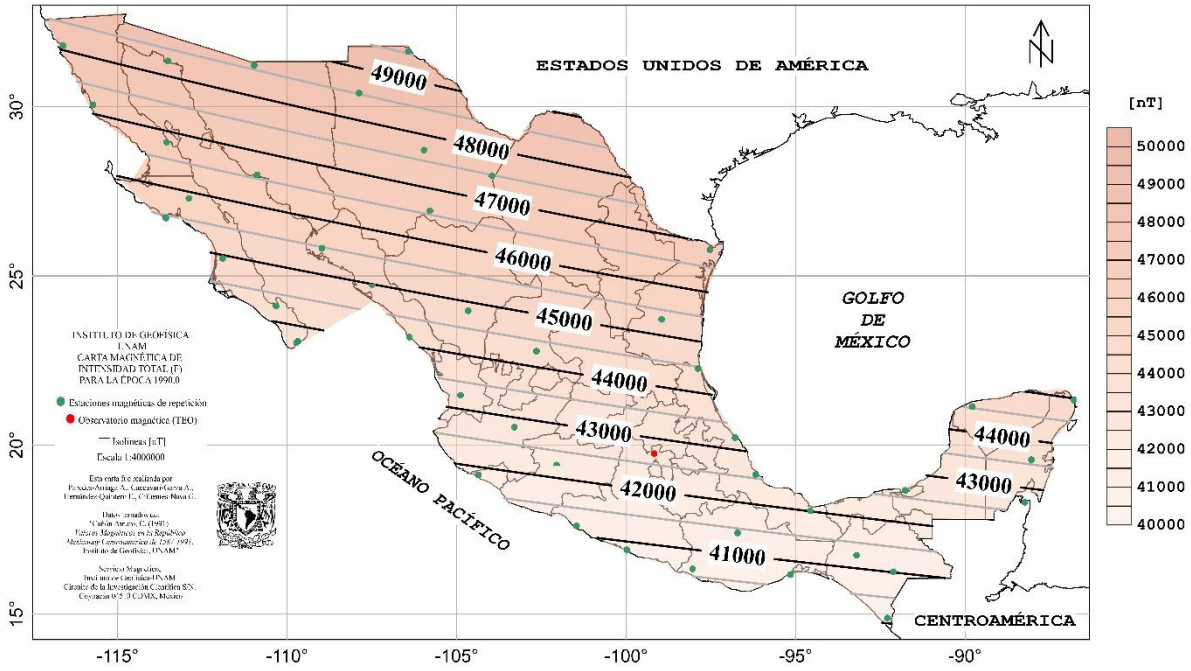


Figura 34. Carta de intensidad magnética total para la época 1990 en México

Intensidad horizontal - H (1990)

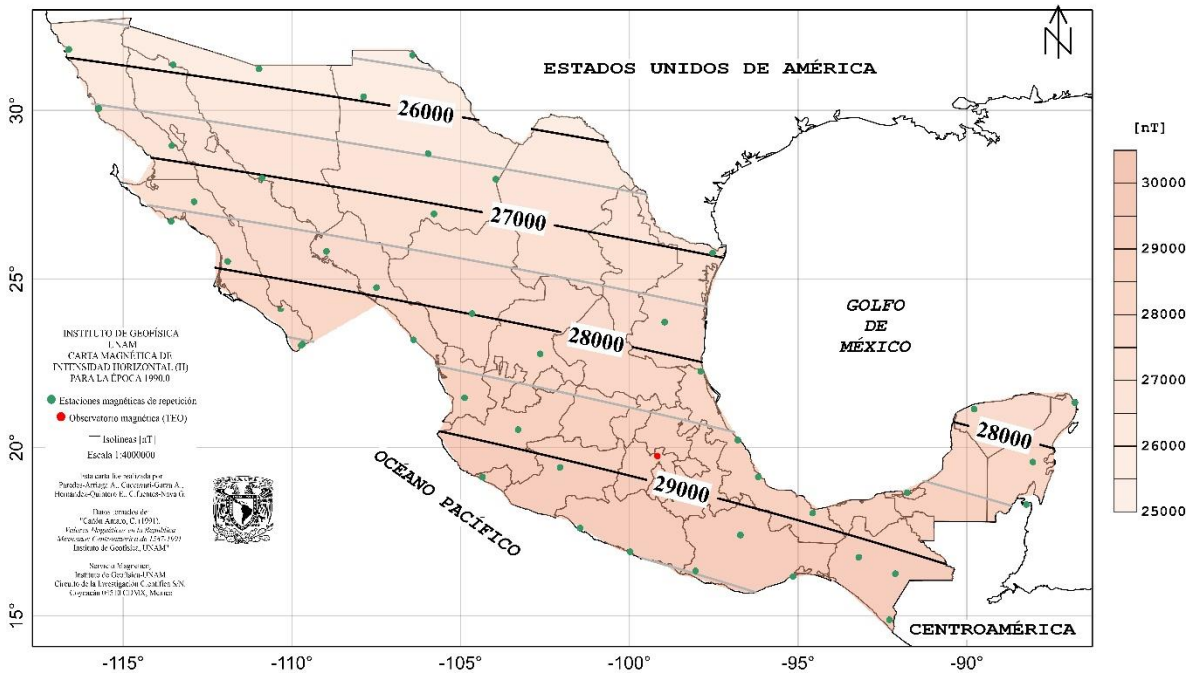


Figura 35. Carta de intensidad magnética horizontal para la época 1990 en México

Declinación magnética - D (1960)

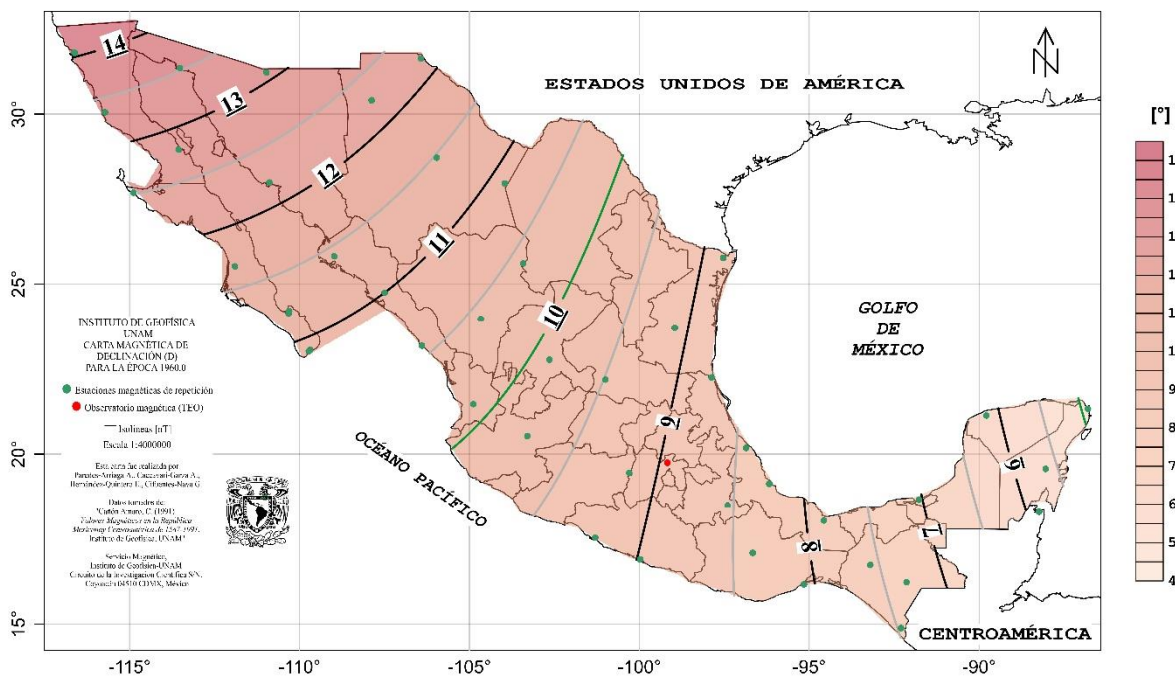


Figura 36. Carta de declinación magnética para la época 1960 en México.

Inclinación magnética - I (1960)

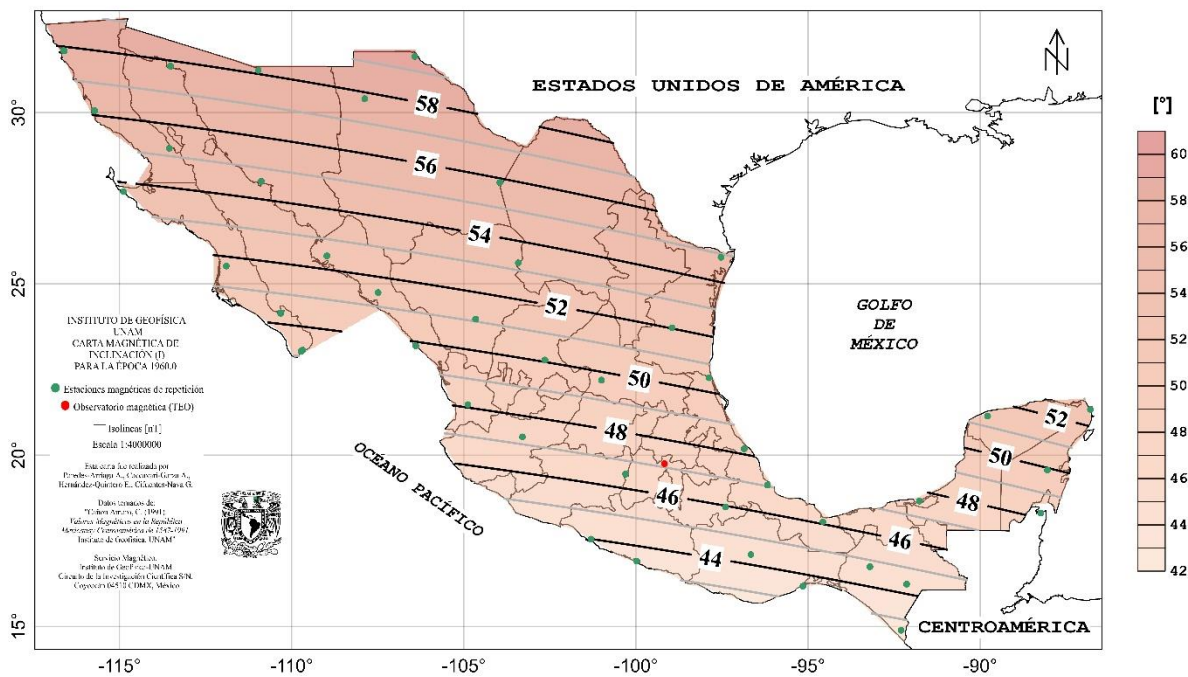


Figura 37. Carta de inclinación magnética para la época 1960 en México

Intensidad total - F (1960)

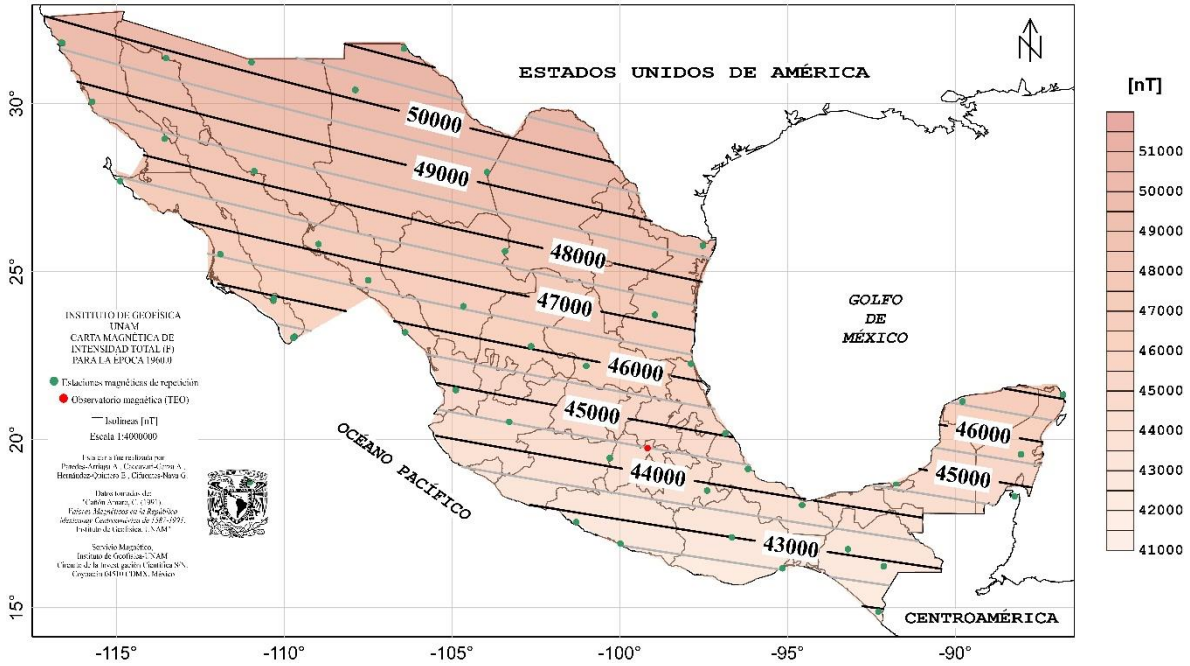


Figura 38. Carta de intensidad magnética total para la época 1960 en México.

Intensidad horizontal - H (1960)

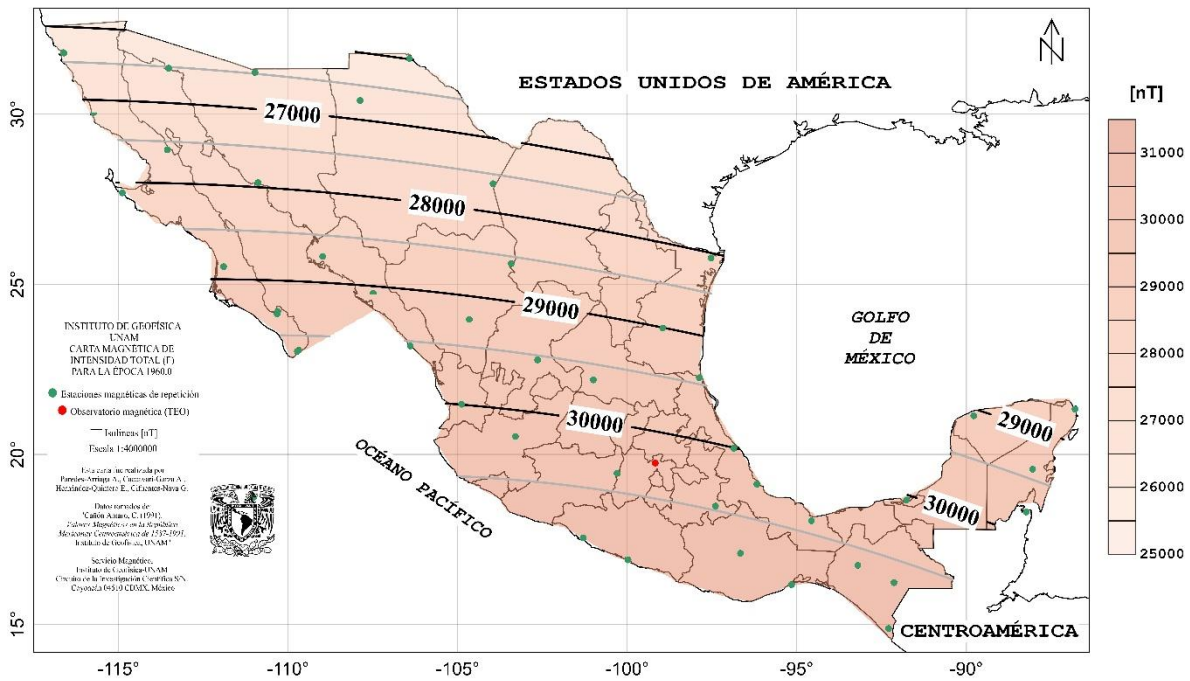


Figura 39. Carta de intensidad magnética horizontal para la época 1960 en México

Declinación magnética - D (1932)

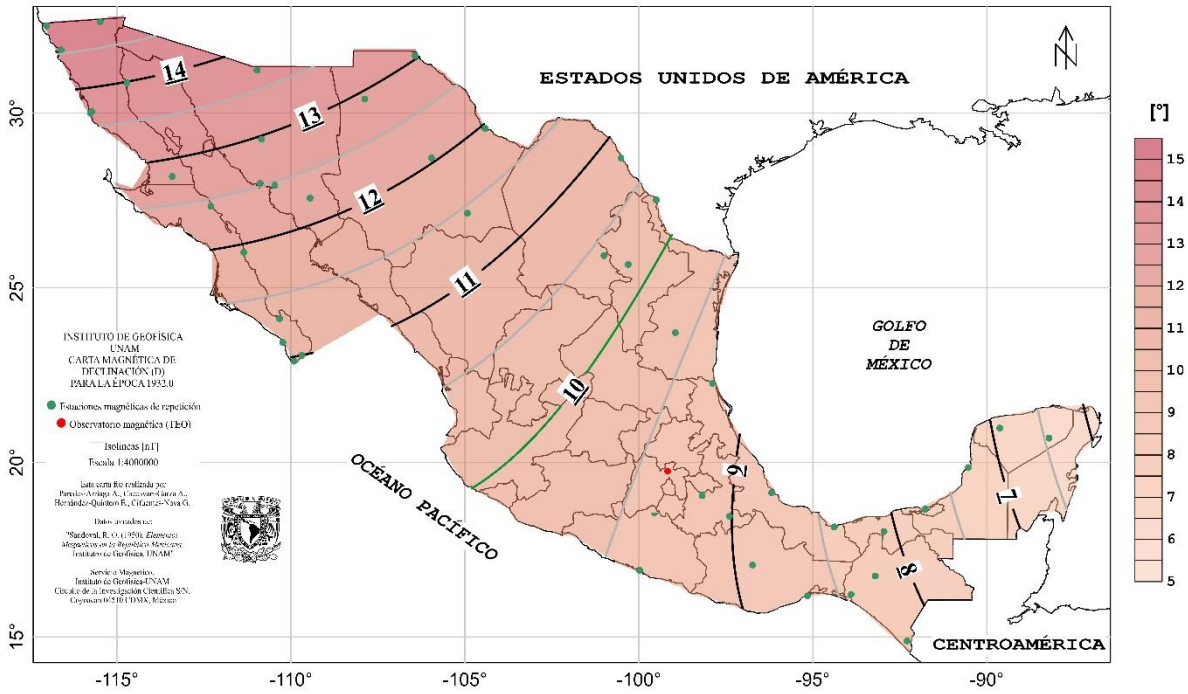


Figura 40. Carta de declinación magnética para la época 1932 en México.

Inclinación magnética - I (1932)

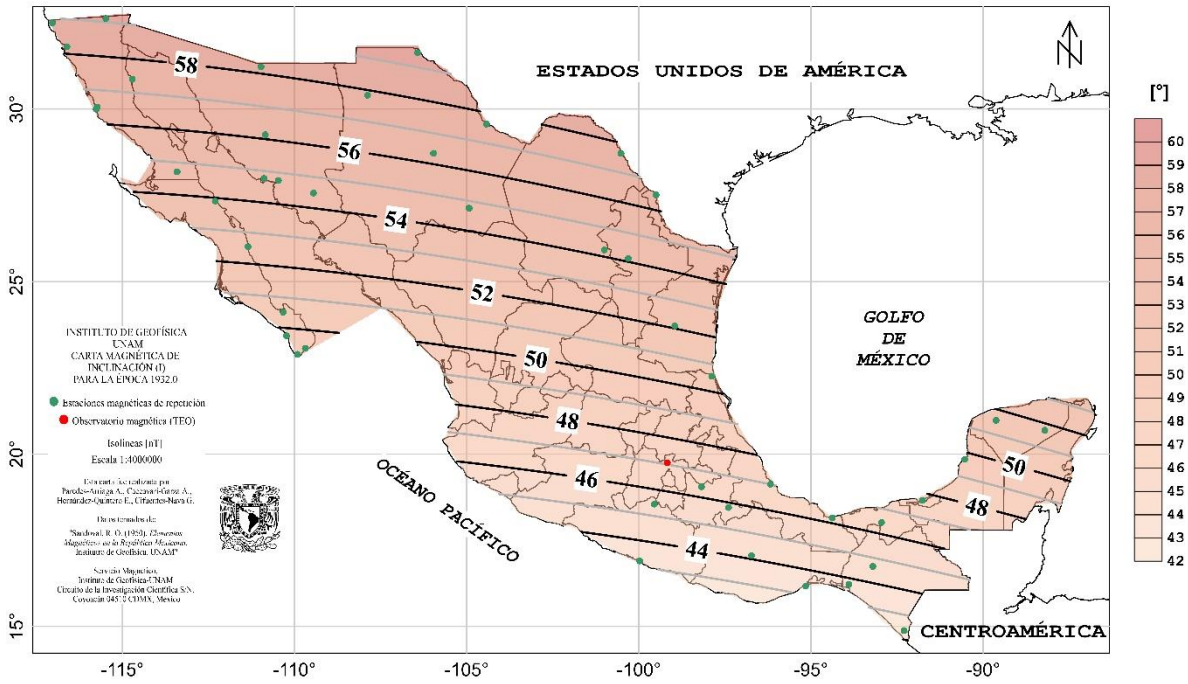


Figura 41. Carta de inclinación magnética para la época 1932 en México.

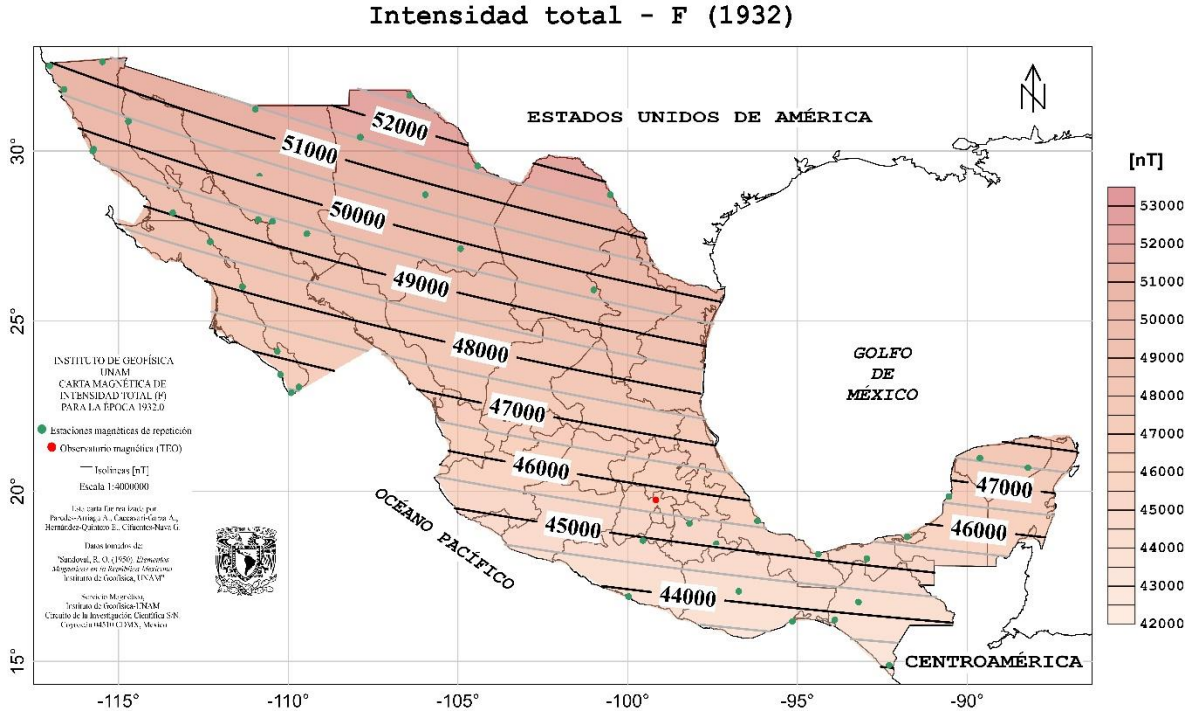


Figura 42. Carta de intensidad magnética total para la época 2010 en México.

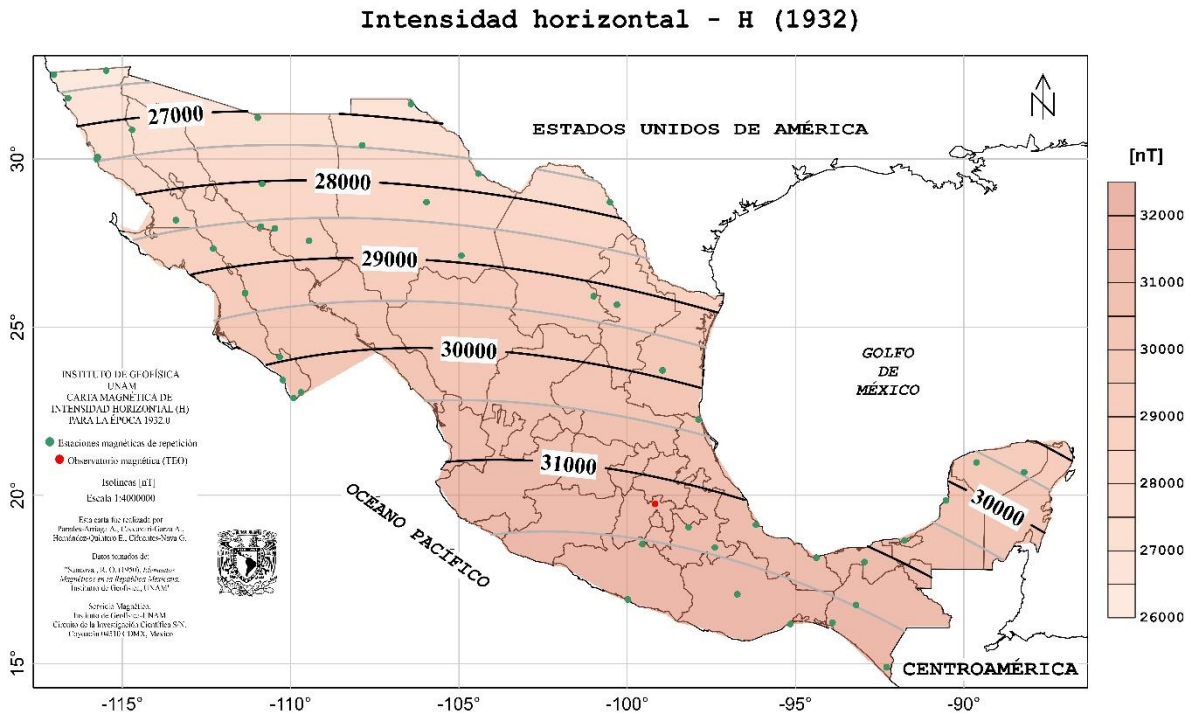


Figura 43. Carta de intensidad magnética horizontal para la época 2010 en México.

Declinación magnética - D (1907)

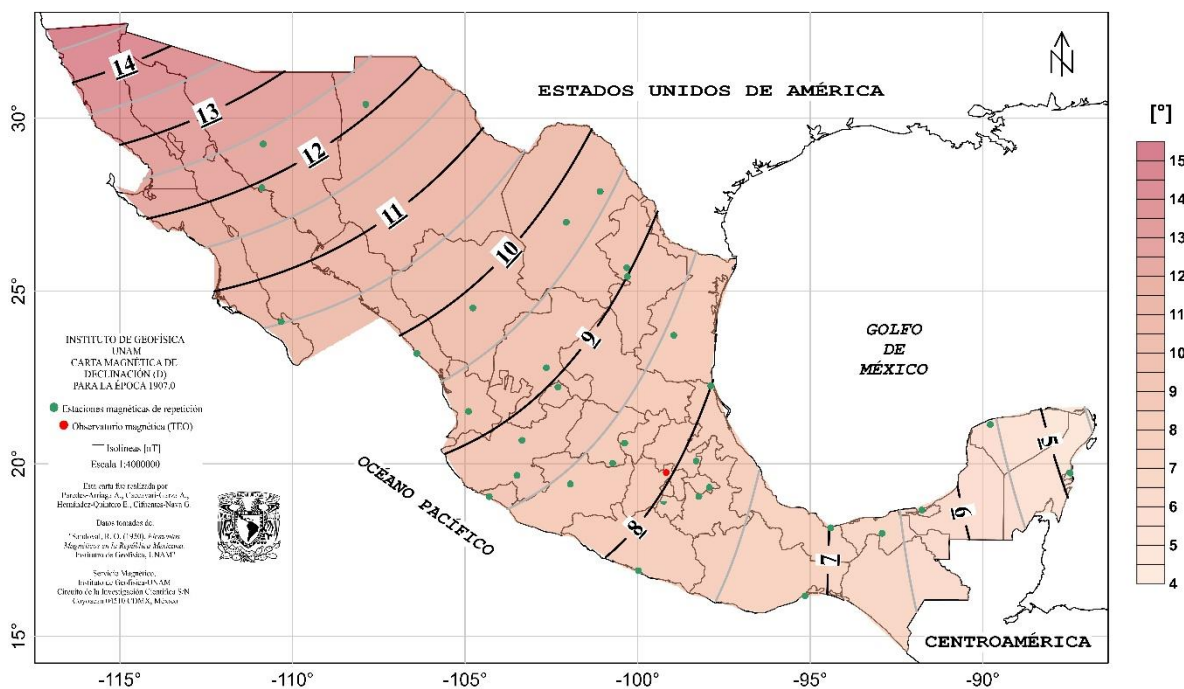


Figura 44. Carta de declinación magnética para la época 1907 en México.

Inclinación magnética - I (1907)

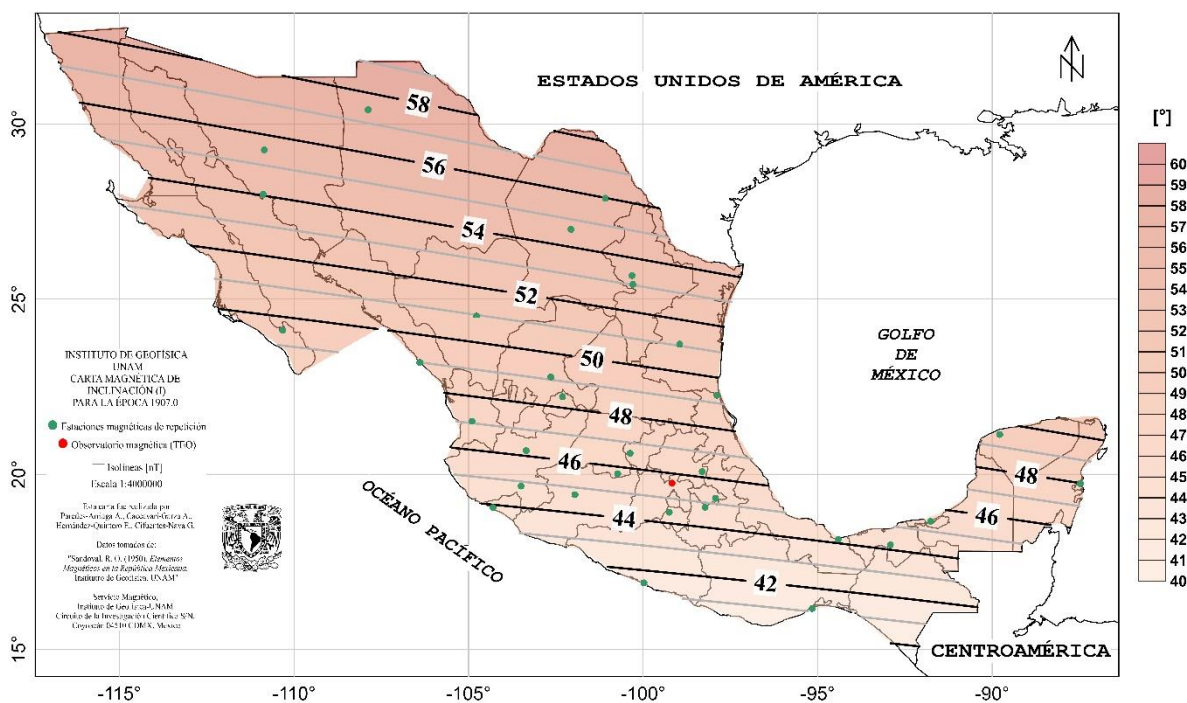


Figura 45. Carta de inclinación magnética para la época 1907 en México.

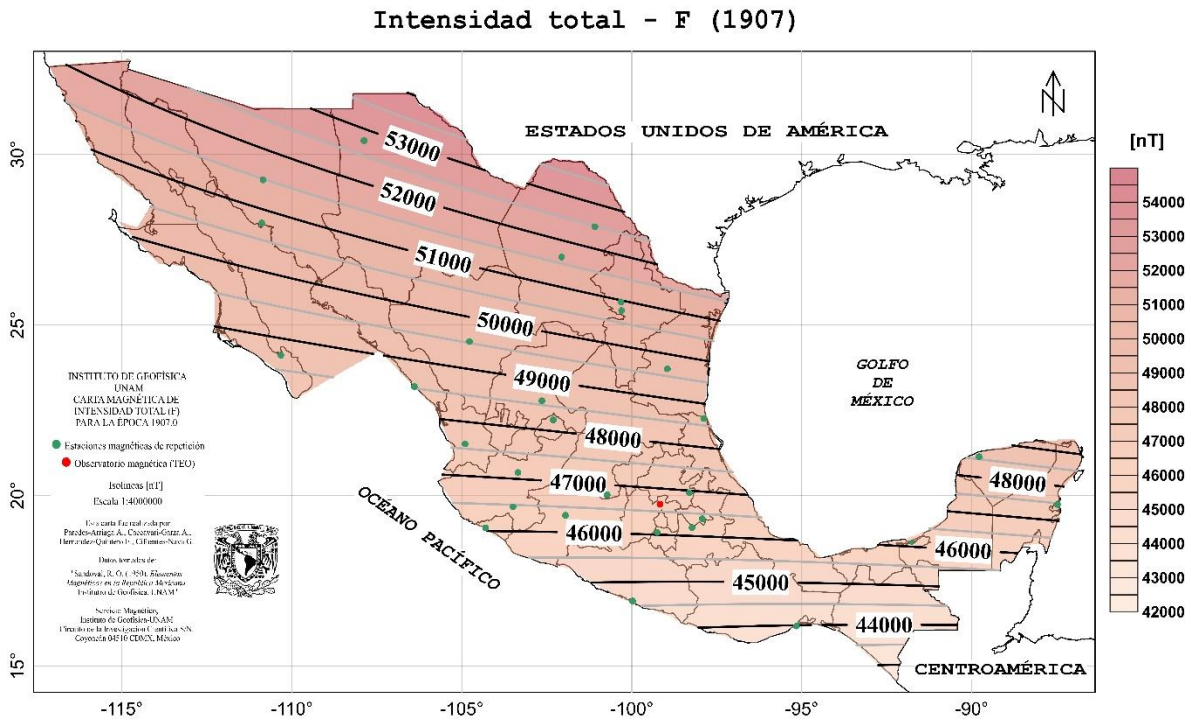


Figura 46. Carta de intensidad magnética total para la época 1907 en México.

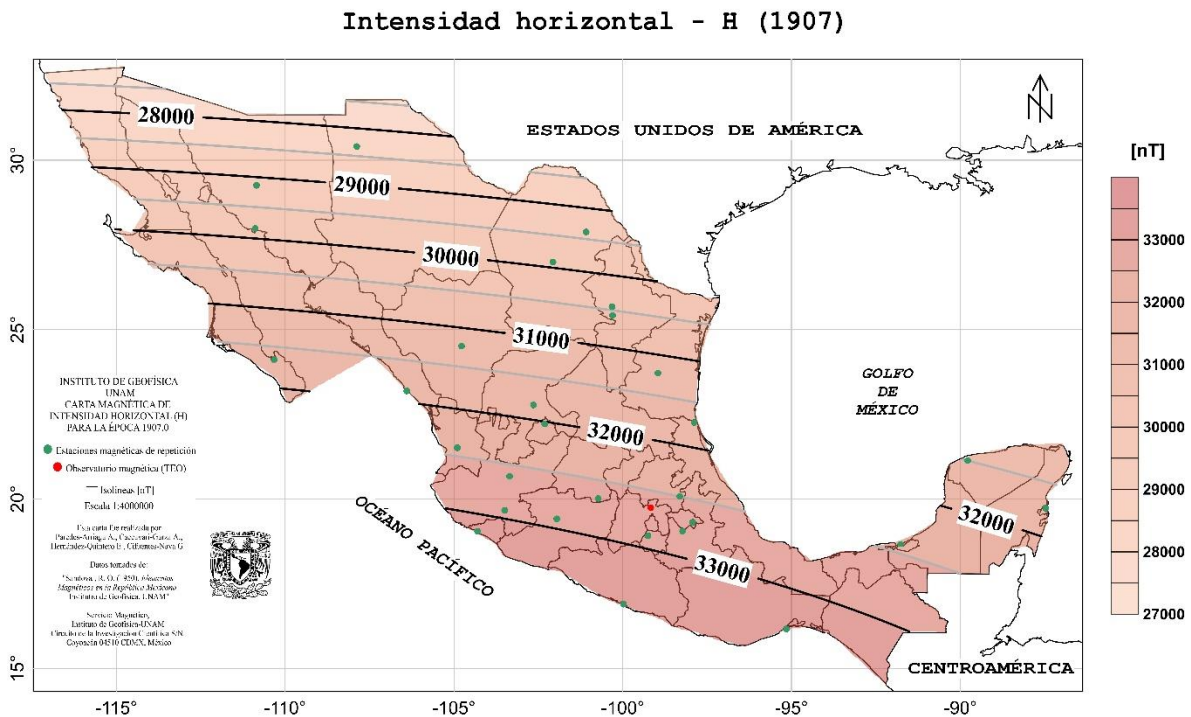


Figura 47. Carta de intensidad magnética horizontal para la época 1907 en México.

Apéndice B. Datos de las estaciones magnéticas de repetición y el observatorio magnético de Teoloyucan con las cartas magnéticas de México

Época 2010.0

Tabla 12. Datos de estaciones magnéticas de repetición, del observatorio magnético de Teoloyucan y su reducción para la carta magnética de la época 2010.0.

| # | Estación | Año | Mes | Día | MEDICIÓN | | | | TDO (año 2010) | | | | REDUCCIÓN A LA ÉPOCA 2010.0 | | | | RESIDUALES | | | | | | | | | |
|----|----------------------|------|-----|-----|-----------|---------|---------|---------|----------------|--------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|
| | | | | | Long (P) | Lat (P) | F (P) | H (P) | D (P) | F (P) | H (P) | D (P) | F (P) | H (P) | D (P) | F (P) | H (P) | D (P) | F (P) | H (P) | | | | | | |
| 1 | La Paz | 2008 | 12 | 12 | -110.3255 | 24.1123 | 9.536 | 50.3016 | 43.9494 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 9.2754 | 50.2391 | 42.9947 | 27.687 | 33.0549 | 27.1920 | 44.323 | 0.0439 | -0.0914 | -1.40 | 97.6 |
| 2 | San José del Cabo | 2008 | 12 | 13 | -109.0870 | 21.0626 | 9.2059 | 49.3179 | 42.9659 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 8.6453 | 49.2554 | 42.657 | 27.210 | 31.9418 | 27.1863 | 42.793 | 0.0050 | -0.0020 | -75.2 | 96.2 |
| 3 | Todos Santos | 2008 | 12 | 14 | -110.2133 | 23.3920 | 9.2324 | 50.1774 | 42.8291 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 8.9718 | 50.1149 | 42.6289 | 27.3358 | 32.1055 | 27.0013 | 42.620 | -0.1522 | 0.1398 | 66.8 | 95.2 |
| 4 | Y de los Domingos | 2008 | 12 | 15 | -111.9019 | 25.5193 | 10.434 | 52.1602 | 44.0800 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 10.1734 | 52.0977 | 43.8798 | 26.9561 | 34.6238 | 26.5233 | 47.612 | 0.1160 | 0.0150 | 60.7 | 80.2 |
| 5 | San Ignacio | 2008 | 12 | 17 | -112.8605 | 27.2808 | 9.8069 | 51.668 | 44.2941 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 9.6003 | 53.6175 | 44.0918 | 26.1553 | 35.6849 | 27.9677 | 43.758 | -0.2247 | 0.0090 | -68.4 | -68.6 |
| 6 | Bahía de los Angeles | 2008 | 12 | 18 | -113.5574 | 28.9534 | 11.0315 | 54.8555 | 45.1344 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 10.7709 | 54.7925 | 45.1132 | 26.0095 | 36.6806 | 25.5513 | 48.607 | 0.0467 | -0.0050 | 48.8 | 8.9 |
| 7 | El Rosario | 2008 | 12 | 19 | -115.7272 | 30.0530 | 12.4217 | 55.3804 | 45.9166 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 12.1611 | 55.3179 | 45.7164 | 26.0136 | 37.9516 | 25.4299 | 52.861 | 0.6916 | -0.0287 | 19.9 | 16.8 |
| 8 | Ensenada | 2008 | 12 | 20 | -116.6102 | 31.8064 | 11.6009 | 57.5144 | 46.9124 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 11.3403 | 57.4519 | 46.7122 | 25.1315 | 39.3756 | 24.6608 | 49.418 | -0.5499 | 0.0188 | 4.0 | -32.3 |
| 9 | Matamoros | 2009 | 2 | 8 | -97.5297 | 27.7719 | 5.0432 | 54.9831 | 45.5839 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 4.9880 | 54.9747 | 45.7210 | 25.9827 | 37.0724 | 25.8863 | 52.805 | -0.0813 | 0.0373 | 6.3 | -13.3 |
| 10 | Cd Victoria | 2009 | 2 | 9 | -98.5942 | 23.7150 | 5.4342 | 52.4674 | 44.0515 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 5.3290 | 52.4590 | 43.9816 | 26.0035 | 34.8754 | 26.6886 | 24.891 | -0.2623 | 0.0086 | 5.9 | -5.0 |
| 11 | Tampico | 2009 | 2 | 14 | -98.5676 | 18.6532 | 3.9736 | 46.5042 | 40.0937 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 3.8084 | 46.4958 | 40.2528 | 27.8249 | 29.2118 | 27.6600 | 18.775 | 0.0826 | 0.0120 | 21.1 | 5.3 |
| 12 | Nautla | 2009 | 2 | 12 | -96.7906 | 20.2386 | 4.2663 | 48.9184 | 41.9399 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 4.5211 | 48.9100 | 41.8720 | 27.5201 | 31.5580 | 27.4345 | 21.693 | -0.1512 | 0.0213 | 19.6 | -11.0 |
| 13 | Vérez | 2009 | 2 | 13 | -98.1792 | 19.1267 | 4.4973 | 47.53 | 41.0403 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 4.3921 | 47.5216 | 40.9724 | 27.6691 | 30.2185 | 27.8879 | 21.199 | -0.0524 | -0.0044 | -38.1 | -22.9 |
| 14 | Minatitlán | 2009 | 2 | 14 | -98.5676 | 18.6532 | 3.9736 | 46.5042 | 40.0937 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 3.8084 | 46.4958 | 40.2528 | 27.8249 | 29.2118 | 27.6600 | 18.775 | 0.0826 | 0.0120 | 21.1 | 5.3 |
| 15 | Cd Carmen | 2009 | 2 | 16 | -91.7660 | 18.6578 | 2.4249 | 47.6077 | 40.9527 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 2.3197 | 47.5993 | 40.6583 | 27.5556 | 30.1765 | 27.5310 | 11.633 | 0.0666 | -0.0068 | 31.1 | -0.9 |
| 16 | Nuevo Casas Grandes | 2009 | 12 | 14 | -107.8781 | 30.4035 | 9.3115 | 57.7002 | 47.1808 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 9.2063 | 57.6978 | 47.1129 | 25.1764 | 39.8218 | 24.8221 | 40.820 | -0.0701 | 0.0143 | 18.3 | -10.6 |
| 17 | Nequiles | 2009 | 12 | 16 | -110.9733 | 31.2274 | 10.5925 | 57.7629 | 47.8909 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 10.4673 | 57.7545 | 47.0011 | 25.3721 | 34.6584 | 24.566 | 45.656 | 0.2640 | 0.0118 | -7.0 | -26.5 |
| 18 | Pto Peñasco | 2009 | 12 | 18 | -113.5213 | 31.3531 | 11.3424 | 57.364 | 46.8231 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 11.2372 | 57.3556 | 46.7122 | 25.2038 | 39.6959 | 24.7373 | 49.184 | 0.2951 | 0.0048 | 10.8 | -9.5 |
| 19 | Hermosillo | 2009 | 12 | 20 | -110.8478 | 29.2567 | 10.1029 | 55.468 | 45.9740 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 9.9977 | 55.4596 | 45.9901 | 26.0281 | 37.8141 | 25.6229 | 45.817 | -0.0077 | -0.0386 | 8.5 | 72.9 |
| 20 | Guzmania | 2009 | 12 | 21 | -110.8889 | 27.9675 | 9.4729 | 54.5740 | 45.2038 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 8.5677 | 54.5665 | 45.1329 | 26.1759 | 36.7162 | 25.9959 | 45.504 | -0.3028 | 0.0185 | 9.7 | -19.8 |
| 21 | Los Mochis | 2009 | 12 | 23 | -108.9789 | 25.8179 | 9.2473 | 52.7013 | 44.0811 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 9.1421 | 52.6929 | 44.0132 | 26.6758 | 35.0080 | 26.3370 | 42.848 | 0.0730 | 0.0100 | -34.0 | -41.4 |
| 22 | Culiacán | 2009 | 12 | 24 | -107.4932 | 24.7425 | 8.5165 | 51.7637 | 43.7602 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 8.4113 | 51.7553 | 43.6923 | 27.0464 | 34.1418 | 26.7558 | 39.963 | -0.1126 | -0.0003 | 53.1 | 43.9 |
| 23 | Mazatlán | 2009 | 12 | 26 | -106.9396 | 21.1919 | 8.7468 | 50.5457 | 42.5770 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 8.6416 | 50.5373 | 42.6911 | 26.9923 | 32.7578 | 26.6859 | 40.557 | 0.4065 | 0.0274 | -27.4 | -41.1 |
| 24 | Oaxaca | 2010 | 12 | 7 | -96.6614 | 17.0947 | 4.7363 | 44.748 | 39.7528 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 4.4780 | 39.7528 | 38.2328 | 27.9856 | 28.1834 | 23.312 | 0.0099 | -0.0008 | 27.1 | 37.9 | |
| 25 | Salina Cruz | 2010 | 12 | 9 | -95.1538 | 16.1713 | 4.0369 | 43.976 | 38.9902 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 4.0369 | 43.9760 | 38.9902 | 28.0858 | 27.0731 | 27.9889 | 19.753 | -0.0275 | -0.0019 | -1.98 | -17.7 |
| 26 | Tuxtla Gutiérrez | 2010 | 12 | 11 | -92.1267 | 16.7415 | 3.1117 | 44.9841 | 39.4473 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 3.1117 | 44.9841 | 39.4473 | 27.9012 | 27.8857 | 27.9601 | 15.146 | -0.0012 | -0.0075 | -1.2 | 13.4 |
| 27 | Coahuila | 2010 | 12 | 13 | -92.1267 | 16.7415 | 3.1117 | 44.9841 | 39.4473 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 3.1117 | 44.9841 | 39.4473 | 27.9012 | 27.8857 | 27.9601 | 15.146 | -0.0012 | -0.0075 | -1.2 | 13.4 |
| 28 | Tehuacan | 2010 | 12 | 15 | -92.2951 | 14.8832 | 2.3476 | 43.2052 | 38.1859 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 2.3476 | 43.2052 | 38.1859 | 27.8340 | 26.1426 | 27.8106 | 11.401 | -0.3698 | -0.0023 | -12.4 | -25.9 |
| 29 | Paniza Nacional | 2010 | 12 | 17 | -98.0388 | 18.7078 | 5.1236 | 43.9077 | 38.0675 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 5.1162 | 43.9169 | 39.1560 | 28.0526 | 27.8215 | 27.617 | 25.028 | 0.1188 | 0.0071 | -1.8 | -15.9 |
| 30 | Zacatecas | 2010 | 11 | 20 | -101.4626 | 17.6078 | 5.7993 | 45.2849 | 40.1409 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 5.8579 | 45.2849 | 40.2528 | 27.8249 | 28.5981 | 24.8671 | 28.5981 | -0.2732 | 0.0023 | 45.9 | 29.9 |
| 31 | Acapulco | 2010 | 11 | 25 | -99.7664 | 16.9033 | 5.7489 | 43.843 | 39.5616 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 5.8075 | 43.8432 | 39.5616 | 27.8429 | 27.3707 | 28.2969 | 28.870 | 0.1442 | -0.0436 | -41.7 | 17.1 |
| 32 | Zacatecas | 2010 | 11 | 28 | -102.4433 | 21.7768 | 6.8295 | 50.4954 | 42.6774 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 6.8883 | 50.4956 | 42.7465 | 27.1924 | 33.0071 | 26.9966 | 33.012 | 0.0288 | -0.0021 | -10.4 | -2.8 |
| 33 | Torreón | 2010 | 11 | 28 | -104.6611 | 23.9696 | 7.3465 | 51.242 | 43.9999 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 7.4051 | 51.2622 | 43.8884 | 27.8482 | 33.6882 | 26.7958 | 28.800 | -0.2117 | 0.0243 | -10.4 | 29.0 |
| 34 | Torreón | 2010 | 11 | 29 | -103.4179 | 25.6880 | 7.2785 | 53.4514 | 44.9346 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 7.3371 | 53.4726 | 44.8831 | 26.6766 | 33.7454 | 26.2938 | 33.812 | -0.0579 | 0.0035 | 12.3 | 7.1 |
| 35 | Chihuahua | 2010 | 11 | 19 | -105.9613 | 28.7176 | 8.4838 | 56.2355 | 46.9923 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 8.5422 | 56.2355 | 46.9923 | 28.0111 | 34.5677 | 28.8104 | -0.0051 | -0.0060 | 1.9 | 12.3 | |
| 36 | Cd Juárez | 2010 | 11 | 21 | -106.4250 | 31.6581 | 8.3427 | 58.9206 | 47.7116 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 8.4017 | 58.9418 | 47.8001 | 26.6048 | 40.9177 | 24.5713 | 37.732 | -0.0820 | -0.0052 | -1.4 | -1.8 |
| 37 | Jaco | 2010 | 11 | 23 | -103.9547 | 27.9577 | 7.6234 | 55.9167 | 44.9316 | 5.5791 | 47.5175 | 41.1390 | 5.8397 | 47.5799 | 41.1393 | 7.6200 | 55.9379 | 45.7536 | 25.2626 | 37.9037 | 27.3739 | 35.858 | 0.1849 | 0.0051</ | | |

Apéndice C. Procesamiento de datos adquiridos en una estación magnética de repetición

En este apéndice se describe el método para el procesamiento de datos obtenidos en trabajo de campo para su posterior uso en una carta magnética, los datos son de mediciones solares y absolutas, en su mayoría se trabajan en una hoja de cálculo tipo *Excel* y en parte del proceso se ocupan dos *softwares* como apoyo: *MICA (Multiyear Interactive Computer Almanac)* (U.S. Naval Observatory, 2006) y *SOLEIL* (Belgium Royal Meteorological Institute, 1997).

En cada medición que se realiza hay que tener en cuenta que los instrumentos utilizados pueden tener como unidades de medida grados sexagesimales o gones (grados centesimales); en caso de que los instrumentos midan en gones, es recomendable pasar los datos tomados a grados sexagesimales ya que, durante el procesado, se trabaja en sistema decimal y sexagesimal.

Mediciones astronómicas solares para obtener el norte verdadero.

1. Datos obtenidos en campo:

Posición geográfica (latitud, longitud y altura).

Lectura de mira directa e indirecta antes y después de las mediciones.

Medición de D e I, así como la hora de muestreo.

2. Procesamiento.

Las lecturas de mira se convierten a sistema decimal, posteriormente se suma o resta 180° a la medición de I o D, dependiendo la orientación inicial con que fue hecha la observación y, se promedian para obtener el Azimut de la mira. Este mismo procedimiento se emplea para todas las mediciones. La posición también se transforma a sistema decimal.

Posteriormente, se usa el software *MICA*, el cual es un almanaque, para obtener: a) El tiempo sideral, del cual obtenemos el tiempo sideral de Greenwich, el tiempo sideral local y la ecuación de los equinoccios, con base a los datos de geolocalización, la fecha y los azimuts calculados antes. b) La posición astrométrica, con la que obtenemos los datos de ascensión recta del sol, la declinación y la distancia del punto geográfico al sol en unidades astronómicas (AU) (Rasson, 2005). Todos los datos obtenidos de *MICA* son del día de la observación y 3 días posteriores.

Los datos anteriores se usan en el software *SOLEIL* para obtener el azimut real. Hay dos cosas con las que se debe tener especial cuidado con este software para obtener resultados adecuados, la primera es el formato en que deben entrar los datos que pide, la segunda es que el programa está diseñado en francés, aunque son pocas y sencillas las palabras que se requieren entender, pueden llegar a generar cierta confusión y con ello que se dé un dato que no es correcto y, por lo tanto, el azimut calculado sea erróneo. La figura 48 es un ejemplo de la entrada de datos y la obtención del azimut de la mira.

```

Heure de la visée (hh.mmssd):? 15.3751
Lecture azimutale du soleil (degrés hex.):? 163.2703
Voulez-vous garder l'ancienne visée balise (oui = 1)?
Lecture azimutale de la balise (degrés hex.):? 178.5430
Voulez-vous garder les valeurs en mémoire (oui = 1)?
Latitude du lieu (degrés hex.):? 22.3016
Longitude du lieu (degrés hex.) (! au signe, - à l'est, + à l'ouest):? 97.5349
Temps sidéral GW à 00 UT:? 13.1145
Ascension droite du soleil au jour de l'observation à 00 UT:? 1.1218
Ascension droite du soleil au jour suivant à 00 UT:? 1.1559
Déclinaison du soleil au jour de l'observation à 00 UT:? 7.3940
Déclinaison du soleil au jour suivant à 00 UT:? 8.0154
azimuth du soleil: 102 ° 13 ' 42
*****
* azimuth de la balise: 117 ° 41 ' 9 *
*****

```

Figura 48. Obtención del azimut de mira con el software *SOLEIL*.

Mediciones absolutas.

1. Datos obtenidos de campo:

Lectura de mira directa e indirecta antes y después de las mediciones.

Medición de declinación (D): E_{up} , E_{dawn} , W_{up} , W_{dawn} , así como la hora de cada medición en UTC.

Medición de inclinación (I): E_{up} , E_{dawn} , W_{up} , W_{dawn} , así como la hora de cada medición en UTC.

Promedio del azimut.

2. Procesamiento.

Se trabaja con todos los datos medidos, éstos deben transformarse a sistema decimal.

Traza cero. Es el equivalente angular al norte verdadero del teodolito, se calcula de la siguiente manera:

$$T_0 = Az - M,$$

donde: T_0 = Traza cero, M = Magnitud de la mira y Az = Azimut astronómico de la mira.

Declinación. La figura 49 es la base para ver la diferencia entre la declinación magnética, el sensor y la azimut astronómica; dada la geometría del sistema, para obtener las perpendiculares entre las mediciones de campo se realizan las siguientes correcciones (Newitt *et al.*, 1996):

$$D_1 = D_{Ear} + T_0 - 90^\circ$$

$$D_2 = D_{Wab} + T_0 - 90^\circ$$

$$D_3 = D_{War} + T_0 + 90^\circ$$

$$D_4 = D_{Eab} + T_0 + 90^\circ$$

$$D = \bar{D}_i$$

Cabe señalar que dependiendo del orden en que son tomados de los datos puede variar a qué dato se le resta o suma 90° , siempre manteniendo congruente el argumento geométrico.

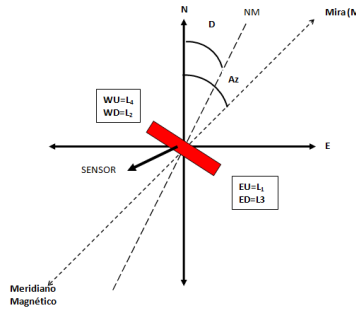


Figura 49. Esquema de la distribución del azimut astronómico, la declinación magnética y el sensor (tomada de Guzmán Armenta, 2013).

Inclinación. La figura 50 muestra la diferencia entre el sensor, z y el norte magnético, con base en ello se realizan las correcciones a las mediciones (Newitt et al., 1996):

$$I_5 = I_{NU}$$

$$I_6 = I_{SD} - 180^\circ$$

$$I_7 = 360^\circ - I_{ND}$$

$$I_8 = 180^\circ - I_{SU}$$

$$I = \bar{I}_l$$

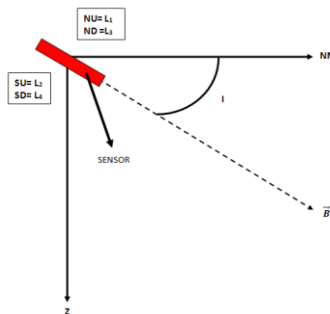


Figura 50. Esquema de la distribución de la inclinación magnética y el sensor (tomadas de Guzmán Armenta, 2013).

Intensidad total. La intensidad total del campo magnético se obtiene del promedio de las mediciones realizadas con el magnetómetro base a la hora que se realizan las mediciones de inclinación (Rasson, 2005):

$$F = (F_5 + F_6 + F_7 + F_8) / 4$$

Por último, los datos de cada variable se promedian para obtener así D_{abs} , I_{abs} y F_{abs} .

Apéndice D. Datos ausentes en las diferentes fuentes de información sobre los registros del observatorio magnético de Teoloyucan

Tabla 17. Datos ausentes en las líneas de tiempo del observatorio magnético de Teoloyucan del año 1965 a 1990, obtenidos del *World Data Centre for geomagnetism*.

| <i>Base de datos</i> | <i>Año</i> | <i>Datos ausentes</i> |
|----------------------|-------------|---------------------------------------|
| World Data System | 1965 - 1977 | - |
| | 1978 | mayo-dic |
| | 1979 - 1982 | - |
| | 1983 | mar-04 / may-06 y nov /30 en adelante |
| | 1984 | Primeras 14 h del ene-01 |
| | 1985 - 1987 | - |
| | 1988 | sep-13 y 14 / 25 y 17 |
| | 1989 | ene-04 y 05 algunas horas |
| | 1990 | - |

Tabla 18. Datos ausentes en las líneas de tiempo del observatorio magnético de Teoloyucan del año 2002 a 2008, obtenidos del *World Data Centre for geomagnetism*.

| <i>Base de datos</i> | <i>Año</i> | <i>Datos ausentes</i> | <i>Horas</i> | <i>Año</i> | <i>Datos ausentes</i> | <i>Horas</i> |
|----------------------|--------------------|------------------------|---------------|------------------------|--|--------------|
| World Data System | 2002 | ene-julio | | 2006 | ene - 11 | 06 -- 21 |
| | | ago - 17 | 03 -- 14 | | feb - (20 - 22) | |
| | | oct - 25 | 03 -- 19 | | jun - 16 | |
| | | oct - 28 | 02 -- 23 | | jun - (17-21) | |
| | | nov - 03 y 04 | | | de jun - 29 a jul - 02 | |
| | | nov - 13 y 14 | | | jul - 16 | 06 -- 17 |
| | | nov 29 | 00 -- 20 | | jul - (17-19) | |
| | | dic -29 | 15 -- 23 | | sep - (20-21) | |
| | 2003 | mar - 03 | 03 -- 23 | oct - (16-17) | | |
| | | mar - 15 | 08 -- 17 | nov - (08-09) | | |
| | | de mar 30 a abr 03 | | ene - (02-03) | | |
| | | jun - 18 | 03 -- 23 | mar - (29) | 00-14 | |
| | | jul - 03 y 04 | | abr (16-18) | | |
| | | ago - 22 y 23 | | abr - 30 | 00-15 | |
| | de sep 29 a oct 04 | | may - 06 | 16-23 | | |
| | 2004 | mar - 17 | 02 -- 23 | de may - 26 a jun - 04 | | |
| | | abr - 09 | 03 --14 | ago - (03 - 06) | | |
| | | jun - 05 y 06 | | ago - 13 | 00-13 | |
| | 2005 | mar - (02 - 05) | | sep 02 | 13 -21 | |
| | | mar - 07 | 00 -- 15 | oct - (16-17) | | |
| | | mar - 22 | 04 -- 14 | nov - 22 | 10 -- 23 | |
| | | de mar - 31 a abr - 03 | | de nov - 23 a dic - 11 | Huecos periódicos de 4 a 9 horas cada uno o dos días | |
| | | oct - 13 y 14 | | | | |
| | | oct - 22 | 10 -- 13 | | | |
| | nov - 10 | | 2008 | mar - 01 | 00 -- 13 | |
| | | | | mar - (02 - 03) | | |
| | | | | mar - (04 - 16) | | |
| | | | | may - (06 - 07) | | |
| | | | | sep - 11 | 13-20 | |
| | | | | sep - 16 | 04 -- 17 | |
| | | | | oct - (02 - 04) | | |
| | | | | oct - (11 - 12) | | |
| | | | oct (16 - 17) | | | |
| | | dic - (13-18) | | | | |

Tabla 19. Datos ausentes en las líneas de tiempo del observatorio magnético de Teoloyucan del año 2009 a 2018, obtenidos *Intermagnet*.

| <i>Base de datos</i> | <i>Años</i> | <i># de archivos</i> | <i>Datos ausentes</i> |
|----------------------|-------------|-----------------------|------------------------|
| Intermagnet | 2009 | 335 | ago - (14 - 18) |
| | | | de oct 27 a nov 11 |
| | | | dic - (28 - 31) |
| | 2010 | 132 | ene - (23 - 24) |
| | | | feb - 24 |
| | | | abr - (04 - 05) |
| | | | abr - (09 - 10) |
| | | | abr - 15 |
| | | | de may - 19 a jun - 02 |
| | | | de jun 04 en adelante |
| | 2015 | 210 | Inicia en jun - 03 |
| | | | jul - (01 y 02) |
| | | | dic - 31 |
| | 2016 | 347 | feb - 04 |
| | | | may - (12 - 23) |
| | | | may - 30 |
| | | | jun - 01 |
| | | | jul - 20 |
| | | | ago - (07 y 08) |
| | 2017 | 347 | feb - 28 |
| | | | may - 03 |
| | | | may - (11 - 17) |
| | | | sep - (03 - 06) |
| 2018 | 107 | de abr 18 en adelante | |

Apéndice E. Análisis exploratorio de los datos pertenecientes a las cartas magnéticas para las épocas 1990.0, 1960.0, 1932.0 y 1907.0

Tabla 20. Estadígrafos asociados a los datos de las componentes magnéticas para la época 2010.0, 1990.0, 1960.0, 1932.0 y 1907.0.

| | Comp. | N total | Media | Desv. Est. | Oblucuidad | Kurtosis | Coef. Var. |
|--------|-------|----------|----------|------------|------------|----------|------------|
| 2010.0 | D | 41 | 6.78 | 3.29 | -0.51 | -0.47 | 0.49 |
| | I | 41 | 51.08 | 4.55 | -0.17 | -1.03 | 0.09 |
| | F | 41 | 43097.49 | 2639.33 | -0.11 | -1.03 | 0.06 |
| | H | 41 | 26833.74 | 1016.51 | -0.36 | -0.81 | 0.04 |
| 1990.0 | D | 45 | 8.08 | 2.96 | -0.57 | -0.20 | 0.37 |
| | I | 45 | 50.56 | 4.50 | 0.09 | -1.00 | 0.09 |
| | F | 45 | 44383.67 | 2524.74 | 0.17 | -0.92 | 0.06 |
| | H | 45 | 27958.65 | 1155.19 | -0.55 | -0.75 | 0.04 |
| 1960.0 | D | 47 | 9.93 | 2.32 | -0.13 | -0.49 | 0.23 |
| | I | 46 | 50.45 | 4.64 | 0.18 | -0.82 | 0.09 |
| | F | 46 | 46099.45 | 2425.31 | 0.21 | -0.69 | 0.05 |
| | H | 46 | 29111.23 | 1421.76 | -0.73 | -0.43 | 0.05 |
| 1932.0 | D | 46 | 10.85 | 2.31 | 0.05 | -1.00 | 0.21 |
| | I | 46 | 52.03 | 5.22 | -0.34 | -1.17 | 0.10 |
| | F | 46 | 47819.80 | 3114.78 | -0.86 | 1.29 | 0.07 |
| | H | 46 | 29135.61 | 2184.60 | -1.38 | 4.21 | 0.07 |
| 1907.0 | D | 34 | 8.64 | 1.99 | 0.29 | 0.66 | 0.23 |
| | I | 34 | 48.38 | 4.35 | 0.47 | -0.78 | 0.09 |
| | F | 33 | 48111.29 | 2422.73 | 0.29 | -0.82 | 0.05 |
| | H | 33 | 31659.80 | 1372.14 | -0.73 | -0.59 | 0.04 |
| | Comp. | Mín | (Q1) | Median | (Q3) | Max | (Q3 - Q1) |
| 2010.0 | D | -1.31 | 4.52 | 7.41 | 9.21 | 12.16 | 4.69 |
| | I | 43.21 | 47.60 | 51.26 | 54.79 | 58.94 | 7.19 |
| | F | 38185.90 | 40864.80 | 43166.80 | 45135.90 | 47800.09 | 4271.10 |
| | H | 24660.45 | 26028.15 | 26992.31 | 27555.58 | 28442.88 | 1527.43 |
| 1990.0 | D | 0.63 | 6.00 | 8.50 | 10.27 | 13.18 | 4.27 |
| | I | 42.97 | 47.63 | 50.61 | 54.46 | 59.12 | 6.84 |
| | F | 40259.93 | 42515.52 | 44392.30 | 46358.74 | 49582.30 | 3843.22 |
| | H | 25448.20 | 27043.14 | 28172.06 | 28910.88 | 29587.34 | 1867.74 |
| 1960.0 | D | 4.60 | 8.28 | 10.11 | 11.72 | 14.18 | 3.43 |
| | I | 42.93 | 47.20 | 50.21 | 53.38 | 59.82 | 6.18 |
| | F | 41845.75 | 44418.20 | 46110.71 | 47923.80 | 51453.61 | 3505.60 |
| | H | 25864.87 | 28515.49 | 29371.47 | 30248.44 | 31148.53 | 1732.95 |
| 1932.0 | D | 6.56 | 8.87 | 10.82 | 12.71 | 15.21 | 3.85 |
| | I | 42.36 | 47.22 | 52.41 | 56.22 | 59.85 | 9.00 |
| | F | 37259.99 | 45598.06 | 48217.65 | 49961.75 | 52884.24 | 4363.68 |
| | H | 20360.24 | 27635.87 | 29278.49 | 30969.86 | 32058.83 | 3333.99 |
| 1907.0 | D | 4.51 | 7.94 | 8.47 | 9.74 | 13.51 | 1.80 |
| | I | 41.40 | 44.78 | 47.46 | 51.02 | 57.45 | 6.24 |
| | F | 44026.65 | 46288.05 | 47508.36 | 49823.32 | 52928.03 | 3535.27 |
| | H | 28483.05 | 30410.55 | 31886.45 | 32856.05 | 33510.25 | 2445.50 |

Época 1990.0

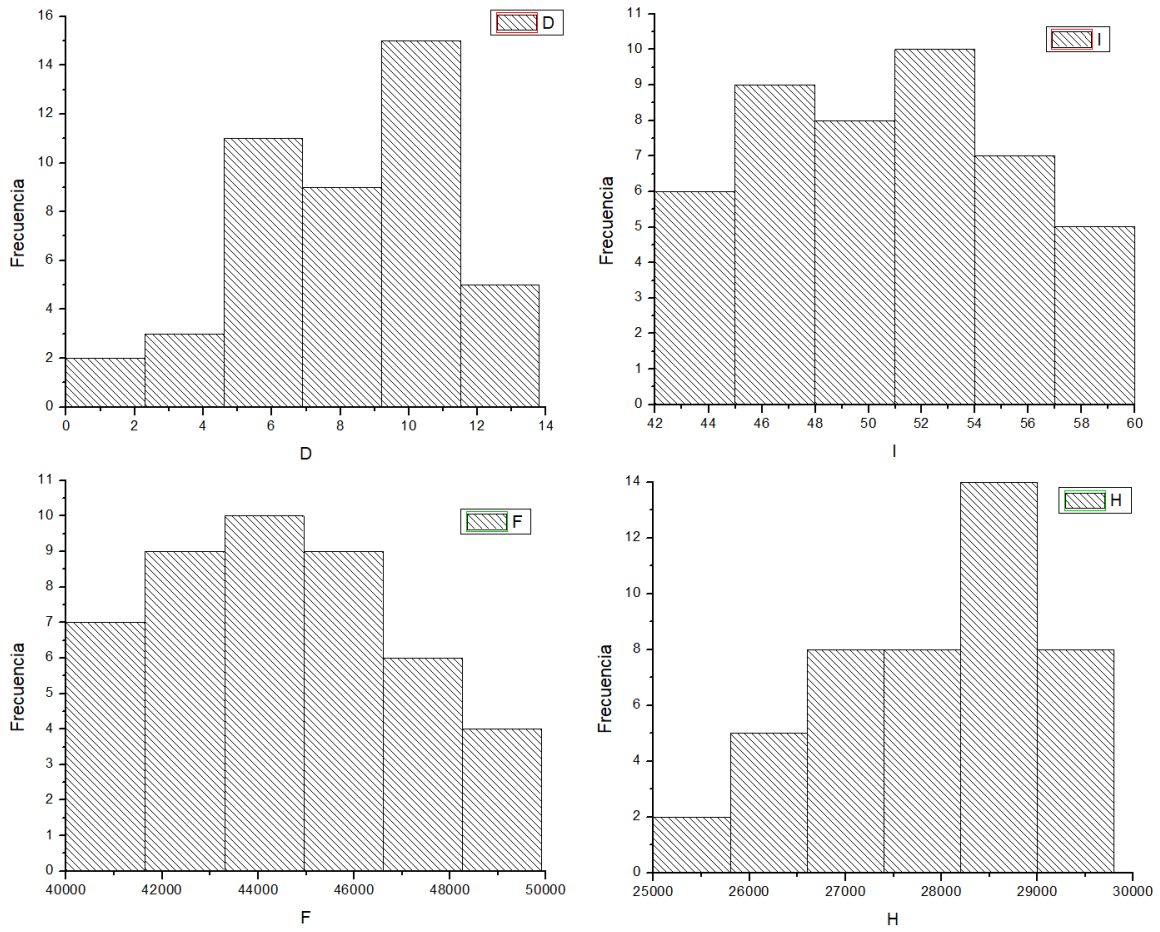


Figura 51. Histogramas de frecuencia de las componentes D, I, F y H, para la época 1990.0.

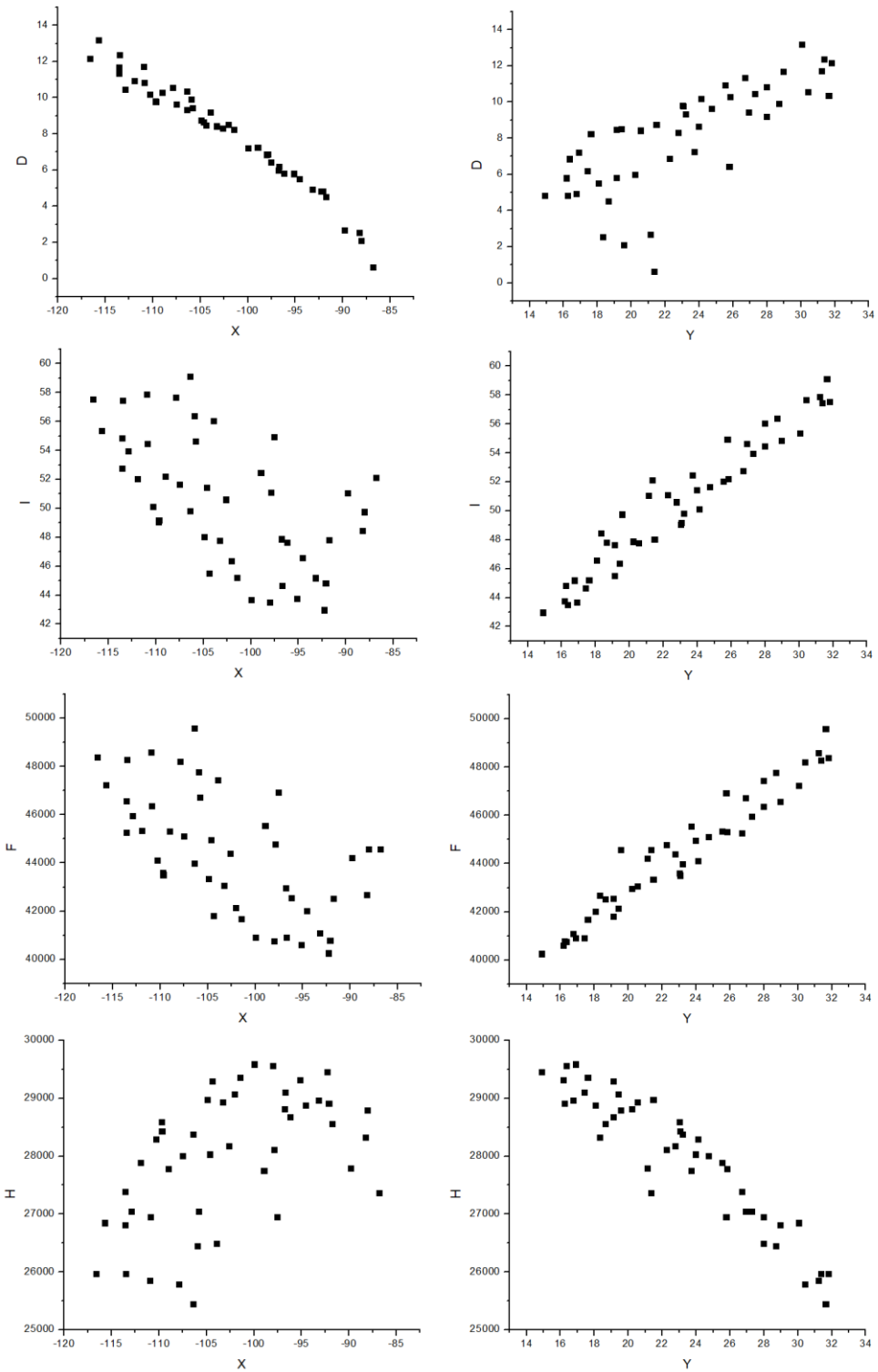


Figura 52. Distribución de las diferentes componentes del campo geomagnético sobre el eje horizontal y vertical para la época 1990.0.

Época 1960.0

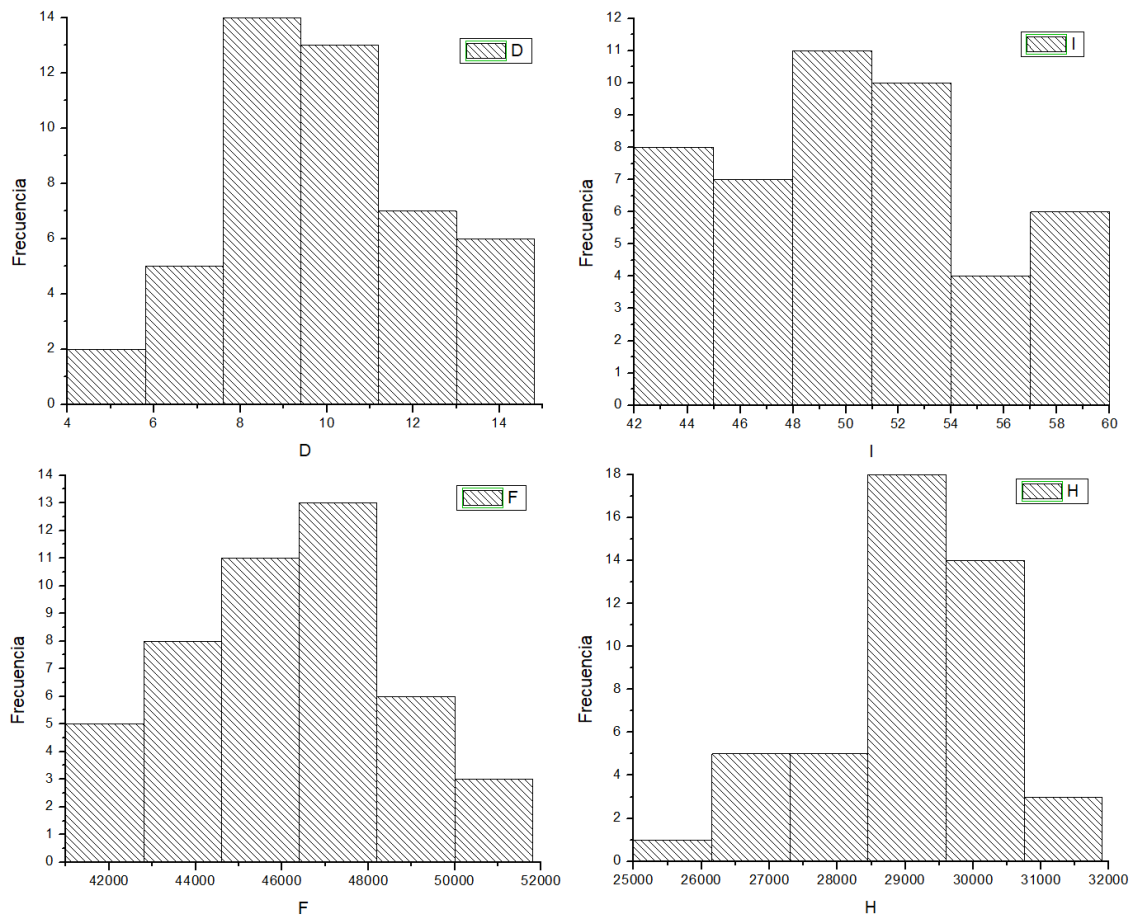


Figura 53. Histogramas de frecuencia de las componentes D, I, F y H, para la época 1960.0.

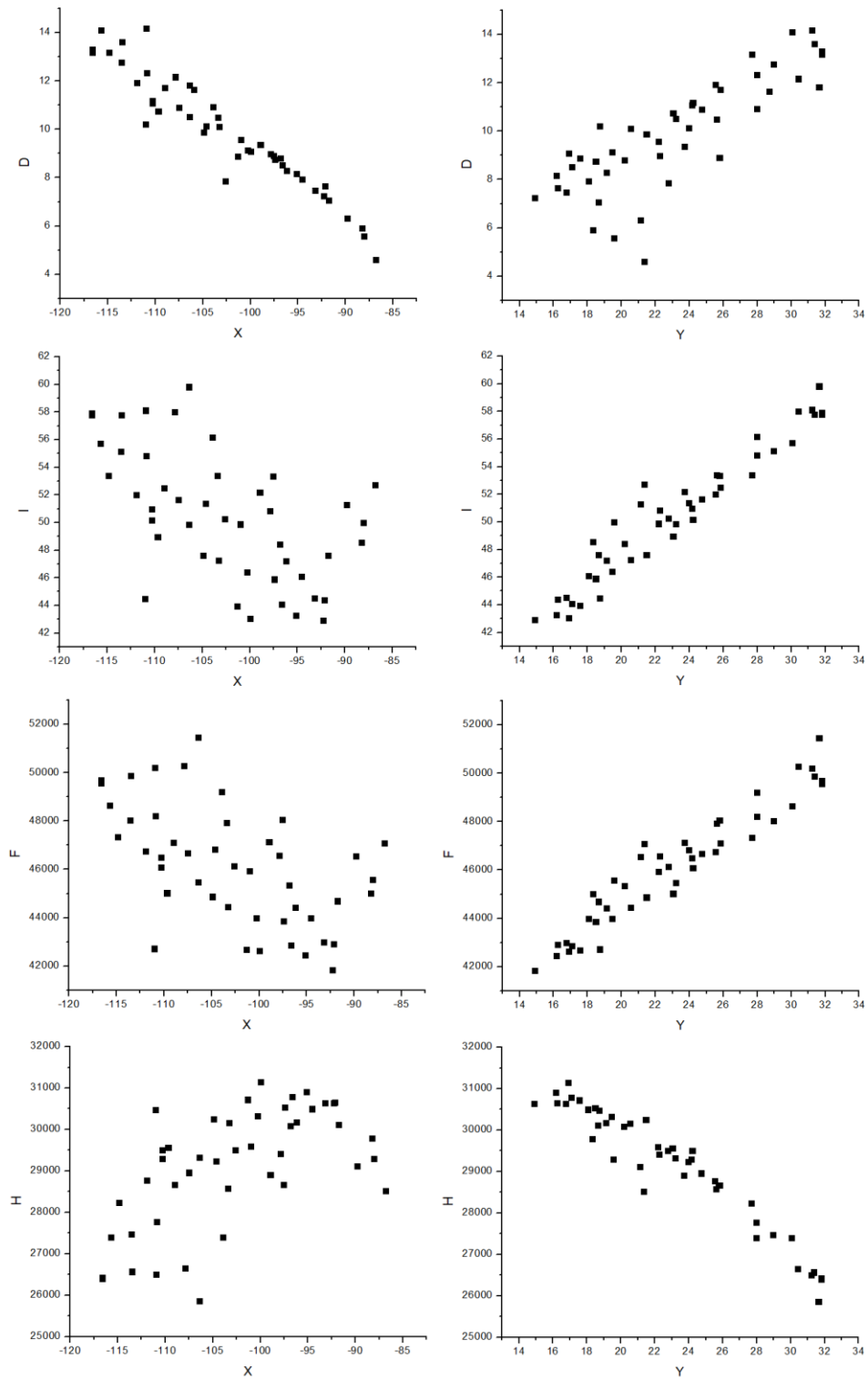


Figura 54. Distribución de las diferentes componentes del campo geomagnético sobre el eje horizontal y vertical para la época 1960.0.

Época 1932.0

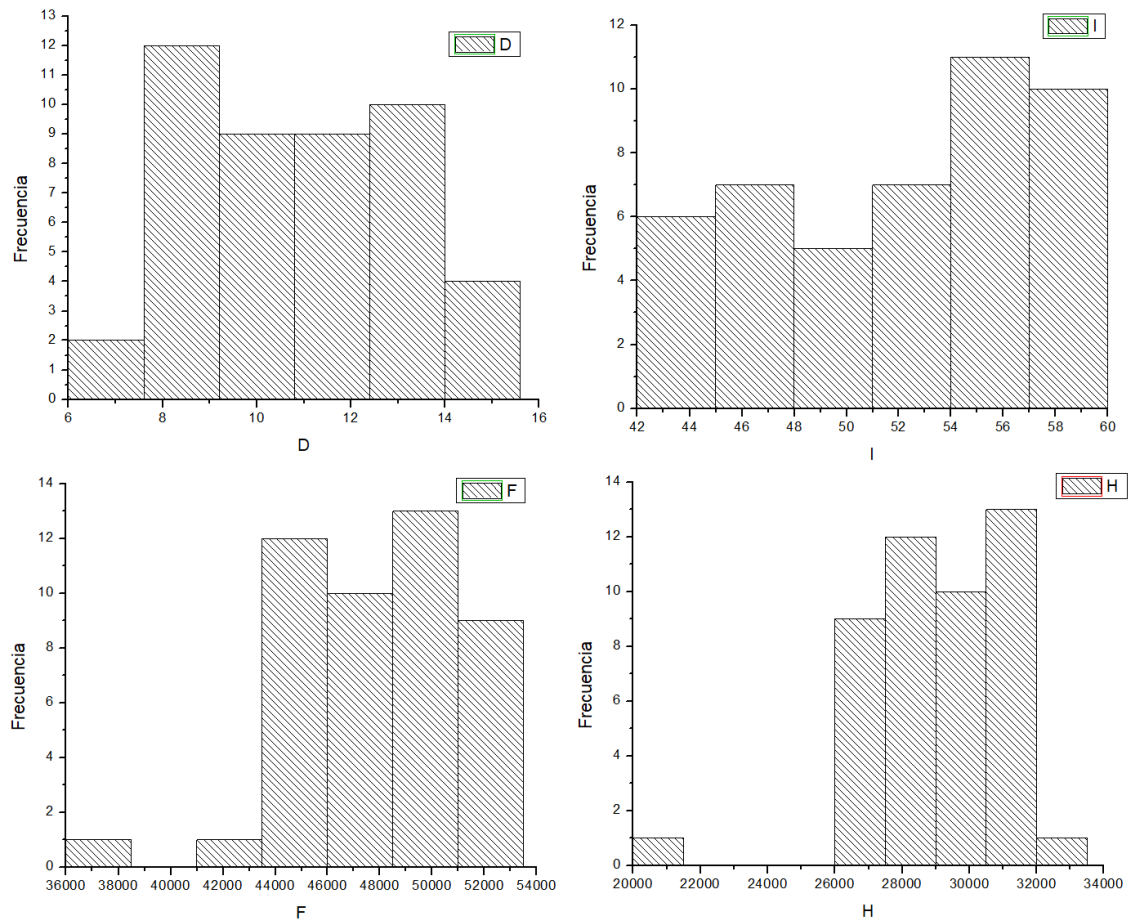


Figura 55. Histogramas de frecuencia de las componentes D, I, F y H, para la época 1932.0.

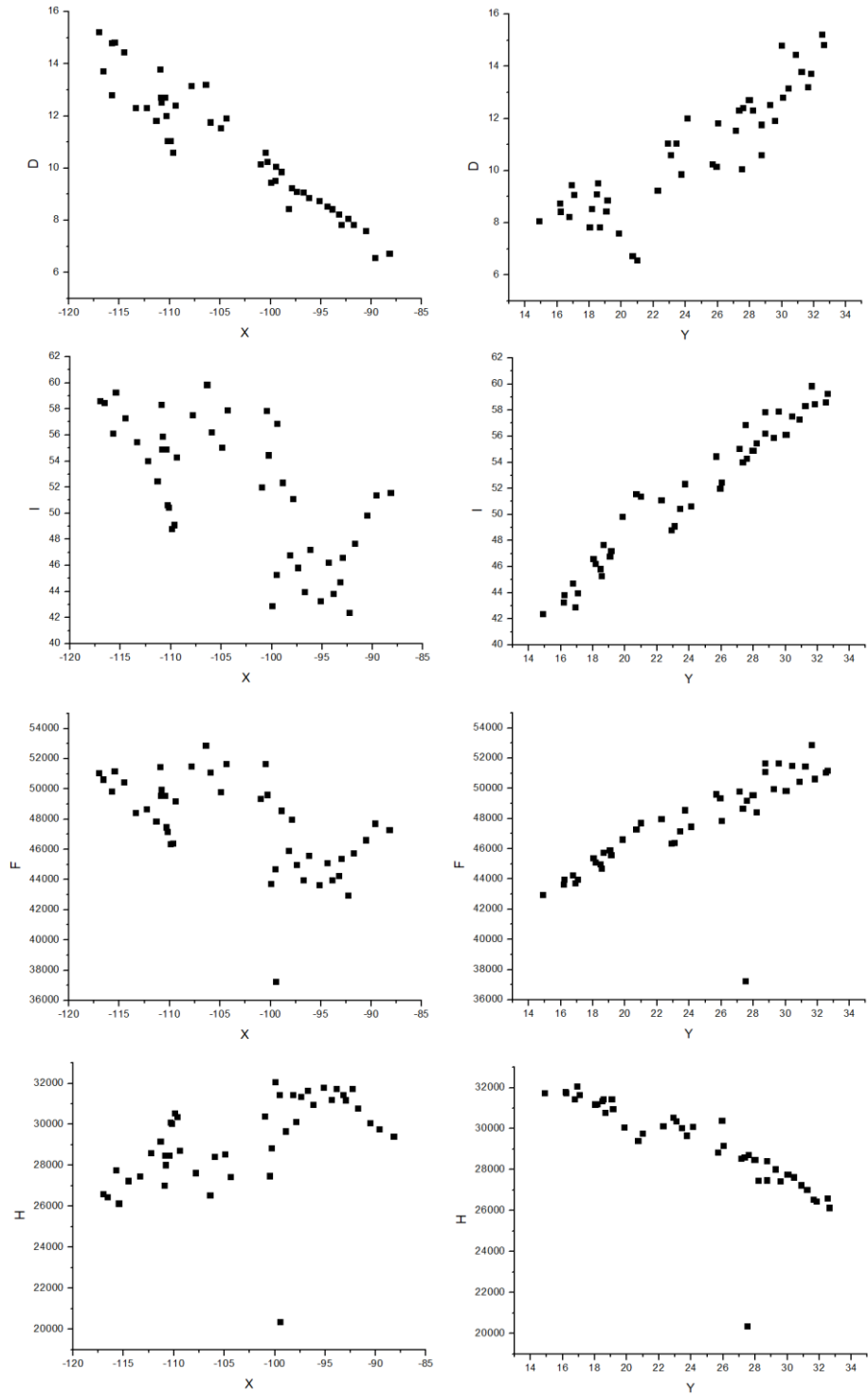


Figura 56. Distribución de las diferentes componentes del campo geomagnético sobre el eje horizontal y vertical para la época 1932.0.

Época 1907.0

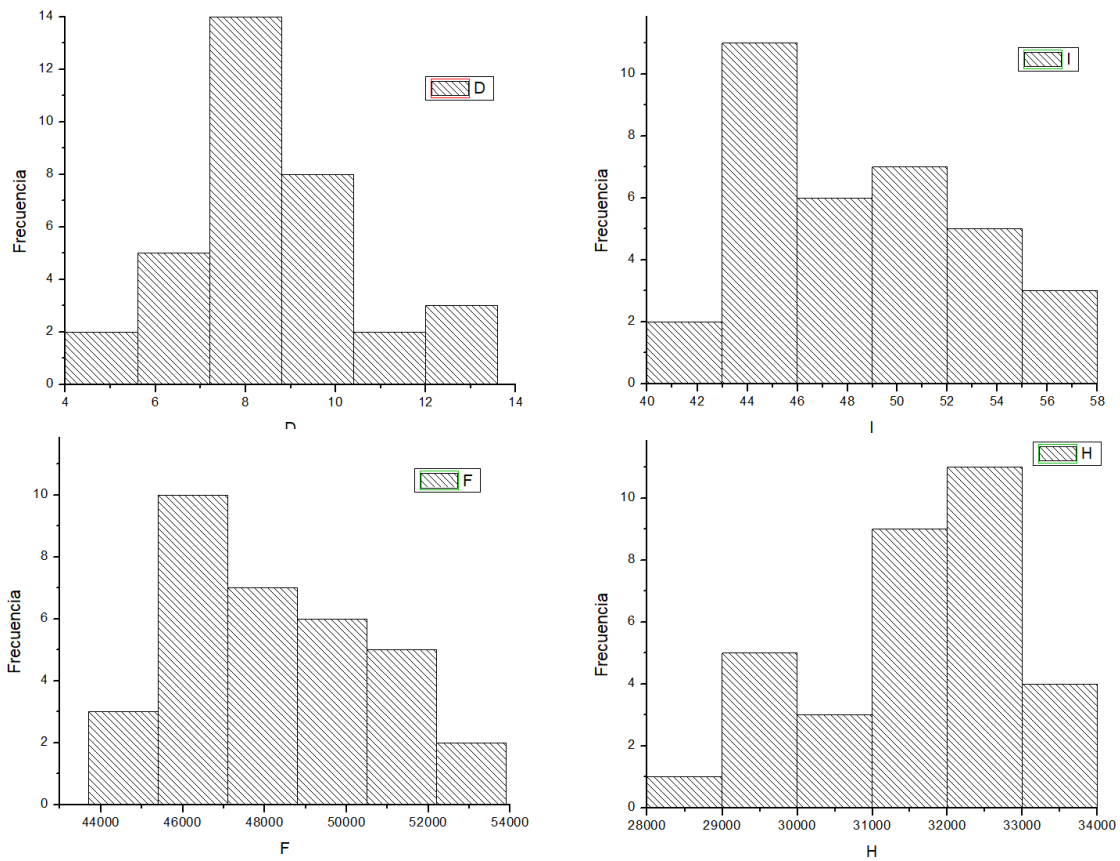


Figura 57. Histogramas de frecuencia de las componentes D, I, F y H, para la época 1907.0.

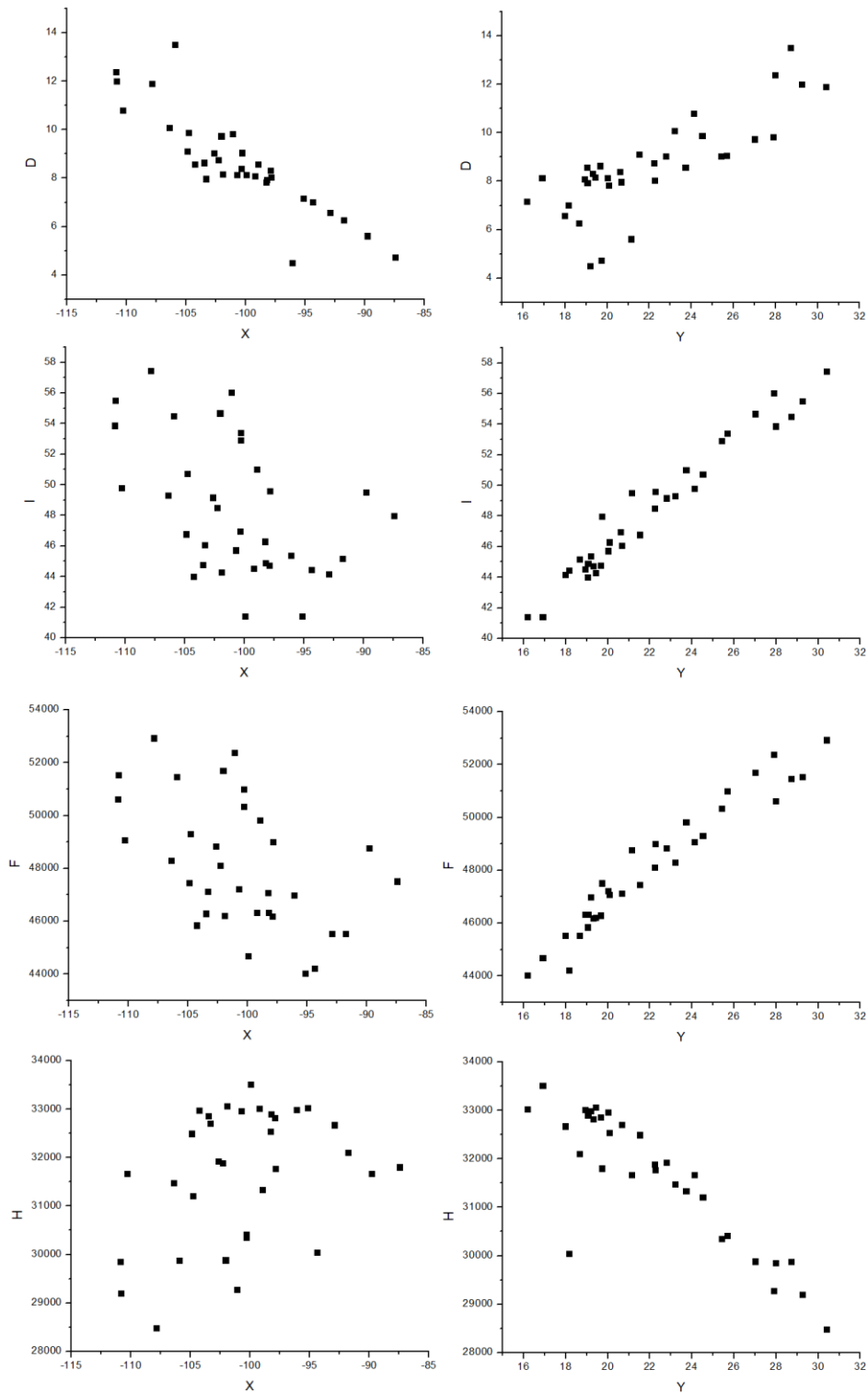


Figura 58. Distribución de las diferentes componentes del campo geomagnético sobre el eje horizontal y vertical para la época 1990.0.