



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



## **INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

### **ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO DE ARTEFACTOS QUEMADOS DEL SITIO ARQUEOLÓGICO EL CÓPORO (GUANAJUATO)**

#### **TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

**Presenta:**

**L.F.M. Alejandra Guadalupe García Pimentel**

**Asesor de tesis:**

**Dra. Isabel Israde Alcántara**

**Coasesor de tesis:**

**Dr. Avto Gogichaishvili**

**Morelia Michoacán, diciembre de 2020.**

## **Agradecimientos**

Agradezco al enigma de la vida, porque aún si saberse explicar, sigue llenándome de alegrías, de tristezas, de sueños y de metas que siempre dejan en mí eternos aprendizajes.

Gracias, a mi madre que con su amor eterno e incondicional esta siempre abrazando mi corazón. Gracias, a mi padre, mi ejemplo de perseverancia, de entrega y de esfuerzo. El hombre que siempre me invita a ir por más y por quién hoy estoy escribiendo estas líneas.

Gracias amor, Sinuet Salazar, por enseñarme que en la vida se lucha por alcanzar los sueños, por creer en mí y por tu eterno apoyo a lo largo de todo este tiempo.

Gracias, a todos los profesores que he tenido a lo largo de mi vida, porque cada uno de ellos ha contribuido enormemente a la formación académica que hoy tengo.

Gracias a mis tutores, el Dr. Avto Gogichaishvili y la Dra. Isabel Israde Alcántara, por creer en mí y darme la oportunidad de trabajar a su lado, por brindarme nuevos aprendizajes y trazar para mí nuevos horizontes llenos de esperanza.

Gracias, Dr. Rafael García Ruíz, amigo, por tu apoyo incondicional a lo largo de esta maestría, por ser el guía que me trajo a esta línea de investigación que tanto disfruta trabajar y por enseñarme a disfrutarlo de la misma forma.

Gracias, Dr. Rubén Cejudo Ruíz, porque con dedicación y paciencia estuvo siempre compartiendo sus conocimientos en el laboratorio y en el aula.

Gracias, Arqueólogo Carlos Alberto Torreblanca Padilla, por permitir nuestra colaboración en el gran trabajo que usted realiza en la zona arqueológica El Cópore y por su hospitalidad durante los trabajos de muestreo.

Agradezco profundamente los apoyos para este proyecto de investigación UNAM PAPIIT IN 101920 y CONACYT CIENCIA BÁSICA 252149, así como la beca No. 906557 que CONACYT me otorgo para poder llevar a cabo mi posgrado.

Finalmente, gracias a todos aquellos que estuvieron, que están, y que estarán a mi lado en este hermoso viaje llamado vida.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	8
<b>ABSTRACT</b> .....	10
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Antecedentes.....	17
1.3. Hipótesis y Objetivo.....	24
Hipótesis.....	24
Objetivo.....	25
1.4. Objetivos específicos:.....	25
<b>CAPÍTULO II. EL CÓPORO</b> .....	27
2.1. Introducción.....	27
2.2. El inicio Mesoamericano: las sociedades agrícolas complejas en el noroeste de Guanajuato (650 a.C a 200 d.C.).....	29
2.3. Surge El Cóporo en el Valle de Ocampo (0 al 200 d.C.).....	32
2.4. El Clásico mesoamericano: la interacción con Teotihuacán, la región del Tunal Grande y El Cóporo (200 d.C. al 600 d.C.).....	33
2.5. El Epiclásico: la hegemonía de El Cóporo y consolidación de una identidad en el valle de Ocampo (600 d.C. al 900 d.C.).....	37
2.6. El abandono y la presencia Tolteca en el noroeste de Guanajuato (900 d.C. al 1000 d.C.); el despoblamiento (1000 d.C. al 1300 d.C.).....	42
<b>CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO</b> .....	43
3.1. Introducción.....	43
3.2. El campo magnético terrestre (CMT).....	44
3.3. Paleomagnetismo y Arqueomagnetismo.....	46
3.4. Fundamentos del paleomagnetismo.....	46
3.5. Variación secular geomagnética.....	49
3.6. Conceptos básicos del método paleomagnético.....	50
3.6.1. La susceptibilidad magnética.....	50
3.6.2. Magnetización.....	52
3.6.3. Dominios magnéticos.....	53
3.6.4. Tipos de magnetización.....	54
3.6.5. Temperatura de Curie.....	55

3.7. Métodos estadísticos en paleomagnetismo	55
<b>CAPÍTULO IV. MODELOS DE CURVAS DE VARIACIÓN PALEOSECULAR</b>	<b>59</b>
4.1. Introducción	59
4.2. Base datos arqueomagnéticos	60
4.3. Construcción de una curva de variación paleosecular	63
<b>CAPÍTULO V. METODOLOGÍA</b>	<b>66</b>
5.1. Introducción	66
5.2. Ubicación de la zona de muestreo	67
5.3. Muestreo en el Conjunto Gotas	69
5.4. Muestreo en el Conjunto Montés	74
5.5. Muestreo en el Conjunto Cóporo	75
5.6. Resumen de muestras recolectadas	76
5.7. Inventario fotográfico	77
5.7.1. Muestras de la Plataforma este.	78
5.7.3. Muestras del Cuarto central de la Plataforma norte	79
5.7.6. Muestras de la Plataforma sur del Conjunto Cóporo.	82
5.8. Análisis de magnetismo de roca	84
5.9. Preparación de muestras	85
5.9.1. Consolidación de muestras	85
5.9.2. Encapsulado de muestras	86
5.9.3. Obtención de especímenes	87
5.10. Análisis de magnetización remanente natural (MRN)	92
5.11. Fase de desmagnetización por campos alternos	93
<b>CAPÍTULO VI. RESULTADOS</b>	<b>94</b>
5.1. Análisis de magnetismo de roca.	94
5.2. Magnetización remanente natural (MRN)	96
5.3. Desmagnetización por campos alternos	97
5.4. Datación arqueomagnética	100
<b>CAPÍTULO VII. DISCUSIÓN</b>	<b>107</b>
<b>CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES FINALES</b>	<b>110</b>
<b>Referencias</b>	<b>112</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Distribución de conjuntos arquitectónicos (Torreblanca-Padilla, 2015).....	28
Figura 2. Región de la cultura Chupícuaro y asentamientos tempranos en la región (Torreblanca-Padilla, 2015).....	30
Figura 3. Asentamientos tempranos en el norte de Guanajuato (Torreblanca-Padilla, 2015) .	31
Figura 4. Cerámica con decoración al cloisonné recuperada en El Cópore (Torreblanca-Padilla, 2015) .	35
Figura 5. Espacios con vestíbulo en el ingreso a la habitación principal; localizados en la cima del cerro Cópore. ....	36
Figura 6. Distintas almenas que coronaban la parte alta de los edificios principales. ....	36
Figura 7. Centros de poder en la región del Tunal Grande durante el Epiclásico. ....	38
Figura 8. Cerámica Valle de San Luis, característica del Tunal Grande en el periodo 600 al 900 d.C. ....	39
Figura 9. Cerámica tipo Electra policromo del Cópore. ....	39
Figura 10. Figurilla con decoración policroma. ....	40
Figura 11. Figurilla con decoración monocroma.....	41
Figura 12. Lapidaria del Cópore en forma de rana. ....	41
Figura 13. Líneas de campo provocadas por la convección térmica influenciada por el movimiento de rotación de la Tierra (Q&S, 2017).....	45
Figura 14. Modelo del dipolo geocéntrico axial, $\lambda$ latitud geográfica; $r_e$ radio medio terrestre, $M$ dipolo magnético: $I$ inclinación; $N$ norte geográfico (Butler, 1992).....	47
Figura 15. Esquema de ángulos que definen el campo magnético terrestre en un punto sobre la superficie (Soler-Arechalde, 2006).....	48
Figura 16. Registro histórico de la variación en la dirección del campo geomagnético en Greenwich, Inglaterra (Butler, 1992).....	49
Figura 17. Acoplamiento de los espines de los electrones de acuerdo con el tipo de respuesta del material al campo magnético (Soler-Arechalde, 2006). ....	52
Figura 18. Comportamiento de los momentos magnéticos en la transición de un dominio a otro, a través de la pared de Bloch (Tarling, 1983). ....	54
Figura 19. Distribución temporal de datos arqueomagnéticos para los últimos 10 mil años, proporcionados por la base de datos GEOMAGIA50 (Pavón Carrasco, 2015).....	60
Figura 20. Distribución espacial de datos arqueomagnéticos (Pavón Carrasco, 2015). ....	61
Figura 21. Curvas de variación paleosecular de dos distintos modelos regionales para Europa sobre los últimos 3 mil años (Pavón Carrasco, 2015). ....	63
Figura 22. Conjuntos muestreados dentro de la zona arqueológica El Cópore.....	66
Figura 23. Excavación del pozo de sondeo correspondiente a la Plataforma Oriente o Salón Rojo del conjunto Gotas (Padilla, 2018). ....	67
Figura 24. Mapa de localización de la zona arqueológica El Cópore. ....	68
Figura 25. Vista aérea del Conjunto Gotas, señalando cada uno de los sitios muestreados.....	69
Figura 26. Colocación de testigo de yeso sobre el piso prehispánico (Padilla, 2018).....	70
Figura 27. Orientación de los pisos prehispánicos.....	70
Figura 28. Muestras Cop1, Cop2 y Cop3 sobre el pozo de sondeo del Salón Rojo (Padilla, 2018).....	70
Figura 29. Proceso de embalaje de las muestras.....	71

Figura 30. Extracción de las muestras del pozo de sondeo del Cuarto Oriente (Padilla, 2018). .....	71
Figura 31. Orientación de las muestras del pozo de sondeo del Cuarto Oriente (Padilla, 2018). ....	71
Figura 32. Colocación de testigo de yeso sobre los pisos del Cuarto Central (Padilla, 2018). .....	72
Figura 33. Orientación de las muestras del pozo de sondeo del Cuarto Central (Padilla, 2018). .....	72
Figura 34. Orientación de las muestras del Cuarto Poniente (Padilla, 2018).) .....	73
Figura 35. Extracción de las muestras del Cuarto Poniente (Padilla, 2018). .....	73
Figura 36. Muestras correspondientes al pozo de sondeo del Cuarto Poniente. ....	73
Figura 37. Liberación de los pisos prehispánicos cubiertos por una capa vegetal (Padilla, 2018). ..	74
Figura 38. Orientación de los pisos expuestos dentro del Conjunto Montés. ....	74
Figura 39. Orientación de las muestras del Conjunto Cópore. ....	75
Figura 40. Muestra de piso prehispánico lista para su embalaje (Padilla, 2018). .....	75
Figura 41. Muestras ya orientadas sobre la Plataforma Sur del Conjunto Cópore. ....	75
Figura 42. Muestra Cop1. ....	78
Figura 43. Muestra Cop2. ....	78
Figura 44. Muestra Cop3A. ....	78
Figura 45. Muestra Cop3B. ....	78
Figura 46. Muestra Cop4. ....	79
Figura 47. Muestra Cop5. ....	79
Figura 48. Muestra Cop6. ....	79
Figura 49. Muestra Cop7. ....	79
Figura 50. Muestra Cop8. ....	80
Figura 51. Muestra Cop9. ....	80
Figura 52. Muestra Cop9B. ....	80
Figura 53. Muestra Cop10. ....	80
Figura 54. Muestra Cop5-1. ....	81
Figura 55. Muestra Cop5-2. ....	81
Figura 56. Muestra Cop5-3. ....	81
Figura 57, Muestra Cop5-4. ....	81
Figura 58. Muestra Cop5-5. ....	82
Figura 59. Muestra Cop5-6. ....	82
Figura 60. Muestra Cop5-7. ....	82
Figura 61. Muestra Cop5-8. ....	82
Figura 62. Muestras Cop11 y Cop12. ....	83
Figura 63. Muestra Cop12'. ....	83
Figura 64. Muestra Cop12''. ....	83
Figura 65. Muestra Cop14. ....	83
Figura 66. Muestra Cop14B. ....	84
Figura 67. Muestra Cop15. ....	84
Figura 68. Susceptibilímetro MFK1 AGICO. ....	85
Figura 69. Muestra Cop2 para su futuro análisis. ....	85
Figura 70. Materiales utilizados para la preparación de la solución. ....	86
Figura 71. Muestra Cop2 sumergida en la solución de pegamento. ....	86
Figura 72. Muestras Cop8 y Cop9 puestas al sol después de ser sumergidas en la solución de pegamento. ....	86

Figura 73. Muestra orientada dentro del cuadro de silicón antes de ser cubierta de yeso. ....	87
Figura 74. Muestra cubierta de yeso dentro del cuadro de silicón. ....	87
Figura 75. Muestras puestas al sol después de ser encapsuladas en yeso. ....	87
Figura 76. Trazo de las líneas de corte sobre la muestra Cop15. ....	88
Figura 77. Especímenes obtenidos de la muestra Cop14. ....	88
Figura 78. Especímenes obtenidos de la muestra Cop8 encapsulada en yeso. ....	88
Figura 79. Especímenes de la muestra Cop1 colocados en cubos de plástico. ....	88
Figura 80. Especímenes sumergidos nuevamente en la solución de pegamento. ....	89
Figura 81. Magnetómetro de giro JR-6 marca AGICO utilizado para el análisis de MRN. ....	93
Figura 82. Desmagnetizador LDA 5 marca AGICO. ....	93
Figura 83. Curva termomagnética continua (k/T) para la muestra Cop1. ....	95
Figura 84. Curva termomagnética continua (k/T) para la muestra Cop5-3. ....	95
Figura 85. Curva termomagnética continua (k/T) para la muestra Cop7. ....	96
Figura 86. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO18 correspondiente al Sitio III. ....	98
Figura 87. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO64 correspondiente al Sitio VI. ....	99
Figura 88. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO15 correspondiente al Sitio II. ....	99
Figura 89. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO16 correspondiente al Sitio II. ....	100
Figura 90. Intervalo de edad probable para el Sitio I. ....	101
Figura 91. Intervalo de edad probable para el Sitio II. ....	102
Figura 92. Intervalos de edad probable para el Sitio IV. ....	103
Figura 93. Intervalo de edad probable para el Sitio V. ....	104
Figura 94. Intervalo de edad probable para el Sitio VI. ....	105

## Índice de tablas

Tabla 1. Cronología del Cóporo (Braniff 1972). ....	23
Tabla 2. Resumen de muestras recolectadas por sitio de estudio para su datación arqueomagnética. ....	76
Tabla 3. Especímenes obtenidos para el sitio I. ....	89
Tabla 4. Especímenes obtenidos para el sitio II. ....	90
Tabla 5. Especímenes obtenidos para el sitio III. ....	90
Tabla 6. Especímenes obtenidos para el sitio IV. ....	91
Tabla 7. Especímenes obtenidos para el sitio V. ....	91
Tabla 8. Especímenes obtenidos para el sitio VI. ....	92
Tabla 9. Direcciones arqueomagnéticas obtenidas para cada sitio de estudio. ....	102

## RESUMEN

La zona arqueológica El Cópore se localiza en el actual municipio de Ocampo, al noroeste del estado de Guanajuato, México. Los trabajos de investigación en el sitio comenzaron en el año de 1962 y continúan hasta la actualidad, con la finalidad de contribuir a la construcción de los acontecimientos prehispánicos ocurridos tanto en el sitio, como en la región del Tunal Grande. Una pieza importante en esta construcción histórica de acontecimientos es obtener la secuencia ocupacional del sitio y contribuir a la cronología absoluta del Tunal Grande y la frontera norte de Mesoamérica. Lo anterior fue el objetivo del presente trabajo, el cual se logró mediante el estudio arqueomagnético de pisos quemados ubicados en algunas áreas de la zona arqueológica El Cópore.

A principios de diciembre de 2018, se realizó la extracción de 23 muestras de pisos prehispánicos quemados ubicados en seis áreas de la zona arqueológica El Cópore. En la Plaza del Ocaso correspondiente al Conjunto Gotas, se muestreó el Salón Rojo sobre la plataforma oriente, así como el Cuarto Oriente, Cuarto Central y Cuarto Poniente de la plataforma norte. De la misma manera, se muestreó la Estructura I del Conjunto Montes sobre la plataforma oriente y la Estructura II del Conjunto Cópore sobre la plataforma sur. Se realizaron experimentos de magnetismo de roca para definir la naturaleza de los portadores magnéticos responsables de la magnetización termorremanente. Se prepararon especímenes cúbicos y se midió la magnetización remanente natural (MRN) mediante un magnetómetro de giro. Posteriormente, se realizó un proceso de desmagnetización



por campos alternos utilizando campos de 5 a 55 mT, los cuales fueron aplicados con un desmagnetizador LDA 5 marca AGICO para eliminar magnetizaciones secundarias y obtener sus paleodirecciones primarias. Adicionalmente, se utilizó el modelo geomagnético SHA.DIF14K para obtener los intervalos de edad arqueomagnética mediante la herramienta desarrollada en Matlab por Pavón-Carrasco en 2014.

Las arqueodirecciones características se determinaron con precisión para cuatro de los seis sitios, arrojando direcciones estadísticamente indistinguibles, con intervalos de edad arqueomagnéticos que van del año 820 d.C. al 950 d.C. los cuales concuerdan con estudios arqueológicos previos que sugerían un periodo de abandono del sitio alrededor del año 900 d.C., con un intento de reocupación por parte de la cultura Tolteca. Numerosas evidencias arqueológicas se pronuncian a favor de un incendio intencional. Sin embargo, debe considerarse la posibilidad de un ritual de abandono y clausura del sitio, pues no existen rastros de acciones violentas o de guerra.

Palabras clave: Arqueomagnetismo – El Tunal Grande – Mesoamérica – Pisos quemados – Edad arqueomagnética

## **ABSTRACT**

The archaeological zone The Cópore is located near to Ocampo town, northwest of the state of Guanajuato, México. Systematic surveys began in 1962 aimed to understand principal prehispanic events occurred at the site in context of The Tunal Grande region. A fundamental piece of this construction was to obtain the occupational sequence of the site and thereby contribute to the absolute chronology of The Tunal Grande and the northern border of Mesoamerica. The present work is also intended to contribute to the absolute chronology of El Cópore through the detailed archeomagnetic investigation of burned floors located in some areas of the archaeological zone.

At the beginning of December 2018, twenty three hand samples of burned prehispanic floors were extracted at six areas of The Cópore archaeological zone. Namely, in Ocaso Square corresponding to The Gotas Complex, The Red Room was sampled on the East Platform, as well as The East Room, The Central Room and The West Room of The North Platform. In the same way, The Structure One of the Montes Complex was sampled at the East Platform and the Structure Two of the Coporo Complex was sampled at the Southern Platform. Rock-magnetic experiments were carried out to define the nature of the magnetic carriers responsible of the thermoremanent magnetization. Cubic specimens were prepared and the Natural Remanent Magnetization (NRM) was measured using a spinner magnetometer. Subsequently, a demagnetization process by alternating fields was carried out using peak fields from 5 to 55 mT using an Agico LDA 5 demagnetizer in order to eliminate secondary magnetizations and to obtain their primary

paleodirections. Additionally, the SHA.DIF 14K model was used to obtain the archaeomagnetic age intervals (Pavón Carrasco et al. 2014).

Characteristic archaeodirections were precisely determined for four out of 6 sites yielding statistically undistinguishable directions and corresponding archeomagnetic age intervals ranging from 820 to 950 A.D. in good agreement with previous archeological studies that suggested a period of abandonment at about 900 A.D. as an attempt to reoccupy the place by the Toltecs. Numerous archaeological evidences argue in favor of an intentional fire. However, the possibility of ritual closure should be also considered since there is no evidence of violent or warlike actions.

Key words: Archaeomagnetism – The Tunal Grande – Mesoamerica – Burned floors – Archaeomagnetic age

# CAPÍTULO I.

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

Uno de los principales objetivos en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias naturales y exactas, particularmente de la Física y las Matemáticas, es introducir el concepto de transversalidad, el cual consiste en definir actividades de aprendizaje que no pertenecen a una sola ciencia y a la vez responden a las necesidades de formación humana y científica que el mundo actual demanda.

Es necesario eliminar la enseñanza aislada de los conocimientos científicos y lograr transmitir al alumnado la importancia de las ciencias naturales y exactas no solo en la vida cotidiana sino también en el desarrollo social y cultural de nuestra civilización.

Las Ciencias de la Tierra (Geociencias) estudian la estructura, morfología, evolución y dinámica del planeta Tierra y el espacio exterior. Al encargarse del estudio de los fenómenos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en nuestro planeta, las Geociencias tienen como objetivo explicar científicamente dichos fenómenos y evaluar las consecuencias, tanto positivas como negativas, de los mismos.

La Geofísica es una de las Geociencias que se encarga del estudio de los fenómenos físicos relacionados con la estructura y evolución de la Tierra, se trata de una disciplina que utiliza métodos matemáticos y físicos, de manera teórica y práctica, que permiten comprender y explicar la naturaleza de dichos fenómenos.

Como parte de la geofísica, el Paleomagnetismo tiene como objetivo estudiar el origen, evolución y forma de actuar del campo geomagnético que permita elaborar un registro del comportamiento del campo magnético terrestre a través del tiempo (Butler, 1992).

El campo magnético terrestre es considerado un campo dipolar, geocéntrico y axial. Esto significa que es producido por un dipolo ubicado en el centro de la Tierra, cuyo eje se encuentra alineado con el eje de rotación terrestre. El campo geomagnético en un punto sobre la superficie terrestre se define mediante un vector (**F**) cuyas componentes son los ángulos de declinación e inclinación y la intensidad del campo. Denominamos declinación (**D**) al ángulo que forma la componente del vector de campo sobre el plano horizontal con el norte geográfico ( $-180 \leq \mathbf{D} \leq 180$ ), mientras que la inclinación (**I**) es el ángulo vertical que forma el vector de campo con el plano horizontal ( $-90^\circ \leq \mathbf{I} \leq 90^\circ$ ).

La dirección y la magnitud del campo geomagnético cambian con el tiempo. Los cambios con periodos relativamente pequeños constituyen la variación secular geomagnética. Los patrones de variación secular son similares en las regiones subcontinentales, sin embargo, de un continente a otro, los patrones de variación secular son muy diferentes (Butler, 1992).

Una de las aplicaciones del Paleomagnetismo es el Arqueomagnetismo, que se encarga del estudio del comportamiento del campo magnético terrestre registrado en artefactos arqueológicos. Los principales objetivos de los estudios

arqueomagnéticos son la determinación de las variaciones espacio – temporales del campo geomagnético a partir del estudio de artefactos arqueológicos que incluyen hornos, fogones, comales, temazcales, pisos, techos y muros expuestos al fuego. Gracias a estas determinaciones es posible obtener fechamientos de estructuras, artefactos y eventos arqueológicos, determinación de las propiedades magnéticas de los materiales empleados para la elaboración de objetos con el fin de identificar las fuentes de su procedencia, así como la identificación y análisis de objetos que permitan inferir el conocimiento del campo geomagnético adquirido por distintas culturas (Soler-Arechalde, 2014).

Artefactos arqueológicos expuestos al fuego guardan al momento de su última exposición, la dirección e intensidad del campo magnético terrestre presente en ese momento. En este caso, la magnetización adquirida es de tipo termorremanente y es posible obtenerla mediante métodos paleomagnéticos. Los estudios de variación secular nos permiten establecer un marco de referencia temporal y por lo tanto un método de fechamiento utilizando métodos estadísticos (estadística bayesiana por ejemplo) (Soler-Arechalde, 2006).

A través del estudio de artefactos arqueológicos, la arqueología permite comprobar datos históricos y sustentar los datos prehistóricos, logrando así conocer las artes, técnicas y modos de vida de los distintos pueblos y épocas. El constante desarrollo de las ciencias experimentales, así como sus aplicaciones, se ha convertido en una base práctica y metodológica para la ciencia arqueológica (Cervera, 2010).

La datación de los artefactos arqueológicos de acuerdo a su estrato edafológico, a su asociación con restos fósiles de animales, de polen y a su relación con objetos

datables como las cerámicas, son considerados sistemas para establecer una cronología relativa. Sin embargo, las ciencias experimentales permiten obtener cronologías absolutas, siempre y cuando existan las condiciones necesarias. Los métodos de datación absoluta comúnmente utilizados en la arqueología son  $^{14}\text{C}$ , dendrocronología, termoluminiscencia y arqueomagnetismo (Cervera, 2010).

La masa de  $^{14}\text{C}$  contenida en cualquier fósil o material arqueológico orgánico, es decir con presencia de carbono, disminuye a un ritmo exponencial conocido, se sabe que a los  $5730 \pm 30$  años de la muerte de un ser vivo la cantidad de  $^{14}\text{C}$  se ha reducido a la mitad y que a los 57,300 años de su muerte la cantidad de  $^{14}\text{C}$  es tan solo del 0.01% del que tenía cuando estaba vivo. Entonces conociendo la diferencia entre la proporción de  $^{14}\text{C}$  que debería contener un fósil si aún estuviese vivo y la que realmente contiene, se puede conocer la probable fecha de su muerte, la cual en realidad no será una fecha exacta sino un intervalo de tiempo (Cervera, 2010).

Cuando son expuestos al fuego, los minerales magnéticos contenidos en los artefactos arqueológicos alcanzan una temperatura de desbloqueo y posteriormente, cuando comienza el proceso de enfriamiento, el spin del mineral magnético comienza a orientarse en la dirección del campo magnético presente en ese momento, el cual en este caso, es la dirección del Campo Magnético Terrestre (CMT). Entonces si logramos obtener los parámetros de inclinación declinación e intensidad de los minerales magnéticos contenidos en los artefactos arqueológicos y los comparamos con el modelo matemático de curva de variación secular correspondiente a la región de estudio, podremos encontrar el intervalo de tiempo

probable, con un 95% de nivel de confianza, en el que dicho artefacto arqueológico estuvo expuesto al fuego (Soler-Arechalde, 2006).

Ambos métodos de datación anteriormente descritos son reconocidos como métodos de datación absoluta, sin embargo, en el caso de la datación por  $^{14}\text{C}$  el estimado de la edad está basado en la materia orgánica contenida en la muestra, lo que implica parámetros de naturaleza escalar para un “reloj natural”. En cambio, las muestras recolectadas para llevar a cabo una datación arqueomagnética se obtienen “in situ” y se orientan antes de ser extraídas para su estudio, lo que implica parámetros de naturaleza vectorial para un “reloj magnético”. Lo anterior proporciona a la datación arqueomagnética de ciertas ventajas sobre la datación por  $^{14}\text{C}$  (Morales, 2015).

El Arqueomagnetismo es entonces una herramienta importante para la Arqueología, ya que le permite cumplir con su objetivo en el estudio, descripción e interpretación de las civilizaciones antiguas. El arqueomagnetismo es un ejemplo de una actividad científica que conlleva la transversalidad de las ciencias exactas.

Durante el periodo Clásico Mesoamericano, que comprende del año 200 d. C. al 900 d. C, a la par del crecimiento demográfico, se presentaron considerables avances en urbanismo, relaciones sociales y políticas, que interactuaron con las concepciones cosmológicas y legitimación de los centros rectores. En la frontera norte de Mesoamérica se consolidó el proceso de sedentarización y actividad agrícola en la región. A partir del año 200 d.C. se presentó un desarrollo local en un amplio territorio al cual se le ha denominado como *la Tradición del Tunal Grande*, la



cual incluye el noroeste de Guanajuato, el occidente de San Luis Potosí, el sureste de Zacatecas y el noreste de Jalisco (Torreblanca-Padilla, 2015).

La zona arqueológica El Cópore, se localiza en la región cultural del Tunal Grande, en el actual municipio de Ocampo, al noroeste del estado de Guanajuato, sobre las estribaciones de la Sierra de Santa Bárbara y a un costado de la comunidad de San José del Torreón. Durante los trabajos de exploración arqueológica realizados por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) se descubrió la existencia de pisos prehispánicos quemados en algunas áreas de la zona (Torreblanca-Padilla, 2015).

## **1.2. Antecedentes**

Mesoamérica es una región cultural que comprende los territorios centro y sur de México en conjunto con Guatemala, Belice, El Salvador, el oeste de Honduras y Nicaragua. En donde se asentaron diversas culturas prehispánicas como los Olmecas, Toltecas, Teotihuacanos, Zapotecas, Aztecas, Mixtecas y Mayas. En México, la frontera norte de la región cultural comprende los estados de Michoacán, Hidalgo, México y Veracruz.

La cronología de Mesoamérica se encuentra comprendida dentro de tres grandes periodos: el periodo *Preclásico*, que comienza alrededor del año 2000 a.C. y termina alrededor del año 200 d.C.; el periodo *Clásico*, que comienza en el año 200 d.C. y termina en el año 900 d.C.; y el periodo *Posclásico* que comienza en el año 900 d.C. y termina en el año 1521 d.C. Dicha cronología se basa en secuencias

estratigráficas ajustadas mediante cerámica y estilos arquitectónicos, así como dataciones absolutas mediante  $C^{14}$  (Soler-Arechalde, 2006).

En 1965 se hicieron las primeras investigaciones arqueomagnéticas en México (Nagata et al. 1965), las cuales consistieron en la determinación de paleointensidades del campo geomagnético sobre alfarería de Cuiculco en el sur de la Ciudad de México, y en basaltos y rocas piroclásticas del Xitle arrojando un intervalo de edad del 245 al 315 d. C. (Siebe, 2000) (Soler-Arechalde, 2006).

En 1969 Daniel Wolfman tomó muestras para datación arqueomagnética con las cuales reevaluó la cronología de Mesoamérica entre el año 1 y el 1200 d.C. Wolfman se basó en la distribución y orden cronológico de los polos virtuales geomagnéticos por medio de parámetros que incluyen estratigrafía, estilo de cerámica, estilo arquitectónico y apoyándose en dataciones de  $C^{14}$  disponibles, el autor reconoce que son insuficientes para una descripción adecuada de la variación secular del campo geomagnético. Los sitios muestreados por Wolfman fueron en el centro de México: Teotihuacan, Tenango, Huapalco, Tula, Manzanillo, Cerro Zapotecas; en el valle de Oaxaca: Monte Albán, Lambityeco, Tierras Largas, Tomaltepec y Brawbeh; El Zapotal de la Costa del Golfo; en el centro y occidente de Chiapas: Chachi, Mirador, Ocozocoautla y Panteón; en Guatemala: Kaminaljuyú y El Portón; en Honduras Copán y en El Salvador: Tazumal, San Andrés y el Trapiche (Soler-Arechalde, 2006).

Los estudios arqueomagnéticos se incrementaron durante las últimas dos décadas, este desarrollo ha permitido ampliar la gama de artefactos arqueológicos, como lo presenta el estudio de Goguitchaichvili et al. (2004), quien realizó un reconocimiento de cuatro pinturas murales mesoamericanas, a partir del cual la dirección de su magnetización remanente se determinó con éxito. Aparentemente, una mezcla de magnetita y hematita es la responsable de la magnetización. Las pinturas murales mesoamericanas estudiadas mantienen la dirección del campo magnético en el momento en que fueron hechas, por lo cual se logró determinar su datación. Este es considerado un trabajo pionero en la determinación de intensidades arqueomagnéticas de murales mesoamericanos que presentan pigmentación rojiza (Goguitchaichvili, 2018).

En 2015 se realizó un estudio arqueomagnético de piso quemado de la zona arqueológica de Plazuelas, Guanajuato; con el objetivo de determinar la edad de abandono por medio de un método de datación absoluta, alternativo e independiente de los métodos tradicionales. El intervalo de edad probable obtenido en este estudio para la última exposición al fuego del piso analizado (907 al 997 d. C.) fue consistente con las evidencias arqueológicas disponibles para el sitio Plazuelas (Goguitchaichvili, 2018).

Las investigaciones en la zona arqueológica El Cópore, comenzaron en 1962, con las exploraciones realizadas por Beatriz Braniff. En 1962 Braniff realizó reconocimientos y excavaciones arqueológicas tanto en la parte superior del cerro

como en las laderas. A pie del cerro Cópore se reconoció una plataforma manufacturada con barro y piedras, en su cima fueron localizadas numerosas habitaciones distribuidas en los extremos, y al centro, las habitaciones están separadas por dos columnas de piedra con lodo (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

Partiendo de estas investigaciones, comienzan a comprenderse los eventos arqueológicos en la región noroeste de Guanajuato, la parte sureste de Zacatecas y el occidente de San Luis Potosí, una región cultural a la que se denominaría como el Tunal Grande (Braniff 1961a) (Braniff 1961b). Derivado de las exploraciones realizadas por Beatriz Braniff surge una primera clasificación cerámica para El Cópore (Braniff, 1963), la cual es reevaluada años más tarde por ella misma (Braniff, 1972), lo anterior representa un referente regional para la ubicación cronológica del Cópore (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

El indicador diagnóstico del Tunal Grande, es el tipo de cerámica denominado Valle de San Luís, con una decoración rojo y negro sobre un fondo anaranjado, el cual se ha encontrado en el Río San Damián, cerca de San Miguel de Allende, en El Cerrito y Peñón Blanco en Zacatecas, y en Chinampas y El Cuarenta en Jalisco. A partir de la dispersión de este tipo cerámico, se propuso una nueva región denominada Subesfera Valle de San Luís Policromo, la cual integra a los sitios del Cópore y el Cerrito en Guanajuato y Querétaro respectivamente, así como la región de la Sierra de Comanja en León y la región de La Montesa en el sureste zacatecano (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

Partiendo de la primera investigación arqueológica en El Cópore a cargo de Beatriz Braniff en el año 1962, se estableció una clasificación cerámica dividida en dos grupos, los de uso doméstico y los de uso ceremonial. Los criterios de clasificación fueron la decoración, el color y el acabado de las muestras, se consideraron algunos característicos del Cópore y otros tipos de cerámico diagnóstico de otras regiones, obteniendo los siguientes tipos (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013):

- Cópore Bayo
- Cópore Rojo/Bayo
- Cópore Negro/Amarillo
- Cópore Burdo
- Cópore Rojo Bruñido
- Cópore Rojo
- Cópore Gris
- Blanco Levantado
- Valle de San Luís
- San Luís Rojo/Gris Pulido
- Pseudos-Cloisonné
- Plumbate
- Anaranjado Delgado.

Dicha clasificación cerámica permitió comparar al Cópore con el Bajío Guanajuatense y el norte de México. En una primera correlación de tipos cerámicos

se propone una secuencia ocupacional de tres fases para el Cópore, asociadas a los periodos Preclásico, Clásico y Posclásico mesoamericano (Tabla 1.) (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

- Cópore Temprano (500 a.C. – 300 d.C.). Fase definida por la presencia de la cerámica denominada Cópore Gris, la cual se relaciona con la Fase Morales de la zona del Río Laja. Dichas piezas se asocian a un contexto funerario, están compuestas de barro gris y se describen como bruñidas. Se caracterizan por líneas esgrafiadas al interior que forman triángulos o semicírculos (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

- Cópore Medio (300-900 d.C.). Fase definida a partir de la asociación de cerámicas consideradas “locales” con otras como Valle de San Luís, Anaranjado Delgado, Blanco Levantado y Cloisonné. Estas piezas fueron descritas como tipo bicromo de acabado de superficie pulido, pasta fina de color naranja a café claro, con arenas, cuarzo y pirita como desgrasante. El tipo de cerámica Anaranjado Delgado permitió correlacionar al Cópore con Teotihuacán (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

- Cópore Tardío (900-1100 d.C.). Fase representada por la asociación de tipos cerámicos “locales” con los tipos Plomizo o Plumbate y Blanco Levantado que la ubican en el posclásico temprano en Tula (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

Tabla 1. Cronología del Cópore (Braniff 1972).

FASES DEL CÓPORO	CERÁMICA DIAGNÓSTICA	CERÁMICA RECUPERADA EN EL CÓPORO	PERIODOS MESOAMERICANOS
Cópore Temprano (500 a.C. – 300 d.C.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Gris</u></li> <li>• <u>Esgrafiado</u></li> </ul>		Preclásico Tardío (400 a.C. – 200 d.C.)
Cópore Medio (300d.C. – 900 d.C.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blanco levantado</li> <li>• <u>Cloisonné</u></li> <li>• San Luis Policromo</li> <li>• Anaranjado Delgado</li> </ul>		Clásico (200 d.C. – 900 d.C.)
Cópore Tardío (900 d.C. – 1100 d.C.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Blanco levantado</u></li> <li>• Plomizo (Plumbate)</li> </ul>		Posclásico temprano (900 d.C. – 1200 d.C.)

Los trabajos realizados por Braniff en torno al Cópore permitieron señalar una importante presencia mesoamericana en la región de la frontera norte de Mesoamérica, que durante mucho tiempo se consideró habitada solamente por grupos humanos nómadas y ausente de grupos agrícolas (Torreblanca, Alvarez, & Colon, 2013).

Las actividades arqueológicas en el Cópore se reinician en septiembre del 2002, cuando el arqueólogo Armando Nicolau Romero es nombrado coordinador del proyecto arqueológico El Cópore: En el Lugar del Camino Grande. Durante esta etapa se realiza la prospección arqueológica del sitio así como su delimitación y sus respectivos levantamientos topográficos (Nicolau-Romero, 2002). Se determinan

tres espacios arquitectónicos llamados barrios; Cópore, Gotas y Montés (Nicolau-Romero, 2003). Se realizaron reconocimientos arqueológicos en la parte baja del cerro por parte de Rosalba Berúmen, reportándose la existencia de 133 unidades habitacionales (Torreblanca-Padilla, 2015).

En el 2005, el arqueólogo Carlos Alberto Torre Blanca Padilla es comisionado por el INAH Guanajuato como nuevo coordinador del proyecto arqueológico del Cópore, “La Arqueología del Tunal Grande”, el cual contiene tres enfoques: el arqueológico, el ecológico y el social, con la finalidad de construir los acontecimientos del pasado prehispánico en la zona, establecer el escenario natural en el que tuvieron lugar los fenómenos sociales de la época y comprender la relación de la comunidad con su pasado prehispánico y sus tradiciones actuales (Torreblanca-Padilla, 2015).

En coordinación con el laboratorio Beta de Miami Florida, se obtuvieron 18 dataciones radiométricas de carbono 14, las cuales arrojaron un periodo de ocupación entre los años 0 al 900 d.C. (Torreblanca-Padilla, 2015).

### **1.3. Hipótesis y Objetivo**

#### **Hipótesis**

La temporalidad de los asentamientos prehispánicos en la región del Tunal Grande se basa, mayormente, en el análisis de los materiales cerámicos recuperados durante las excavaciones arqueológicas, por lo que es necesario realizar dataciones



absolutas que permitan contribuir a la cronología y secuencia ocupacional de la región, lo cual puede lograrse mediante estudios arqueomagnéticos, siempre y cuando existan las condiciones necesarias para llevarlos a cabo.

Durante los trabajos de exploración arqueológica realizados por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) se descubrió la existencia de pisos prehispánicos quemados en los conjuntos Gotas, Montés y Cópore de la zona arqueológica el Cópore (Padilla, 2018). Los cuales cumplen con las condiciones necesarias para realizar un estudio arqueomagnético.

## **Objetivo**

En este trabajo, se pretende contribuir a la cronología absoluta y secuencia ocupacional del Tunal Grande durante la época prehispánica, mediante un estudio arqueomagnético de los pisos quemados ubicados en la zona arqueológica El Cópore.

### **1.4. Objetivos específicos:**

- Medir la susceptibilidad magnética en función de temperatura en los pisos prehispánicos quemados de la zona de estudio.
- Identificar los minerales magnéticos contenidos en los pisos prehispánicos quemados de la zona de estudio.

- Determinar las arqueodirecciones de los pisos prehispánicos quemados de la zona de estudio.
- Determinar los intervalos más probables de ocupación del sitio mediante el modelo geomagnético SHA.DIF14K.
- Proporcionar un ejemplo de la transversalidad de las ciencias exactas, en este caso la Física y las Matemáticas, respondiendo a necesidades de las ciencias sociales y humanas.

# CAPÍTULO II.

## EL CÓPORO

### 2.1. Introducción

El Cóporo es una zona arqueológica localizada en el actual municipio de Ocampo, al noroeste del estado de Guanajuato, sobre la Sierra de Santa Bárbara, a un costado de la comunidad de San José del Torreón. Los vestigios del asentamiento están concentrados en un área mayor a 2 hectáreas, por lo que se creó, que El Cóporo pudo haber albergado a una población de dos mil habitantes dedicados a la agricultura, debido a que los campos de cultivo se localizaban en las márgenes del río Ibarra (Torreblanca-Padilla, 2015).

En la arquitectura del asentamiento se identifican tierra y mampostería, con los cuales se erigieron estructuras piramidales, montículos con planta en “L”, galerías con columnas, cuerpos exteriores con agregados, plataformas con patios internos, complejos de terrazas, probable juego de pelota, cuartos y caminos empedrados de acceso a la parte alta, así como áreas de murallas albarradas. De acuerdo a estos elementos arquitectónicos, así como su localización en la parte alta del cerro, se propone su vinculación con la Tradición de los Teúles, los cuales se asentaron sobre el cerro del Teúl en la región sureña del actual estado de Zacatecas (Torreblanca-Padilla, 2015).

Para la nomenclatura del sitio, se decidió emplear el concepto de conjunto, definiendo así: El conjunto Cópore sobre la cima del cerro Cópore, los conjuntos Montés y Gotas distribuidos sobre la ladera del mismo, se agregaron los conjuntos Llano, que incluye las unidades habitacionales, áreas de actividades y yacimientos dispersos sobre la parte llana o baja, el conjunto Puerto del Aire, que se encuentra en el ascenso al conjunto Caracol, el cual corresponde a un amplio espacio con terrazas, unidades habitacionales, plataformas y albarradas, y finalmente el conjunto Pilar compuesto por una plaza en la cima del cerro Pilar (fig. 1).

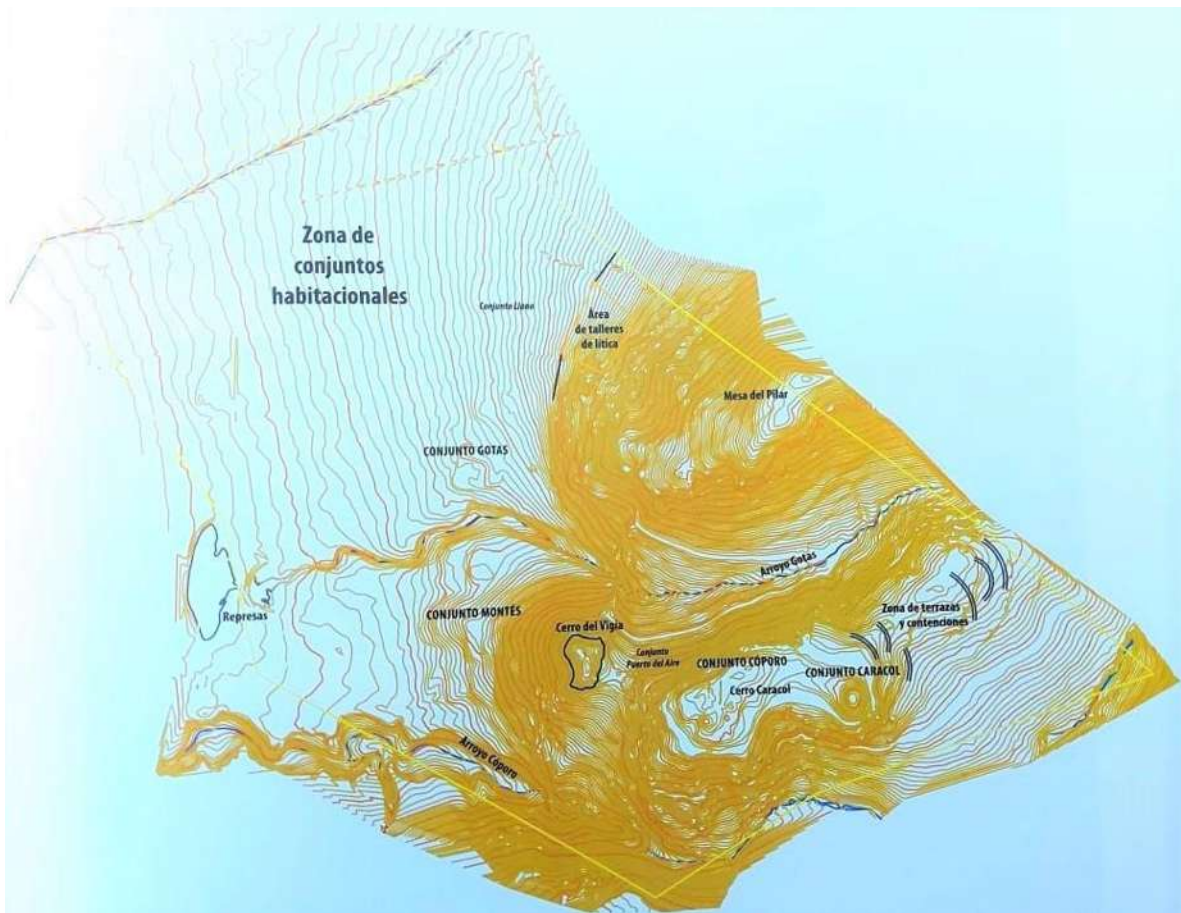


Figura 1. Distribución de conjuntos arquitectónicos (Torreblanca-Padilla, 2015).

Mediante recorridos por el Valle de Ocampo se reconocieron 28 asentamientos además del Cópore, todos contemporáneos. Se revisaron, a nivel regional, asentamientos prehispánicos en el sureste de Zacatecas, occidente de San Luis Potosí, oriente de Jalisco y noroeste de Guanajuato. Lo anterior permitió replantear el concepto regional establecido por la Dra. Braniff en torno al Tunal Grande. Hasta el momento, la información obtenida acerca de los vestigios, tanto arquitectónicos como fragmentos de objetos manufacturados en distintas materias primas, indica que en su mayoría, corresponden a la última etapa de ocupación, es decir, al periodo Epiclásico (600 - 900 d.C) (Torreblanca-Padilla, 2015).

## **2.2. El inicio Mesoamericano: las sociedades agrícolas complejas en el noroeste de Guanajuato (650 a.C a 200 d.C.)**

En el centro-norte de México, sobre la parte sur de Guanajuato se localizó el centro rector de Chupícuaro el cual influyó con su estilo cerámico en el centro, norte y occidente de Mesoamérica. Esta tradición cultural inició en el año 650 a.C. y desapareció en el año 200 d.C. (Florence, 2000). Se trata de un pueblo con un gran desarrollo alfarero, complejos sistemas funerarios, viviendas de construcción sencilla, basamentos piramidales de forma circular u ovalada y plazas cerradas (Darras, 2007).

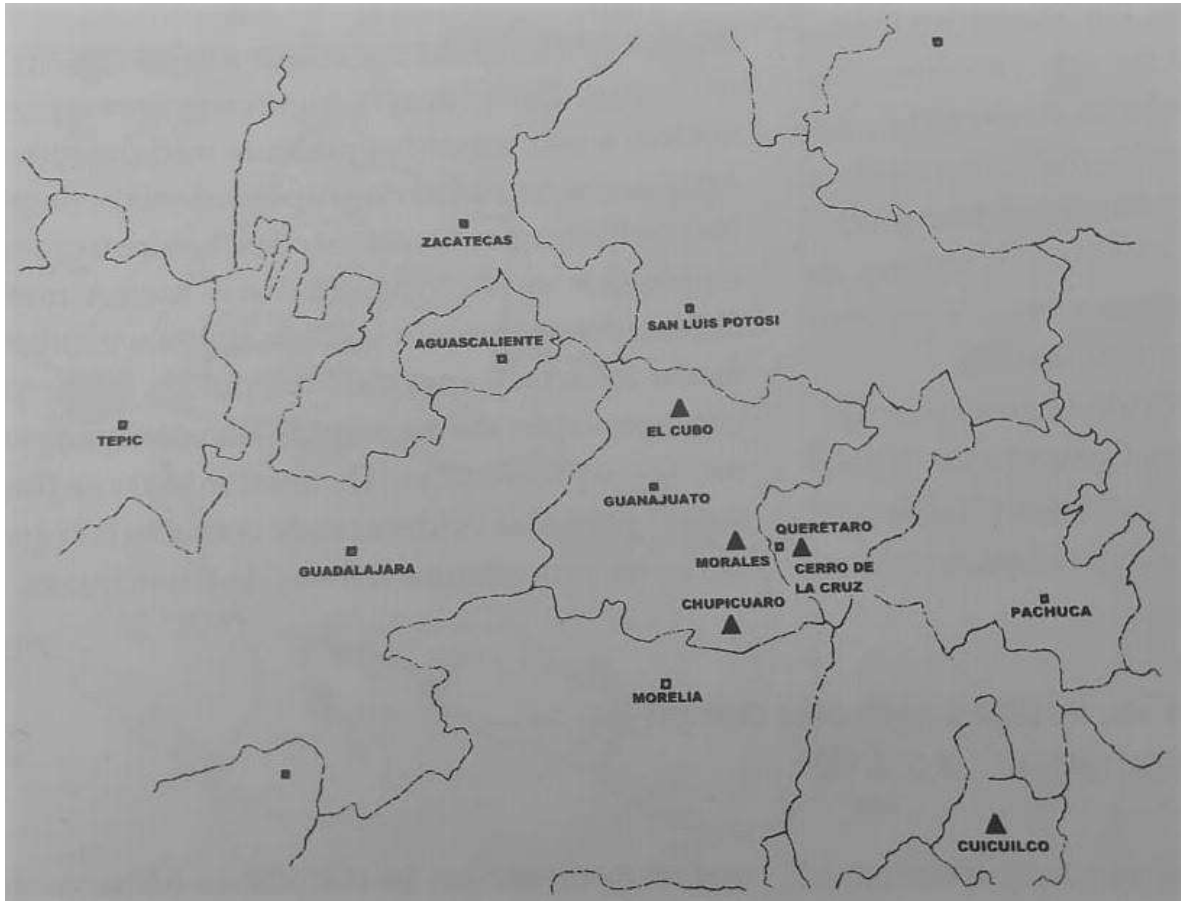


Figura 2. Región de la cultura Chupícuaro y asentamientos tempranos en la región (Torreblanca-Padilla, 2015).

En la actual población de Comonfort en el Estado de Guanajuato, se localizaron materiales arqueológicos afines a los de Chupícuaro, en un rancho llamado Morales, por lo cual se denominó tradición Morales, para la cual se estableció su periodo de ocupación entre los años 300 a.C. y 100 d.C. (Braniff, 1998). La tradición Morales es considerada afín a Chupícuaro pero con desarrollo propio, representando de esta manera la expansión de los grupos agrícolas sobre la porción central del río Laja. Lo anterior coincide con la fase Mixtlán, que corresponde al movimiento de grupos de Chupícuaro hacia el Bajío (fig. 2) (Torreblanca-Padilla, 2015).

En el año 500 a.C. se observan las primeras manifestaciones de asentamientos agrícolas mesoamericanos en la Sierra del Cubo, localizada en el municipio de San Felipe en el Estado de Guanajuato. En base a materiales afines a la tradición Morales, los reconocimientos arqueológicos señalan al sitio de El Cubo como uno de los más tempranos (Braniff, 1975). Sobre esta misma sierra se localiza otro asentamiento temprano denominado Cueva de Indios, donde se localizaron manifestaciones rupestres, un entierro de un adulto en posición fetal y tiestos tipo Chupícuaru correspondientes al periodo formativo (500 a.C. al 200 a.C.) (Crespo et al., 1999). Vestigios correspondientes también a asentamientos de este periodo se encuentran en el Barrio de San Miguel, en la ciudad de León, Guanajuato (fig. 3) (Torreblanca-Padilla, 2015).

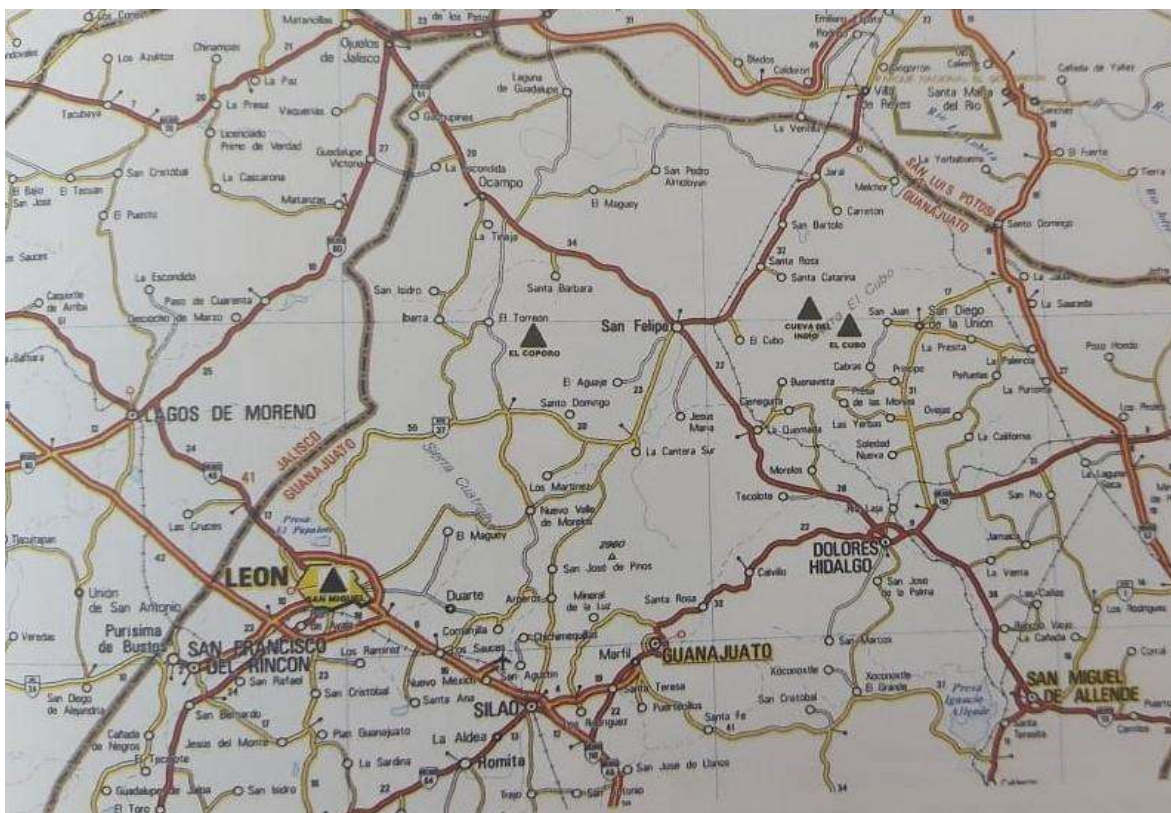


Figura 3. Asentamientos tempranos en el norte de Guanajuato (Torreblanca-Padilla, 2015).

La colonización de grupos agrícolas sureños hacia el norte de Guanajuato fue impulsada por la necesidad de nuevas tierras para el desarrollo de la agricultura, debido a la demanda provocada por el crecimiento demográfico poblacional. De esta forma, es como comienzan a generarse las condiciones socioculturales, que más adelante se expandirán y serán conocidas como la cultura del Tunal Grande, en el noroeste del estado de Guanajuato (Torreblanca-Padilla, 2015).

### **2.3. Surge El Cópore en el Valle de Ocampo (0 al 200 d.C.)**

En los inicios de la era cristiana, es decir, del año 0 al 200 d. C. el Valle de Ocampo comenzó a poblarse por grupos de familia nuclear de carácter aldeano dedicados a la agricultura, asentándose sobre tierras fértiles cercanas a fuentes de agua. En este primer momento El Cópore es una aldea más dentro del mismo Valle, aunque comienza a configurarse como el centro rector. Posteriormente, debido al aumento poblacional surge la necesidad de mayores áreas de cultivo y suministros de agua, de lo cual se deriva una estratificación social con un gobernante, personal administrativo, artesanos, campesinos y comerciantes; con sus respectivas áreas de actividades: campos de cultivo, zonas poblacionales, bosques para la caza y recolección de plantas así como el uso y control del agua, es entonces cuando El Cópore se establece como centro rector (Torreblanca-Padilla, 2015).

Debido al impulso de centros de poder como Chupícuaro y su extensión en la región norte de Guanajuato, con la denominada tradición Morales, se detecta una etapa



temprana para El Cópore en el Preclásico final mesoamericano (500 a. C. – 300 d. C.) (Torreblanca-Padilla, 2015).

Muestras de carbón correspondientes al conjunto Cópore, donde también se encontraron vasijas de color gris, similares al tipo Morales y otra con decoración al negativo, fueron sometidas a análisis radiométricos, obteniendo fechas de ocupación que oscilan entre los años 70 d.C. al 140 d.C. Lo anterior evidencia la expansión de grupos sureños sobre esta región de Ocampo (Torreblanca-Padilla, 2015).

#### **2.4. El Clásico mesoamericano: la interacción con Teotihuacán, la región del Tunal Grande y El Cópore (200 d.C. al 600 d.C.)**

Durante el periodo Clásico en Mesoamérica, en la frontera norte se consolida el proceso de sedentarización y actividad agrícola en la región. A partir del año 200 d.C. se presenta un desarrollo local en un amplio territorio, al cual se le ha denominado como: la Tradición del Tunal Grande (Braniff, 1961), la cual se extiende por los valles del noroeste de Guanajuato, el río Laja, que atraviesa los municipios de San Felipe y Dolores, y el valle del río Grande de Ibarra en el municipio de Ocampo. En el occidente de San Luis Potosí es ocupado el valle de Villa de Reyes y Bledos, en el municipio de Villa de Reyes. También es incluida la amplia llanura del sureste de Zacatecas en el municipio de Pinos y finalmente, la llanura de Ojuelos, en el municipio del mismo nombre en el estado de Jalisco (Torreblanca-Padilla, 2015).

Sobre la región del Tunal Grande se comparten características culturales, entre las cuales se encuentra el patrón de asentamiento: los sitios se establecen sobre cerros y lomeríos bajos. En la parte alta del cerro se encuentran las zonas ceremoniales, sobre las laderas y partes bajas se encuentran las zonas habitacionales y productivas, y finalmente las planicies de los valles se utilizan para la agricultura. Los asentamientos se encuentran cercanos a los ríos, arroyos y manantiales de la región (Torreblanca-Padilla, 2015).

Las características de construcción en la región del Tunal Grande emplea tierras aptas para conformar adobes, morteros, aplanados y techos; rocas riolíticas para las cimentaciones, muros y acabados; ignimbritas para los escalones, tecuiles y almenas; mientras que las vigas y puntales estaban hechos de madera de pino de la Sierra; finalmente utilizaban pastizal mezclado con tierra y baba de nopal para pegar los adobes y rocas (Torreblanca-Padilla, 2015).

Respecto a los trabajos de alfarería de la región del Tunal Grande, durante la etapa conocida como fase San Juan (200 d.C. al 600 d.C.), desarrollaron una decoración cerámica cuyo patrón común era el color bayo y rojo, combinaciones de rojo sobre bayo o blanco sobre rojo, sobresaliendo el tipo conocido arqueológicamente como San Juan Policromo. Este tipo decorativo en la cerámica predominó en el Cópore (Torreblanca-Padilla, 2015).

El periodo Clásico mesoamericano fue caracterizado por la hegemonía teotihuacana, entre los años 250 d.C. y 650 d.C., en el centro-norte de México. Sobre los cimientos del basamento del Cópore se han recuperado materiales arqueológicos, correspondientes a este periodo de ocupación, que muestran que la

región retoma ideas e imágenes del estilo artístico teotihuacano. Un ejemplo de lo anterior, es la conocida decoración al *cloisonné*, presente en la decoración de la cerámica del Cópore, debido a que esta técnica es similar a la conocida como *al fresco*, recurrente en la decoración de los murales y cerámicas de Teotihuacán (fig. 4) (Torreblanca-Padilla, 2015).



Figura 4. Cerámica con decoración al *cloisonné* recuperada en El Cópore (Torreblanca-Padilla, 2015) .

Respecto a los estilos arquitectónicos, se aprecian similitudes al diseño teotihuacano en la distribución de los espacios en las áreas de vivienda, el vestíbulo previo a la habitación principal como el que se localiza en el conjunto Cópore y la denominada *almena*, que coronaba la parte más alta de los edificios principales (fig.5 y fig. 6) (Torreblanca-Padilla, 2015).



*Figura 5. Espacios con vestíbulo en el ingreso a la habitación principal; localizados en la cima del cerro Cóporo.*



*Figura 6. Distintas almenas que coronaban la parte alta de los edificios principales.*

La información recabada en el Cópore señala que sus ocupantes retomaron algunos rasgos teotihuacanos para incluirlos en los discursos simbólicos y de poder, quizá existió el intercambio de productos, pero conformaron una identidad propia (Torreblanca-Padilla, 2015).

## **2.5. El Epiclásico: la hegemonía de El Cópore y consolidación de una identidad en el valle de Ocampo (600 d.C. al 900 d.C.)**

Tras la caída y desaparición de la gran ciudad de Teotihuacán en el año 600 d.C. inicia una desintegración de redes comerciales y surge una nueva conformación territorial derivando en nuevos centros rectores regionales. Durante esta etapa el Tunal Grande consolida su máxima extensión regional, creándose un centro de poder en cada valle. En el estado de Guanajuato, El Cópore se convierte en la capital del valle de Ocampo y Peñuelas, controla la parte alta del río Laja, entre los municipios de San Felipe y Dolores. En San Luis Potosí, Electra Manuela es el centro rector en el valle de Villa de Reyes y El Cerrito controla el valle Arriaga y Bledos; en Zacatecas, el sitio de Santa Elena ejerce su poder en el municipio de Pinos, extendiéndose hasta los llanos del municipio de Ojuelos en Jalisco (fig. 7) (Torreblanca-Padilla, 2015).



Figura 7. Centros de poder en la región del Tunal Grande durante el Epiclásico.

La cerámica característica de este periodo en el Tunal Grande, es la denominada Valle de San Luis, con decoración en rojo y negro sobre un fondo anaranjado y la conocida como Electra Policromo, con decoración en negro y blanco sobre fondo rojo (fig. 8 y fig. 9).



*Figura 8. Cerámica Valle de San Luis, característica del Tunal Grande en el periodo 600 al 900 d.C.*



*Figura 9. Cerámica tipo Electra policromo del Cópore.*

Dentro de los rasgos culturales compartidos entre los asentamientos en el Tunal Grande se encuentran los compartidos entre el Cópore y Electra Manuela, los cuales consisten en pisos de barro pintados en color ocre o quemados para endurecerse; las paredes decoradas en colores rojo, amarillo y verde; muros a manera de celosías elaborados con pequeños adobes en color ocre; techos planos elaborados con ramas y zacate; y hogares en lodo quemado sobre el piso de la habitación (Torreblanca-Padilla, 2015).

Durante este periodo, se abandona la imitación teotihuacana para crear una identidad propia en los utensilios domésticos, las vasijas comunes fueron decoradas en negro y rojo sobre anaranjado, conocido como cerámica tipo Valle de San Luis Policromo. Las figuras zoomorfas se presentan en las decoraciones de las piezas sobresaliendo las aves y los cuadrúpedos. La identidad regional se encuentra en la producción de nuevos tipos de figurillas en barro como las policromas y monocromas. La talla de piedra incluye diseños arquitectónicos en almenas o bloques para escalones, marcos de escalinatas o pilastras elaborados en cantera. Finalmente sobresale una tradición lapidaria ampliamente distribuida por la región, en El Cópore existen piezas representativas de ranas y diseños geométricos (fig. 10, fig. 11 y fig. 12) (Torreblanca-Padilla, 2015).



*Figura 10. Figurilla con decoración policroma.*





*Figura 11. Figurilla con decoración monocroma.*



*Figura 12. Lapidaria del Cópore en forma de rana.*

## **2.6. El abandono y la presencia Tolteca en el noroeste de Guanajuato (900 d.C. al 1000 d.C.); el despoblamiento (1000 d.C. al 1300 d.C.)**

Hasta la fecha, indicadores arqueológicos sugieren un abandono paulatino de El Cópore para el año 900 d.C., con el retorno al centro de México, por parte de algunos grupos. Algunas investigaciones señalan un periodo de reocupación entre los años 900 d.C. y 950 d.C. por parte de los Toltecas, en sitios como, Electra Manuela, Carabino y El Cópore, manifestando una ruptura con los grupos originales (Torreblanca-Padilla, 2015).

Para el año 1000 d.C. la región del Tunal Grande o frontera septentrional de Mesoamérica está completamente deshabitada de grupos agrícolas mesoamericanos. Los pocos asentamientos con información arqueológica para esta época presentan huellas de incendio. El Cópore, el valle del Río Grande de Ibarra y los valles circunvecinos, presentan una etapa de despoblamiento de la región en el periodo del año 1000 d.C. al 1300 d.C. En ese momento, la región es reocupada por los antiguos pobladores nómadas y su posterior transformación en la región Chichimeca. Para la época de la Conquista española, El Cópore se encuentra desocupado y cubierto por una vegetación espinosa, lo que impide su colonización (Torreblanca-Padilla, 2015).

# CAPÍTULO III.

## MARCO TEÓRICO

### 3.1. Introducción

Los fenómenos magnéticos han llamado la atención del ser humano a lo largo del tiempo, todos sentimos curiosidad alguna vez al observar materiales atraídos por los imanes. Tales de Mileto fue uno de los científicos pioneros en interesarse por este tipo de fenómenos, en el siglo VI a.C. describió la atracción que una barra de ámbar, previamente frotada por una piel de gato, producía sobre pequeños objetos (Soler-Arechalde, 2006).

La brújula, es uno de los inventos que definitivamente será recordado en la historia de la humanidad, pues permitió el desarrollo de la navegación y descubrimiento de nuevas tierras, su invención es oficialmente atribuida a los chinos durante el siglo XII, sin embargo, se han descubierto artefactos dentro de las culturas mesoamericanas que sugieren el descubrimiento y utilización de la brújula por dichas culturas desde antes del año 1000 a.C. (Soler-Arechalde, 2006).

Durante mucho tiempo se pensó que el magnetismo que afectaba a la brújula era provocado por la estrella polar. Fue hasta el año 1546 que G. Mercator dedujo que los polos del campo magnético se encontraban en la Tierra, lo anterior permitió en el año 1600, a W. Gilberts, concluir que el campo magnético de la Tierra funcionaba

al igual que un imán de barra y que por lo tanto la inclinación dependía de la latitud geográfica. Dicha variación en la inclinación pudo corroborarse con mediciones realizadas en diversas partes del mundo, el Barón Von Humbolt realizó las correspondientes en México, así como en el centro y sur de América (Soler-Arechalde, 2006).

### **3.2. El campo magnético terrestre (CMT)**

Albert Einstein consideraba que uno de los cinco problemas sin resolver más importantes dentro de la Física es justamente la comprensión del origen del campo magnético terrestre (CMT). Entre los objetivos de la Geofísica se encuentra el explicar la dinámica y estructura del interior de la Tierra, lo cual incluye dar solución al problema antes mencionado.

Hoy en día consideramos al CMT predominantemente dipolar sobre la superficie terrestre, presenta un eje dipolar muy cercano al eje de rotación, el cual muestra variación secular, excursiones ocasionales e incluso inversiones. Dichas características del CMT se explican a través del modelo del Dinamo, el cual describe un campo magnético continuamente generado por el movimiento de torsión y cizallamiento de los fluidos contenidos en el núcleo externo de la Tierra, el cual es eléctricamente conductor (Gary A. Glatzmaier, 1995).

En la actualidad se sabe que para explicar la estructura y evolución del CMT es necesario un modelo tridimensional no lineal de la magnetohidrodinámica del núcleo

terrestre. Existen trabajos que presentan un modelo tridimensional autosustentable del campo magnético terrestre, como el que se describe a continuación (Gary A. Glatzmaier, 1995):

El modelo numérico resuelve las ecuaciones magnetohidrodinámicas no lineales que dominan la evolución y estructura tridimensional de un fluido eléctricamente conductor sometido a convección térmica dentro de una esfera que rota a gran velocidad, es decir, el modelo del núcleo externo (líquido) de la Tierra. Un flujo de calor específico sobre el perímetro del núcleo interno genera convección térmica en el núcleo (líquido) externo. Dicha convección influenciada por el movimiento de rotación, gira y cizalla el campo magnético generando un nuevo campo que reemplaza a aquel que se difunde. El campo se difunde en el núcleo interno sólido, eléctricamente conductor, que proporciona un par magnético entre el núcleo interno y el externo, así como un par magnético entre el núcleo externo y una capa delgada del límite perimetral del manto (fig. 13) (Gary A. Glatzmaier, 1995).

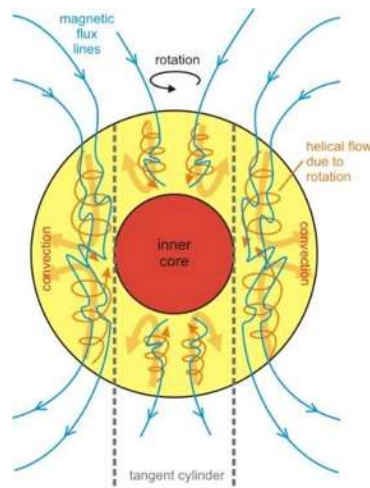


Figura 13. Líneas de campo provocadas por la convección térmica influenciada por el movimiento de rotación de la Tierra (Q&S, 2017).

### 3.3. Paleomagnetismo y Arqueomagnetismo

El **paleomagnetismo** es una rama de la geofísica que se encarga de estudiar el comportamiento del antiguo campo magnético terrestre registrado en las rocas al momento de su formación. También analiza procesos geológicos relevantes ocurridos durante o con posterioridad (como el metamorfismo de una roca) (Butler, 1992).

Dentro del paleomagnetismo, el **arqueomagnetismo** se encarga del estudio de artefactos arqueológicos que incluyen hornos, fogones, comales, temazcales, pisos, techos y muros expuestos al fuego, los cuales tienen la capacidad de registrar la dirección e intensidad del CMT presente al momento de su última exposición al fuego, lo cual nos permite obtener fechamientos absolutos de dichos artefactos (Soler-Arechalde, 2006) .

### 3.4. Fundamentos del paleomagnetismo

Un concepto central en el Paleomagnetismo es el modelo del Dipolo Geocéntrico Axial, en el cual se considera al CMT producido por un dipolo ubicado en el centro de la Tierra y alineado con el eje de rotación (fig. 14) (Butler, 1992).

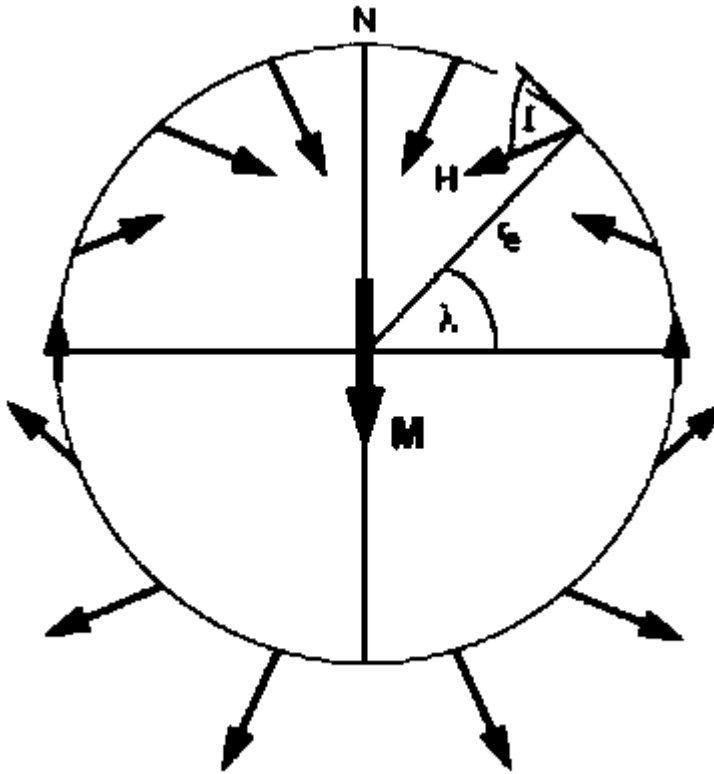


Figura 14. Modelo del dipolo geocéntrico axial,  $\lambda$  latitud geográfica;  $r_e$  radio medio terrestre,  $M$  dipolo magnético;  $I$  inclinación;  $N$  norte geográfico (Butler, 1992).

Entonces, para cualquier punto sobre la superficie terrestre la latitud geomagnética es igual a la geográfica. Si  $M$  es el momento magnético del dipolo y  $r_e$  es el radio terrestre,  $H$  la componente horizontal y  $Z$  la componente vertical del campo a la latitud  $\lambda$ , entonces:

$$H_h = \frac{M \cos \lambda}{r_e^3}, H_v = \frac{2M \sin \lambda}{r_e^3} \quad (1)$$

El campo total  $H$ :

$$H = (H_h^2 + H_v^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{M}{r_e^3} (1 + 3 \sin^2 \lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Y la tangente de la inclinación magnética es:

$$\tan I = \frac{H_v}{H_h} = \left( \frac{2 \operatorname{sen} \lambda}{\cos \lambda} \right) = 2 \tan \lambda \quad (3)$$

Donde  $I$  es la inclinación en el punto de medida y  $\lambda$  es la latitud geográfica (Butler, 1992).

El campo magnético terrestre en un punto de la superficie es un vector ( $F$ ) que puede determinarse mediante los ángulos de declinación e inclinación así como su intensidad. La declinación ( $D$ ) es el ángulo formado entre la componente horizontal del vector y el norte geográfico, la inclinación ( $I$ ) es el ángulo que forma el vector con el plano horizontal ( $-90^\circ \leq I \leq 90^\circ$ ). La intensidad normalmente se mide en Teslas (fig. 15) (Soler-Arechalde, 2006).

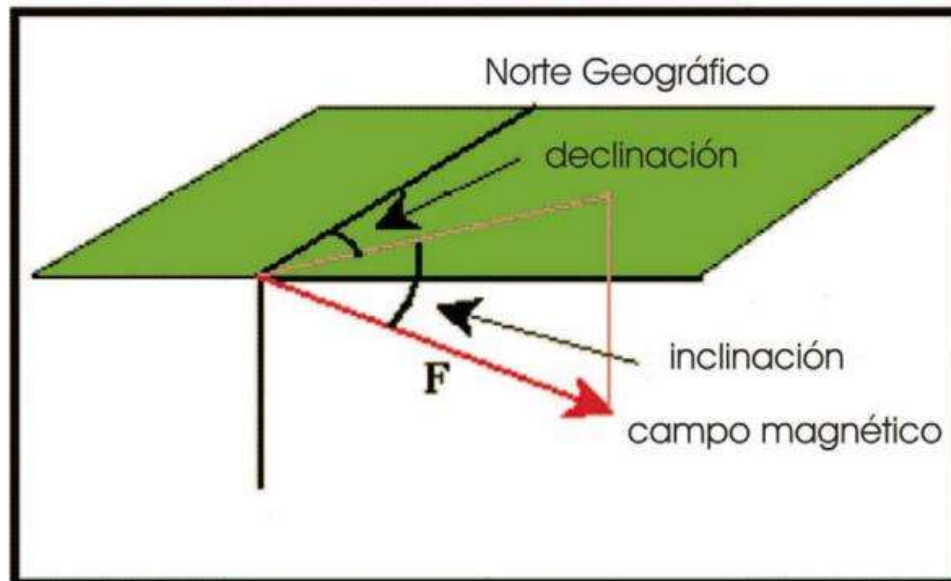


Figura 15. Esquema de ángulos que definen el campo magnético terrestre en un punto sobre la superficie (Soler-Arechalde, 2006).



### 3.5. Variación secular geomagnética

La dirección e intensidad del campo geomagnético varía con el paso del tiempo, a estos cambios que presentan una periodicidad de entre 1 y 100,000 años, se le denomina **variación secular**. Los patrones de variación secular son similares sobre regiones subcontinentales, es decir, los patrones observados en París son similares a los observados en Londres. Sin embargo, los patrones de variación secular son muy distintos entre un continente y otro (Butler, 1992).

La figura 16 muestra el registro histórico de la variación en la dirección del campo geomagnético en Greenwich, Inglaterra. A partir de registros confiables desde el año 1600 d.C. El rango de inclinación es de  $65^\circ$  a  $75^\circ$ , y el rango de declinación va de  $-25^\circ$  a  $+10^\circ$  (Butler, 1992).

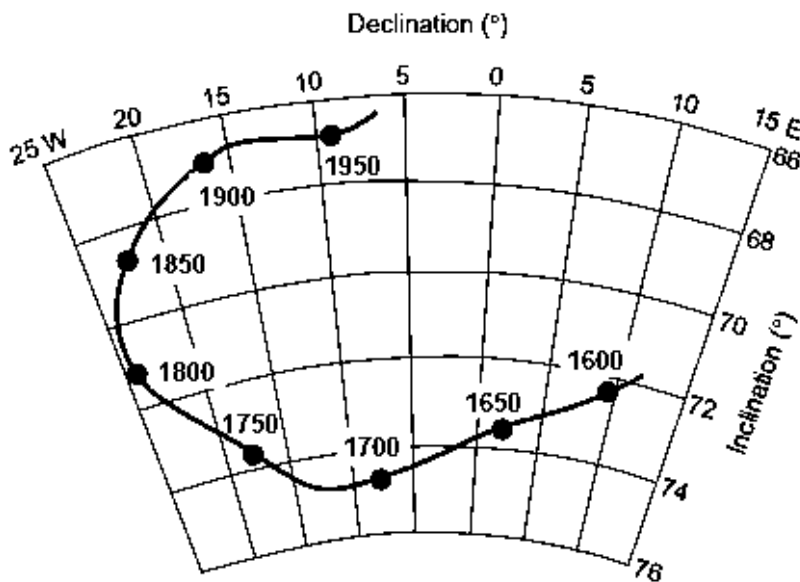


Figura 16. Registro histórico de la variación en la dirección del campo geomagnético en Greenwich, Inglaterra (Butler, 1992).

## **3.6 Conceptos básicos del método paleomagnético**

### **3.6.1. La susceptibilidad magnética**

Definimos a la susceptibilidad magnética como la capacidad que tiene un material de magnetizarse en la presencia de un campo magnético. Es observable a nivel atómico y se asocia al espín del electrón y a su movimiento alrededor del núcleo (Soler-Arechalde, 2006). Los materiales pueden clasificarse de acuerdo a su comportamiento frente a un campo magnético en materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y antiferromagnéticos.

Los materiales paramagnéticos se caracterizan por presentar una susceptibilidad magnética positiva, pero pequeña; la cual disminuye con la temperatura y proviene de la existencia de dipolos magnéticos permanentes capaces de orientarse bajo la influencia de un campo externo. A temperaturas ordinarias las vibraciones térmicas en el sólido aseguran una orientación al azar de los dipolos, por lo que la magnetización media es cero; sin embargo, mientras mayor sea el campo magnético aplicado, mayor será el momento magnético neto por unidad de volumen. (Soler-Arechalde, 2006).

El diamagnetismo surge de los momentos magnéticos negativos inducidos en todos los materiales por aplicación de un campo magnético externo, presenta una susceptibilidad negativa independiente de la temperatura. El momento diamagnético inducido es el mismo cualquiera que sea la orientación de la órbita con respecto al campo, es decir, las vibraciones térmicas no afectan a las susceptibilidades diamagnéticas (Soler-Arechalde, 2006).

El efecto magnético que se observa con mayor facilidad es el ferromagnetismo y debe el nombre a su presencia en ciertos compuestos del hierro. Esta caracterizado por una susceptibilidad magnética positiva y grande. El valor de la susceptibilidad magnética depende del campo aplicado y también de la historia previa de la muestra. En la mayoría de los casos una muestra ferromagnética puede retener su magnetización aun en ausencia de un campo externo, esto debido a que la sustancia presenta una gran tendencia a desdoblarse en dominios (regiones en las que todos los dipolos están alineados) cada uno con una dirección de magnetización distinta, de tal forma que macroscópicamente resulta una magnetización cero. Lo anterior es el sustento de los imanes permanentes. Los materiales ferromagnéticos presentan interacciones tan fuertes entre espines que les hacen alinearse paralelamente unos a otros (Soler-Arechalde, 2006).

En los materiales antiferromagnéticos unos espines son paralelos a la alineación del campo y otros en dirección contraria a la aplicación del mismo, donde del acoplamiento entre unos y otros momentos magnéticos resulta una magnetización nula. En estas sustancias la susceptibilidad magnética es relativamente baja a temperaturas por debajo del punto de Curie y aumenta conforme se acerca al punto de Curie del material en cuestión. La hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), los óxidos de manganeso, de hierro, cobalto y níquel presentan este comportamiento antiferromagnético.

Los materiales ferrimagnéticos cuentan con dos subredes de iones metálicos con momentos magnéticos orientados antiparalelamente, pero de distinta magnitud, lo que da lugar a un momento resultante distinto de cero, incluso en ausencia de un

campo externo. La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) es el mineral ferrimagnético más importante en contribuir al magnetismo de las rocas (fig. 17) (Soler-Arechalde, 2006).

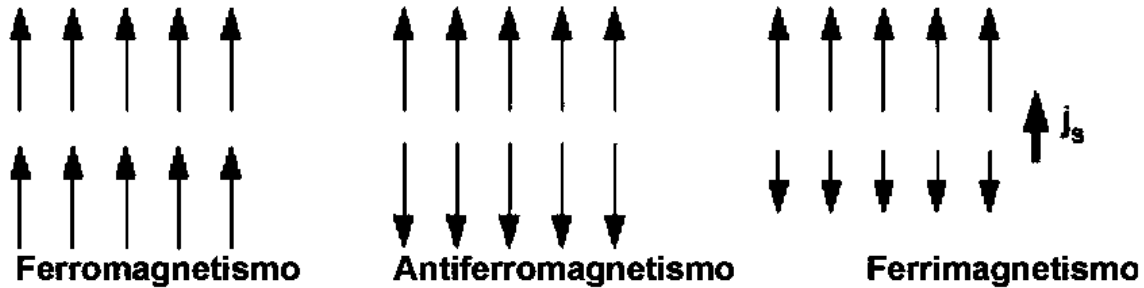


Figura 17. Acoplamiento de los espines de los electrones de acuerdo con el tipo de respuesta del material al campo magnético (Soler-Arechalde, 2006).

### 3.6.2. Magnetización

Los fenómenos magnéticos se deben a la presencia de dipolos magnéticos atómicos en los materiales. Estos dipolos magnéticos son el resultado del movimiento de los electrones en las órbitas atómicas y de los momentos magnéticos de los núcleos atómicos (Soler-Arechalde, 2006).

El efecto de un campo exterior tiende a alinear los dipolos magnéticos del material en la dirección del campo. Se puede caracterizar el grado de alineación por el momento magnético total por unidad de volumen del material, siendo este la suma vectorial de los momentos individuales. A esta magnitud se le denomina magnitud  $M$  del material (grado de alineación de los dipolos magnéticos) y sus unidades son amperes por metro ( $\text{A/m}$ ) (Soler-Arechalde, 2006).

### 3.6.3. Dominios magnéticos

Los materiales ferromagnéticos están constituidos por zonas locales o dominios dentro de los cuales existe un ordenamiento perfecto de los momentos magnéticos atómicos, es decir, es la región del cristal en la cual la magnetización es uniforme y equivalente a la magnetización de saturación ( $M_s$ ). Existen tres tipos de dominio (Dunlop, 1995):

- Dominio sencillo (DS): contiene un solo dominio, los cambios en la magnetización ocurren por la rotación simultánea de los espines atómicos.
- Dominio pseudo-sencillo (DPS): se caracteriza por una magnetización que no es uniforme debido a que ocurre en granos más grandes que los de dominio sencillo; presenta alta remanencia de saturación y alta fuerza de coercitividad como el dominio sencillo.
- Dominio múltiple (MD): contiene más de un dominio, los cambios de magnetización ocurren por el movimiento de las paredes o por la formación o deformación de dominios.

Las zonas de transición o discontinuidad entre los dominios magnéticos vecinos se denominan paredes de Bloch. A través de estas paredes la dirección de los espines de los electrones no apareados cambia continuamente (Tarling, 1983). (fig. 18).

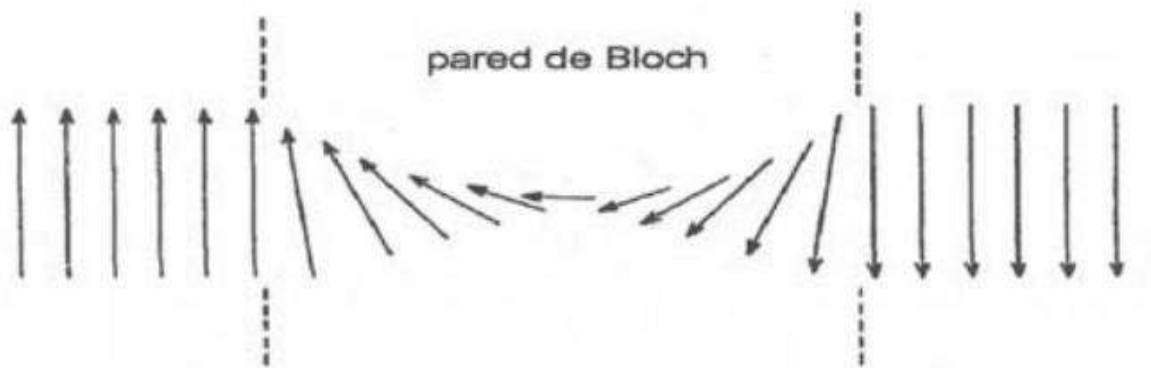


Figura 18. Comportamiento de los momentos magnéticos en la transición de un dominio a otro, a través de la pared de Bloch (Tarling, 1983).

#### 3.6.4. Tipos de magnetización remanente

- Magnetización Anhisterética (ARM): Si existe un campo magnético al momento en que una muestra está siendo desmagnetizada por campos alternos, ciertas partículas serán magnetizadas en una dirección preferencial dada.
- Magnetización remanente detrítica (DRM): es la magnetización adquirida durante la deposición y litificación de las rocas sedimentarias. En la mayoría de los ambientes sedimentarios, el mineral magnético dominante es la magnetita o titano-magnetita pobre en titanio.
- Magnetización remanente química (CRM): es una magnetización posterior a la deposición, debida a la formación de un nuevo mineral con otras características magnéticas.
- Magnetización termorremanente (TRM): se adquiere cuando los minerales magnéticos se enfrían después de haber sido expuestos a temperaturas mayores a las de Curie o Neel, en presencia de un campo magnético.

- Magnetización remanente viscosa (VRM): la magnetización se adquiere de manera gradual, durante un largo periodo de tiempo, cuando los materiales están expuestos a campos magnéticos externos.
- Magnetización remanente natural (NRM): es la suma de la magnetización primaria (la adquirida al momento de la formación), las secundarias y la inducida.

### **3.6.5. Temperatura de Curie**

La temperatura de Curie ( $T_c$ ) es la temperatura a la cual un material pierde la capacidad de retener el magnetismo, es decir, cambia de una condición ferro o ferrimagnética a una paramagnética. Por debajo de dicha temperatura los átomos interactúan de manera que sus momentos magnéticos se acoplan y actúan en forma colectiva en la dirección del campo magnético aplicado. La temperatura de Curie para la mayoría de las rocas es menor a los 600 °C y el punto análogo para los materiales antiferromagnéticos (hematita por ejemplo) es el punto de Néel (Néel, 1955).

### **3.7. Métodos estadísticos en paleomagnetismo**

Debido a su naturaleza, los datos paleomagnéticos requieren de técnicas estadísticas para su análisis. La función de densidad de probabilidad aplicable a las direcciones paleomagnéticas fue desarrollada por el británico estadista R. A. Fisher y es conocida como la distribución de Fisher. A cada dirección se le asigna un peso

unitario y está representada por un punto sobre una esfera unitaria. La función de distribución de Fisher da la probabilidad  $P_{dA}(\theta)$  por unidad de área angular de encontrar una dirección dentro de dicha área angular,  $dA$ , centrada a un ángulo  $\theta$  de la media verdadera. El área angular,  $dA$ , se expresa en estereorradianes, siendo  $4\pi$  el área total en estereorradianes de una esfera unitaria. Las direcciones se distribuyen de acuerdo a la función de densidad de probabilidad (Fisher, 1953):

$$P_{dA}(\theta) = \frac{k}{4\pi \sinh(k)} \exp(k \cos \theta)$$

Donde,  $\theta$  es el ángulo a la dirección verdadera (igual a cero sobre la media verdadera) y  $k$  es el parámetro de precisión, es decir,  $k$  es una medida de la concentración de la distribución alrededor del valor medio. El valor de  $k$  es 0 para una distribución de direcciones que es uniforme sobre la esfera y tiende a infinito para direcciones concentradas sobre un punto. Entonces, como se esperaba a partir de su definición, la distribución de Fisher es máxima sobre el valor de la media verdadera ( $\theta = 0$ ), y para altos valores de  $k$ , la distribución se concentra más fuertemente sobre la media verdadera (Butler, 1992).

También es posible calcular un ángulo dentro del cual se encuentra un porcentaje elegido de direcciones, incluyendo la media verdadera. El ángulo dentro del cual se encuentran el 50% de las direcciones incluyendo la media verdadera está dado por:

$$\theta_{50} = \frac{67.5^\circ}{\sqrt{k}}$$

El cual es análogo al intercuartil de la distribución normal. El ángulo análogo a la desviación estándar de la distribución normal está dado por:



$$\theta_{63} = \frac{81^\circ}{\sqrt{k}}$$

Este ángulo es comúnmente llamado desviación estándar angular. El ángulo crítico final, es el que contiene el 95% de las direcciones incluyendo la media verdadera y está dado por:

$$\theta_{95} = \frac{140^\circ}{\sqrt{k}}$$

La dirección media puede calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$D = \tan^{-1} \frac{\sum m_i}{\sum l_i}$$

$$I = \frac{\text{sen}^{-1} \sum n_i}{R}$$

$$R = \sqrt{(\sum l_i)^2 + (\sum m_i)^2 + (\sum n_i)^2}$$

Donde D es la declinación, I la inclinación, R la magnitud del vector resultante y  $l_i, m_i, y n_i$  son los cosenos directores de la i-ésima dirección.

Fisher demostró que la estimación del parámetro de precisión k, conociendo la dirección verdadera para N vectores unitarios individuales está dada por:

$$k = \frac{N - 1}{N - R}$$

Cuando no se ha calculado la dirección verdadera:

$$k' = \frac{N}{N - R \cos \bar{\omega}}$$

Donde  $\bar{\omega}$  es el ángulo entre la dirección verdadera y las medias estimadas.

Al proporcionar una dirección media, esta debe ir de la mano con un límite de confianza, en la estadística de Fisher este límite de confianza se expresa como un radio angular de la dirección media calculada. Para que esté completamente definido, un nivel de probabilidad debe estar indicado por un límite de confianza. Para un conjunto de datos direccionales con N direcciones, el ángulo  $\alpha(1-p)$  dentro del cual se encuentra el valor desconocido de la media verdadera, a un nivel de confianza  $(1-p)$  está dado por:

$$\cos\alpha_{(1-p)} = 1 - \frac{N-R}{R} \left\{ \left( \frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right\}$$

El valor común de  $(1-p)$  es 0.95 (=95%) y el límite de confianza suele denotarse como  $\alpha_{95}$ . Una aproximación conveniente, razonablemente precisa para  $k \geq 10$  y  $N \geq 10$  es:

$$\alpha_{95} = \frac{140^\circ}{\sqrt{kN}}$$

# CAPÍTULO IV. MODELOS DE CURVAS DE VARIACIÓN PALEOSECULAR

## 4.1. Introducción

Durante la segunda mitad del siglo XX, los estudios arqueomagnéticos se incrementaron exponencialmente y la gran cantidad de datos arqueomagnéticos recolectados durante este lapso de tiempo permitieron describir la evolución espacial y temporal del campo geomagnético durante el último milenio. En una escala regional, el uso de datos arqueomagnéticos permite la construcción de curvas de variación paleosecular para la declinación, inclinación e intensidad del campo geomagnético. La precisión con la que están construidas estas curvas hace posible utilizarlas como una herramienta de datación arqueomagnética, asignando posibles edades a artefactos arqueológicos o flujos de lava de edad desconocida. En una escala global, los datos arqueomagnéticos se tratan conjuntamente con otros datos paleomagnéticos para generar modelos continuos del campo geomagnético, reconstruir la evolución pasada del campo geomagnético no solo sobre la superficie terrestre, sino también en los límites del núcleo y el manto buscando comprender la evolución pasada del complejo proceso geodinámico (Pavón Carrasco, 2015).

## 4.2. Base datos arqueomagnéticos

La compilación más reciente de datos arqueomagnéticos se encuentra en la base de datos GEOMAGIA50 proporcionada por Donadini et al. (2006) y Korhonen et al. (2008). Genevey et al. (2008) revisó y calibró todos los datos de paleointensidad, e incluyó información valiosa a la base de datos ArcheoInt. En la base de datos GEOMAGIA50 se encuentran 2923 datos de declinación, 4303 datos de inclinación y 3924 datos de arqueointensidad, distribuidos homogéneamente sobre los últimos 10 mil de años (fig. 19).

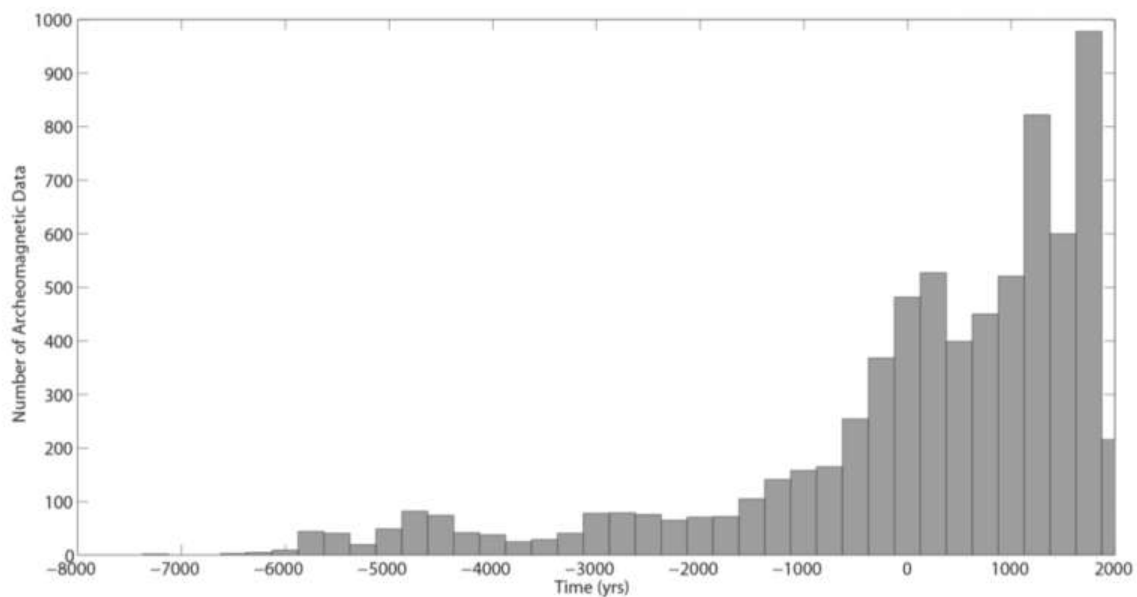


Figura 19. Distribución temporal de datos arqueomagnéticos para los últimos 10 mil años, proporcionados por la base de datos GEOMAGIA50 (Pavón Carrasco, 2015).

Alrededor del 50% de los datos provienen de sitios con edades entre los años 650 y 2000 d.C. Solamente el 17% de los datos corresponden a edades anteriores al año 1000 a.C y el porcentaje se reduce al 2% para edades anteriores al año 5000 a.C. En la figura 20 se muestra la distribución espacial de los datos

arqueomagnéticos para las edades entre los años 800 a.C. y 2000 d.C. Podemos observar una distribución espacial heterogénea; el 96% de los datos provienen del hemisferio norte concentrando la mayor densidad de datos sobre el continente europeo. Se ha obtenido una cantidad moderada de datos correspondientes al Este de Asia y al Centro y Sur de América y solo se dispone de pocos datos para África central y Oceanía (fig.20).

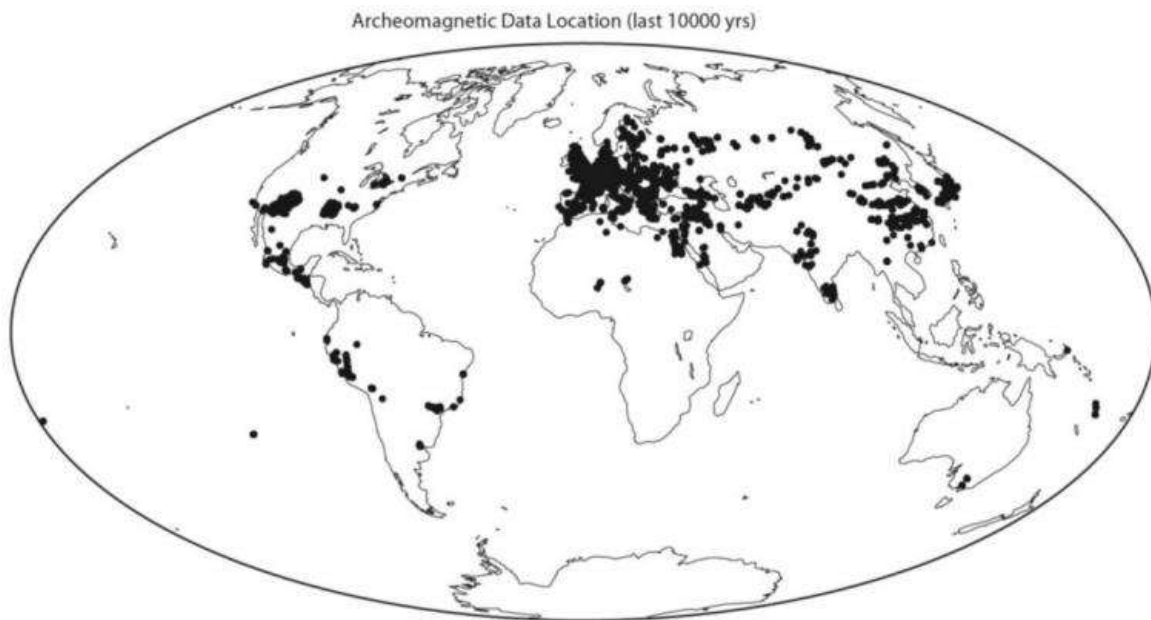


Figura 20. Distribución espacial de datos arqueomagnéticos (Pavón Carrasco, 2015).

Durante los últimos años, en un esfuerzo por obtener una mejor descripción de los cambios en la intensidad del campo geomagnético antiguo a una escala regional, distintos autores han aplicado diferentes criterios para estimar la confiabilidad de los datos magnéticos disponibles (Chauvin et al., 2000; De Marco et al., 2008; Genevey et al., 2009, 2013; Nachasova y Burakov, 2011; Gómez-Paccard et al., 2008, 2012a; Hervé et al., 2013b; Tema et al., 2013). En algunos de estos estudios los autores

incluso han considerado algunos de los datos como poco confiables y los han rechazado en su interpretación de las variaciones del campo magnético antiguo (Gómez-Paccard et al., 2008, 2012a; Genevey et al., 2009, 2013; Hervé et al., 2013b). Esto es quizá un punto de vista extremo, sin embargo, subraya la necesidad de desarrollar criterios paleomagnéticos sólidos que permitan evaluar la confiabilidad de las estimaciones de intensidad contenidas en las bases de datos utilizadas para la modelación del campo magnético terrestre. Un estudio reciente (Pavón Carrasco et al., 2014b) demostró cómo la calidad de los datos de arqueointensidad afecta la reconstrucción del paleocampo, un modelo del campo geomagnético a partir de todos los datos de arqueointensidad disponibles (sin ninguna selección) presenta una menor precisión frente a un modelo del campo geomagnético utilizando datos de alta calidad (con una selección). En la figura 21 se muestran las curvas de variación paleosecular de dos distintos modelos regionales para Europa, utilizando el conjunto de datos de arqueointensidad europeo para los últimos 3 mil años, en la gráfica de la derecha (a) se encuentra el total de los datos y en la gráfica de la izquierda (b) se encuentra un conjunto de datos seleccionados según Pavón-Carrasco et al. (2014b). Todos los datos de arqueointensidad fueron reubicados al centro de Europa (45°N, 15°E) utilizando el método del momento del dipolo virtual axial (fig. 21) (Pavón Carrasco, 2015).

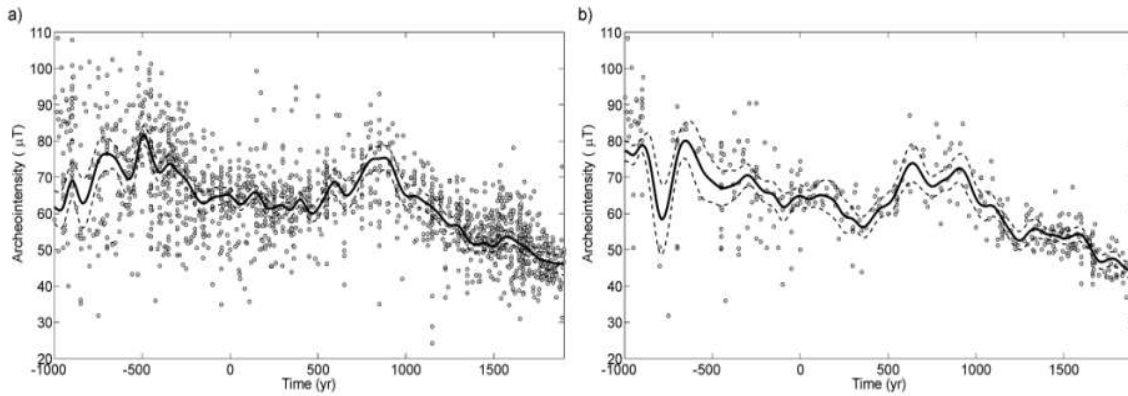


Figura 21. Curvas de variación paleosecular de dos distintos modelos regionales para Europa sobre los últimos 3 mil años (Pavón Carrasco, 2015).

### 4.3. Construcción de una curva de variación paleosecular

Una alta densidad de datos arqueomagnéticos bien fechados distribuidos homogéneamente en un determinado intervalo temporal y regional, permite la construcción de modelos unidimensionales que describen la evolución del campo magnético terrestre en el pasado. Estos modelos, clásicamente llamados Curvas de Variación Paleosecular, proporcionan una variación temporal continua de las componentes del campo geomagnético, es decir, inclinación, declinación e intensidad (Pavón-Carrasco, 2015). El primer paso para generar estas curvas, es trasladar geográficamente los datos de su ubicación original, el sitio arqueológico en el que fueron obtenidos, a un punto de referencia común, utilizando el método de conversión a través del polo (Noël y Batt, 1990), esta reubicación se lleva a cabo asumiendo un campo geomagnético idealmente dipolar. Sin embargo, este no es el caso del campo magnético terrestre, ya que las componentes no dipolares presentan una contribución importante al campo total, por esta razón, la

aproximación sólo es válida para regiones en las que el área no sobrepasa los  $10^5$  km<sup>2</sup>, equivalente a un radio esférico de 800 km desde la ubicación del punto de referencia (Tarling, 1983). Debe investigarse el error de reubicación antes de la construcción de una curva de variación paleosecular; sin embargo, para regiones relativamente pequeñas, no mayores a  $10^5$  km<sup>2</sup>, el error de reubicación está dentro de la incertidumbre paleomagnética  $\alpha_{95}$  para las direcciones y  $\sigma_F$  para las intensidades, por lo que no se consideran en los cálculos de propagación del error (Pavón Carrasco, 2015)

A principios del siglo XXI, Lanos (2004) introdujo la estadística bayesiana al cálculo de las curvas de variación paleosecular, utilizó el modelo estocástico bayesiano basado en la penalización por rugosidad, ahora todos los datos arqueomagnéticos son tratados juntos utilizando splines temporales con puntos de nudo fijados en todo el intervalo temporal. La penalización por rugosidad consiste en la penalización de la segunda derivada de la curva mediante un parámetro de amortiguación, el cual controla la suavidad de la curva de variación paleosecular, la ventaja principal es que los datos se pueden mover a su intervalo de error temporal, describiendo una función de probabilidad en el tiempo. Esta función individual para cada dato proporciona una datación posterior de los datos originales. Como resultado, la suavidad de la curva de variación paleosecular es calculada con una banda de error a un nivel de confianza del 95% (Pavón Carrasco, 2015).

No todas las curvas se generan utilizando exclusivamente datos arqueomagnéticos, es decir, registros de artefactos arqueológicos. Algunas curvas de variación paleosecular son construidas utilizando datos paleomagnéticos registrados por



materiales volcánicos, como es el caso de Italia (Tema et al., 2006) y el norte de América (Hastrum y Blinman, 2010). La baja densidad de datos arqueomagnéticos en estas regiones no permite construir el comportamiento de los elementos del campo geomagnético con suficiente precisión. Por esta razón, datos volcánicos bien fechados, que presentan características similares, en términos del origen de la remanencia magnética, a los datos arqueomagnéticos, son utilizados para completar el conjunto de datos que generará la curva de variación paleosecular (Pavón Carrasco, 2015).

La construcción de una curva de variación paleosecular confiable depende de dos puntos distintos: la distribución temporal de los datos en un seleccionado intervalo de tiempo y la calidad de los datos arqueomagnéticos en términos de las incertidumbres de medición  $\alpha_{95}$ ,  $\sigma_F$  y  $\sigma_T$  (Pavón Carrasco, 2015).

# CAPÍTULO V.

## METODOLOGÍA

### 5.1. Introducción

Principios de

Diciembre de 2018, en acompañamiento de personal del Servicio Arqueomagnético Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM campus Morelia, se hizo la toma de muestras de pisos prehispánicos quemados en la zona arqueológica El Cópore. Se muestrearon tres de los cinco conjuntos que conforman la zona arqueológica, “Conjunto Gotas”, “Conjunto Montés” y “Conjunto Cópore” (fig. 22).



Figura 22. Conjuntos muestreados dentro de la zona arqueológica El Cópore.

Previo a la toma de muestras para los estudios arqueomagnéticos, el Arqueólogo Mtro. Carlos Alberto Torreblanca Padilla y su equipo, habían realizado pozos de sondeo sobre las zonas de los conjuntos en las que se tenía conocimiento de la existencia de los pisos prehispánicos quemados, retirando la capa de sacrificio que cubría los pisos originales, la cual tiene la función de soportar los procesos de degradación antes de que el patrimonio arqueológico se afecte (INAH, 2018), los pisos se encontraban a 10 cm de profundidad, para la ubicación de los pozos de sondeo se utilizaron las retículas establecidas durante los trabajos de exploración arqueológica realizada en el año 2008 (fig. 23).

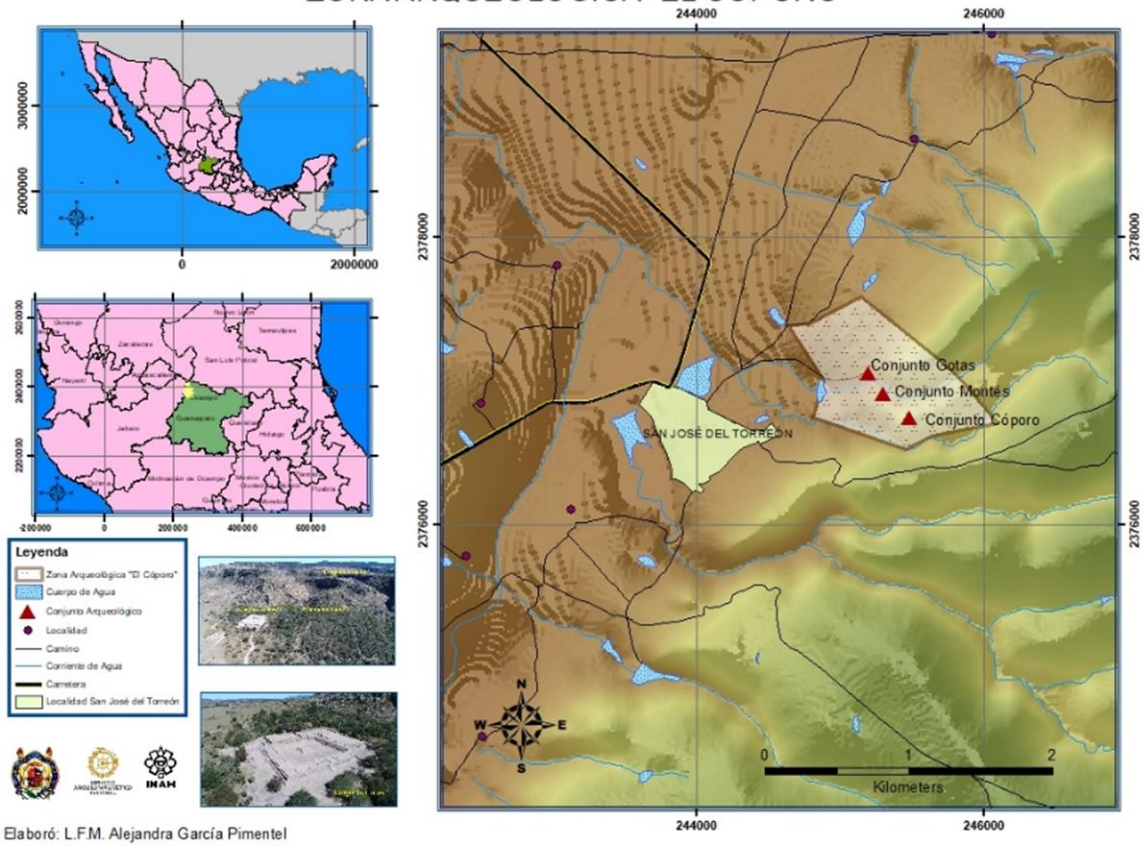


*Figura 23. Excavación del pozo de sondeo correspondiente a la Plataforma Oriente o Salón Rojo del conjunto Gotas (Padilla, 2018).*

## **5.2. Ubicación de la zona de muestreo**

La zona arqueológica El Cópore se localiza sobre las estribaciones de la Sierra de Santa Bárbara (2377062 N, 0245217 E), en el municipio de Ocampo, a un costado de la comunidad de San José del Torreón, al noroeste del estado de Guanajuato, México (fig. 24).

## ZONA ARQUEOLÓGICA "EL CÓPORO"



Elaboró: L.F.M. Alejandra García Pimentel

Figura 24. Mapa de localización de la zona arqueológica El Cóporo.

### 5.3. Muestreo en el Conjunto Gotas



Figura 25. Vista aérea del Conjunto Gotas, señalando cada uno de los sitios muestreados.

Dentro del Conjunto Gotas se encuentra la Plaza del Ocaso. El **Sitio I** de muestreo fue la **Plataforma este o Salón Rojo** (fig. 25).

Las muestras para estudios de paleodirecciones se encuentran “in situ” y deben ser orientadas antes de ser removidas, utilizando preferentemente una brújula Brunton. Para lo anterior, se coloca la brújula sobre el piso buscando la posición en la que el ojo de buey quede bien centrado. Apoyándose sobre el canto derecho de la brújula y un plumón permanente se traza una línea recta orientada hacia donde apunta la pínula (Soler-Arechalde, 2006).

Debido a las características irregulares de los pisos a estudiar, se colocó sobre los mismos un testigo de yeso con la finalidad de nivelarlos y así poder orientarlos correctamente. De este primer sitio se extrajeron las muestras denominadas **Cop1**, **Cop2** y **Cop3** (fig. 26, fig. 27 y fig. 28).



*Figura 26. Colocación de testigo de yeso sobre el piso prehispánico (Padilla, 2018).*



*Figura 27. Orientación de los pisos prehispánicos.*



*Figura 28. Muestras Cop1, Cop2 y Cop3 sobre el pozo de sondeo del Salón Rojo (Padilla, 2018).*

Posterior a la orientación de los pisos, las muestras fueron extraídas con mazo y cincel. Para su protección y traslado, se sujetaron con cinta adhesiva, se envolvieron en papel de cocina y se colocaron en una bolsa de polipropileno con cierre. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio del Servicio Arqueomagnético Nacional

del Instituto de Geofísica de la UNAM Unidad Michoacán en la Ciudad de Morelia (fig. 29).



Figura 29. Proceso de embalaje de las muestras.

También en la Plaza del Ocaso del Conjunto Gotas, se muestreó el Cuarto oriente, Cuarto central y Cuarto poniente, ubicados sobre la Plataforma norte, a los cuales se les nombró **Sitio II**, **Sitio III** y **Sitio IV**, respectivamente.

En el **Cuarto oriente** se extrajeron dos muestras, las cuales estaban separadas por una distancia aproximada de 30 cm, a las que se les denominó **Cop4** y **Cop5** (fig. 30. y fig. 31).



Figura 31. Orientación de las muestras del pozo de sondeo del Cuarto Oriente (Padilla, 2018).



Figura 30. Extracción de las muestras del pozo de sondeo del Cuarto Oriente (Padilla, 2018).

En lo que respecta al pozo de sondeo del **Cuarto central**, se obtuvieron dos muestras denominadas **Cop6** y **Cop7** (fig. 32 y fig. 33).



*Figura 32. Colocación de testigo de yeso sobre los pisos del Cuarto Central (Padilla, 2018).*



*Figura 33. Orientación de las muestras del pozo de sondeo del Cuarto Central (Padilla, 2018).*



Para finalizar nuestro trabajo en el Conjunto Gotas, se obtuvieron tres muestras del pozo de sondeo del **Cuarto poniente**, a las que se les denominó **Cop8**, **Cop9** y **Cop10** (fig. 34, fig. 35 y fig. 36).



*Figura 34. Orientación de las muestras del Cuarto Poniente (Padilla, 2018.)*



*Figura 35. Extracción de las muestras del Cuarto Poniente (Padilla, 2018).*



*Figura 36. Muestras correspondientes al pozo de sondeo del Cuarto Poniente.*

## 5.4. Muestreo en el Conjunto Montés

Hasta la fecha no se han realizado excavaciones arqueológicas sobre el Conjunto Montés, por lo que aún se encuentra bajo tierra, sin embargo durante los recorridos de exploración se han identificado al menos tres estructuras arqueológicas, observando en una de ellas, en la Estructura I (Plataforma este), la presencia de pisos prehispánicos quemados expuestos (Padilla, 2018).

Para poder extraer las muestras en esta área, el equipo del Maestro Carlos Alberto Torreblanca Padilla retiró una capa vegetal que se encontraba cubriendo los pisos. En este caso, las características regulares de los pisos permitieron su orientación sin la necesidad de utilizar el testigo de yeso (fig. 37 y fig. 38).



*Figura 37. Liberación de los pisos prehispánicos cubiertos por una capa vegetal (Padilla, 2018).*



*Figura 38. Orientación de los pisos expuestos dentro del Conjunto Montés.*

Al conjunto Montés se le nombró **Sitio V**, dentro del cual se logró la extracción de 8 muestras a las que se les denominó **Cop5-1, Cop5-2, Cop5-3, Cop5-4, Cop5-5, Cop5-6, Cop5-7 y Cop5-8.**

## 5.5. Muestreo en el Conjunto Cóporo

Dentro del Conjunto Cóporo se muestreó la Plataforma sur de la Estructura II, a este conjunto se le nombró **Sitio VI** y se extrajeron cinco muestras denominadas **Cop11**, **Cop12**, **Cop 12'**, **Cop14** y **Cop15** (fig. 39, fig. 40 y fig. 41).



Figura 39. Orientación de las muestras del Conjunto Cóporo.



Figura 40. Muestra de piso prehispánico lista para su embalaje (Padilla, 2018).



Figura 41. Muestras ya orientadas sobre la Plataforma Sur del Conjunto Cóporo.

## 5.6. Resumen de muestras recolectadas

Durante los trabajos de campo realizados en la zona arqueológica El Cópore, se logró la recolección de un total de 23 muestras de pisos prehispánicos quemados, correspondientes a seis sitios de muestreo como se observa en la siguiente (Tabla 2).

*Tabla 2. Resumen de muestras recolectadas por sitio de estudio para su datación arqueomagnética.*

SITIO	MUESTRAS	ESTRUCTURA	LOCALIZACIÓN*	
			N	E
I	Cop1, Cop2, Cop3A	Conjunto Gotas, Plaza del Ocaso, Plataforma Este, Salón Rojo	2377062	0245217
II	Cop4, Cop5	Conjunto, Gotas, Plaza del Ocaso, Plataforma Norte, Cuarto Oriente	2377081	0245211
III	Cop6, Cop7	Conjunto Gotas, Plaza del Ocaso, Plataforma Norte, Cuarto Central	2377089	0245196
IV	Cop8, Cop9, Cop10	Plaza del Ocaso, Plataforma Norte, Cuarto Poniente	2377086	0245791
V	Cop5-1, Cop5-2, Cop5-3, Cop5-4, Cop5-5, Cop5-6, Cop5-7, Cop5-8	Conjunto Montés, Plataforma Este	2376933	0245192

**\*Localización: UTM WGS84 Datum 14N**

Después de realizar las actividades de muestreo en campo, se procedió a la preparación de las muestras de pisos prehispánicos quemados, con la finalidad de realizar los trabajos de laboratorio necesarios para obtener las componentes del vector magnético y así poder llevar a cabo su datación. En este capítulo se detalla la metodología empleada en la datación de material arqueológico por métodos arqueomagnéticos.

## **5.7. Inventario fotográfico**

Cada muestra fue inventariada con un registro fotográfico, para lo cual se retiró el exceso de polvo de las mismas y se colocaron sobre un tapete de corte cuadrulado (graduado en centímetros) con la finalidad de preservar y registrar las dimensiones de cada muestra. La cámara fotográfica fue colocada perpendicularmente a la muestra del piso quemado con una distancia focal de 20 a 30 cm. La fotografía se tomó en presencia de luz natural con ángulo de incidencia de 45 a 60° y con un tiempo de exposición de 0.5 s. A continuación se presentan las fotografías de cada una de las muestras recolectadas para cada sitio de estudio.

### 5.7.1. Muestras de la Plataforma este.

Las muestras de la Plataforma este o Salón Rojo: Cop1, Cop2 y Cop3 fueron consideradas como muestras del sitio I. Durante el transado del sitio de recolección al laboratorio, la muestra Cop3 se desprendió del testigo de yeso y quedó dividida en dos partes, Cop3A y Cop3B, sin perderse la orientación realizada en campo (fig. 42, fig. 43, fig. 44 y fig. 45).



Figura 42. Muestra Cop1.



Figura 43. Muestra Cop2.



Figura 44. Muestra Cop3A.



Figura 45. Muestra Cop3B.

### 5.7.2. Muestras del Cuarto oriente de la Plataforma norte

A este sitio corresponden las muestras Cop4 y Cop5, cabe mencionar que durante el traslado a la ciudad de Morelia, la muestra Cop5 se desprendió de su testigo de yeso y en la fotografía aparece rotulada como muestra CopA4 (fig. 46 y fig. 47).

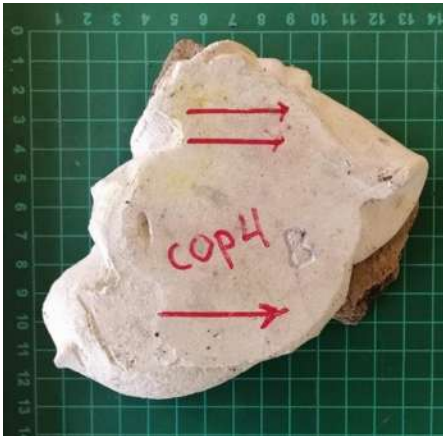


Figura 46. Muestra Cop4.



Figura 47. Muestra Cop5.

### 5.7.3. Muestras del Cuarto central de la Plataforma norte

A este sitio corresponden las muestras Cop6 y Cop7 (fig. 48 y fig. 49).



Figura 48. Muestra Cop6.



Figura 49. Muestra Cop7.

#### 5.7.4. Muestras del Cuarto poniente de la Plataforma norte.

A este sitio corresponden las muestras Cop8, Cop9 y Cop10, cabe mencionar que durante su traslado a la ciudad de Morelia, la muestra Cop9 quedó dividida en dos partes sin perder su orientación, Cop9 y Cop9B (fig. 50, fig. 51, fig. 52 y fig. 53).



Figura 50. Muestra Cop8.



Figura 51. Muestra Cop9.



Figura 52. Muestra Cop9B.

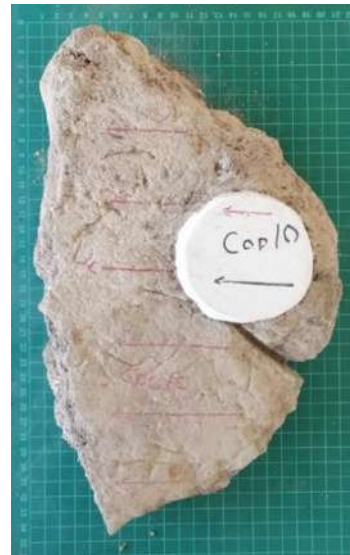


Figura 53. Muestra Cop10.



### 5.7.5. Muestras de la Plataforma este del Conjunto Montés

A este sitio corresponden las muestras Cop5-1, Cop5-2 Cop5-3, Cop5-4, Cop5-5, Cop5-6, Cop5-7 y Cop5-8 (fig. 54, fig. 55, fig. 56, fig. 57, fig.58, fig.59, fig.60 y fig.61).



Figura 54. Muestra Cop5-1.

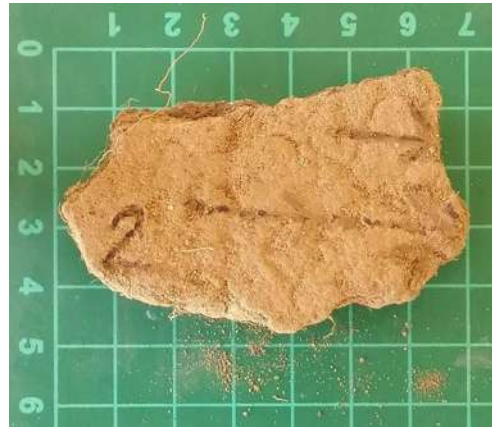


Figura 55. Muestra Cop5-2.



Figura 56. Muestra Cop5-3.



Figura 57, Muestra Cop5-4.



Figura 58. Muestra Cop5-5.



Figura 59. Muestra Cop5-6.

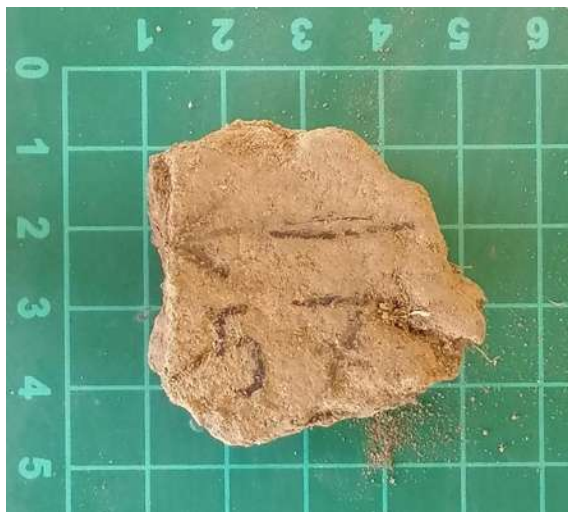


Figura 60. Muestra Cop5-7.



Figura 61. Muestra Cop5-8.

### 5.7.6. Muestras de la Plataforma sur del Conjunto Cópore.

A este sitio corresponden las muestras Cop11, Cop12, Cop12', Cop14 y Cop15, cabe mencionar que durante su traslado a la ciudad de Morelia, la muestra 12'

quedó dividida en dos sin perder su orientación (Cop12', Cop12''), de igual forma la muestra Cop14 quedó dividida en dos (Cop14, Cop14B). Además cuando se extrajeron las muestras Cop11 y Cop12, éstas quedaron en una sola pieza (fig. 62, fig. 63, fig. 64, fig. 65, fig. 66 y fig. 67).



Figura 62. Muestras Cop11 y Cop12.



Figura 63. Muestra Cop12'.



Figura 64. Muestra Cop12''.



Figura 65. Muestra Cop14.



Figura 66. Muestra Cop14B.



Figura 67. Muestra Cop15.

## 5.8. Análisis de magnetismo de roca

Teniendo como propósito identificar la naturaleza y estabilidad térmica de los minerales magnéticos responsables de la remanencia se obtuvo un fragmento de muestra de aproximadamente 5g, con la finalidad de obtener las curvas de susceptibilidad magnética ( $k/T$ ) que permitieran identificar los minerales magnéticos responsables de la magnetización de los pisos prehispánicos quemados, para lo anterior se utilizó un susceptibilímetro MFK1 AGICO para calentar la muestra desde la temperatura ambiente hasta los 650 °C en presencia de gas argón, para reducir la posible oxidación durante el calentamiento (fig. 68 y fig. 69).



Figura 68. Susceptibilímetro MF1.1 AGICO.



Figura 69. Muestra Cop2 para su futuro análisis.

## 5.9. Preparación de muestras

### 5.9.1. Consolidación de muestras

Se observó que los pisos prehispánicos presentaban una composición deleznable, por lo que se hizo una consolidación de las muestras, el procedimiento consistió en: se preparó una solución de acetato de polivinilo ((C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub>), el cual es un material diamagnético, con agua. La solución se preparó en una proporción 3:1, es decir,  $7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  de pegamento por cada  $1.25 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  de agua. Posteriormente, se colocó la solución en un recipiente de plástico y se sumergieron completamente cada una de las muestras. Finalmente, las muestras se extrajeron del recipiente y se colocaron al sol durante 20 minutos (Soler-Arechalde, 2006) (fig. 70, fig. 71 y fig. 72).



Figura 70. Materiales utilizados para la preparación de la solución.



Figura 71. Muestra Cop2 sumergida en la solución de pegamento.



Figura 72. Muestras Cop8 y Cop9 puestas al sol después de ser sumergidas en la solución de pegamento.

### 5.9.2. Encapsulado de muestras

Las muestras que se consideraron de difícil manipulación para realizar sobre ellas los trazos de corte fueron encapsuladas en yeso, el cual es un material diamagnético, utilizando un cuadro de silicón. Se conservó la orientación de cada muestra alineando la misma de forma paralela a una de las aristas del molde, posteriormente las muestras se secaron a temperatura ambiente puestas al sol durante 12 horas (Soler-Arechalde, 2006) (fig. 73, fig. 74 y fig. 75).



Figura 73. Muestra orientada dentro del cuadro de silicón antes de ser cubierta de yeso.

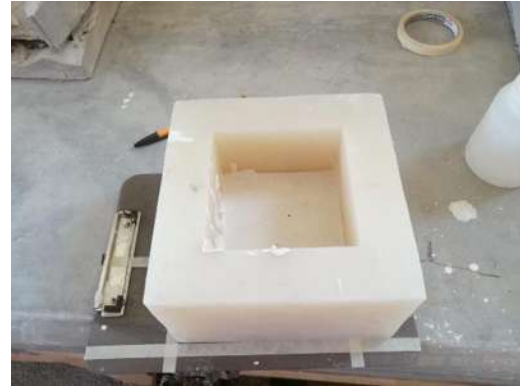


Figura 74. Muestra cubierta de yeso dentro del cuadro de silicón.



Figura 75. Muestras puestas al sol después de ser encapsuladas en yeso.

### 5.9.3. Obtención de especímenes

Con la finalidad de obtener especímenes de cada muestra, se hicieron trazos paralelos a la línea de orientación formando cuadrados de 2 cm de lado sobre las muestras. Posteriormente, se realizaron los cortes necesarios para formar cubos de 2 cm de lado. En el caso de especímenes que no alcanzaban esta dimensión, como con la muestra Cop1, se utilizó algodón para complementar el volumen faltante y se colocaron dentro de cubos de plástico de 2 cm de lado. En todos los casos se

mantuvo la orientación de la muestra. De esta actividad se obtuvo un total de 76 cubos o especímenes (fig. 76, fig. 77, fig. 78 y fig. 79).



Figura 76. Trazo de las líneas de corte sobre la muestra Cop15.



Figura 77. Especímenes obtenidos de la muestra Cop14.



Figura 78. Especímenes obtenidos de la muestra Cop8 encapsulada en yeso.



Figura 79. Especímenes de la muestra Cop1 colocados en cubos de plástico.

Los cubos cortados directamente de las muestras fueron sumergidos nuevamente en la solución de pegamento blanco para garantizar su consolidación (fig. 80).





Figura 80. Especímenes sumergidos nuevamente en la solución de pegamento.

Se hizo un inventario de los especímenes obtenidos y a cada espécimen se le otorgó un número de identificación para su posterior análisis en el laboratorio, a continuación se presenta un resumen de los especímenes obtenidos por muestra y sitio (Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8).

Tabla 3. Especímenes obtenidos para el sitio I

MUESTRA	ESPECIMEN	LIMNA (muestra)
COP1	COP1-1	99C001
	COP1-2	99C002
	COP1-3	99C003
	COP1-4	99C004
COP2	COP2-1	99C005
	COP2-2	99C006
	COP2-3	99C007
COP3(B)	COP3-1	99C008
	COP3-2	99C009
	COP3-3	99C010
	COP3-4	99C011
	COP3-5	99C012

Tabla 4. Especímenes obtenidos para el sitio II.

MUESTRA	ESPECIMEN	LIMNA (muestra)
COP4(A)	COP4-1	99C013
	COP4-2	99C014
	COP4-3	99C015
	COP4-4	99C016
COP4(B)	COP4-1	99C067
	COP4-2	99C068
	COP4-3	99C069
	COP4-4	99C070

Tabla 5. Especímenes obtenidos para el sitio III.

MUESTRA	ESPECIMEN	LIMNA (muestra)
COP6	COP6-1	99C017
	COP6-2	99C018
	COP6-3	99C019
	COP6-4	99C020
	COP6-5	99C021
	COP6-6	99C022
	COP6-7	99C023
COP7	COP7-1	99C024
	COP7-2	99C025
	COP7-3	99C026
	COP7-4	99C027
	COP7-5	99C028

Tabla 6. Especímenes obtenidos para el sitio IV.

MUESTRA	ESPECIMEN	LIMNA (muestra)
COP8	COP8-1	99C029
	COP8-2	99C030
	COP8-3	99C031
	COP8-4	99C032
COP9(B)	COP9-1	99C033
	COP9-2	99C034
	COP9-3	99C035
	COP9-4	99C036
COP10	COP10-1	99C037
	COP10-2	99C038
	COP10-3	99C039
	COP10-4	99C040
	COP10-5	99C041
	COP10-6	99C042
	COP10-7	99C043

Tabla 7. Especímenes obtenidos para el sitio V.

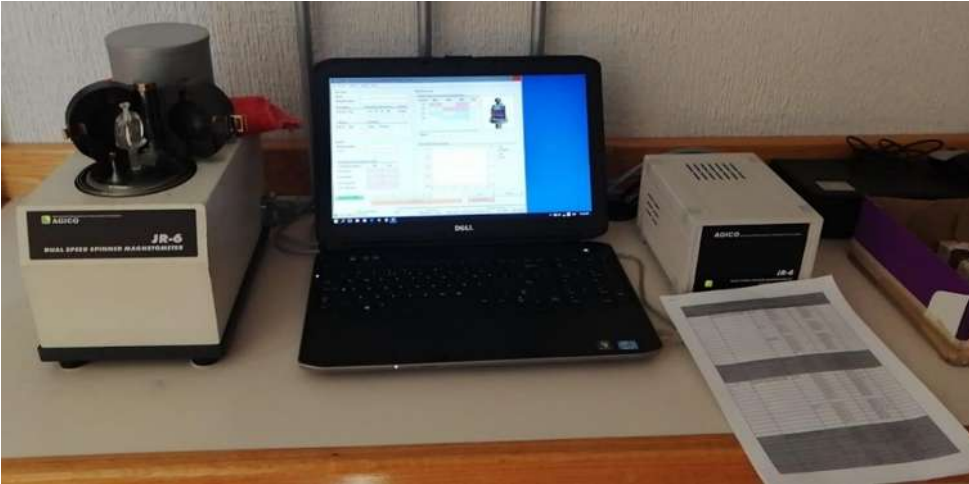
MUESTRA	ESPECIMEN	LIMNA (muestra)
COP5-3	COP5-3-1	99C044
	COP5-3-2	99C045
COP5-6	COP5-6-1	99C046
	COP5-6-2	99C047
COP5-4	COP5-4-1	99C071
	COP5-4-2	99C072
	COP5-4-3	99C073
	COP5-4-4	99C074
	COP5-4-5	99C075
	COP5-4-6	99C076

Tabla 8. Especímenes obtenidos para el sitio VI.

MUESTRA	ESPECIMEN	LIMNA (muestra)
COP11	COP11-1	99C048
	COP11-2	99C049
	COP11-3	99C050
	COP11-4	99C051
	COP11-5	99C052
COP12(B)	COP12-1	99C053
	COP12-2	99C054
	COP12-3	99C055
COP14(B)	COP14-1	99C056
	COP14-2	99C057
	COP14-3	99C058
	COP14-4	99C059
	COP14-5	99C060
	COP14-6	99C061
	COP14-7	99C062
COP15	COP15-1	99C063
	COP15-2	99C064
	COP15-3	99C065
	COP15-4	99C066

## 5.10. Análisis de magnetización remanente natural (MRN)

Se midió la magnetización remanente natural (MRN) (Butler, 1992) de cada espécimen para identificar las componentes del vector magnético inicial, utilizando un magnetómetro de giro JR-6 marca AGICO, la medición de MRN se hizo en 8 especímenes de cada uno de los seis sitios, haciendo un total de 48 mediciones (fig. 81).



*Figura 81. Magnetómetro de giro JR-6 marca AGICO utilizado para el análisis de MRN.*

## **5.11. Técnica de desmagnetización por campos alternos**

Se realizó un experimento de desmagnetización por campos alternos para determinar la estabilidad de la remanencia magnética e identificar posibles alteraciones magnéticas (posteriores al enfriamiento original) originadas por magnetizaciones de tipo secundarias (Butler, 1992) utilizando un desmagnetizador LDA 5 marca AGICO (fig. 82).



*Figura 82. Desmagnetizador LDA 5 marca AGICO.*

# CAPÍTULO VI.

## RESULTADOS

### 5.1. Análisis de magnetismo de roca.

Con la finalidad de identificar la naturaleza y estabilidad térmica de los minerales magnéticos, responsables de la remanencia, contenidos en los pisos prehispánicos, se realizaron mediciones de susceptibilidad magnética en función de la temperatura, las cuales se representan en las curvas termomagnéticas continuas también conocidas como curvas k-T.

Se generó un total de catorce curvas k-T, en las cuales se observa un comportamiento térmico inestable, las curvas de calentamiento (línea roja de la gráfica) y enfriamiento (línea azul de la gráfica) muestran un comportamiento irreversible que podría deberse a cambios químico-magnéticos ocurridos durante la fase de calentamiento. Todas las curvas termomagnéticas coinciden en una fase magnética que alcanza temperaturas de Curie entre 567°C y 586°C, lo que señala a la titanomagnetita pobre en titanio como responsable de la magnetización. Además de esta fase ferrimagnética dominante, en las curvas de calentamiento se observó una fase magnética con temperaturas de Curie entre 220°C y 240°C lo que podría indicar la inversión de titanomaghemita. No se detectó la presencia de granos de hematita. (fig. 83, fig. 84. y fig. 85).

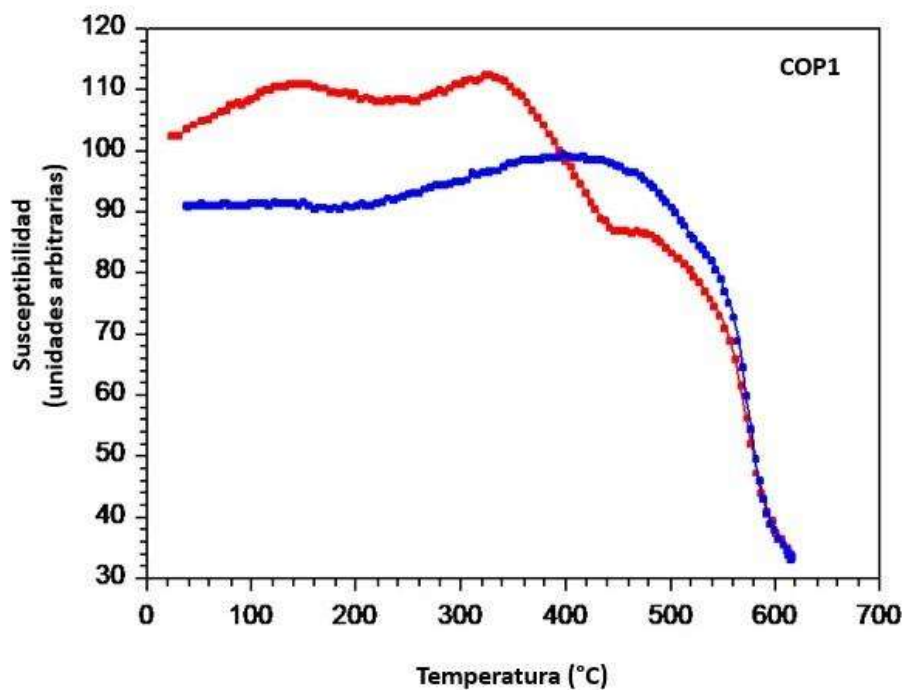


Figura 83. Curva termomagnética continua (k/T) para la muestra Cop1.

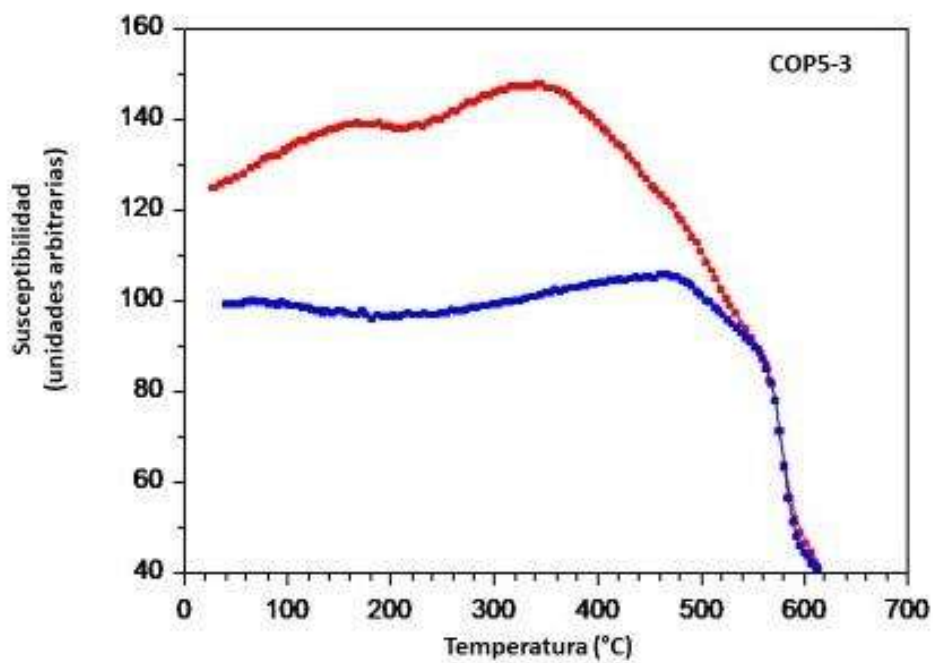


Figura 84. Curva termomagnética continua (k/T) para la muestra Cop5-3.

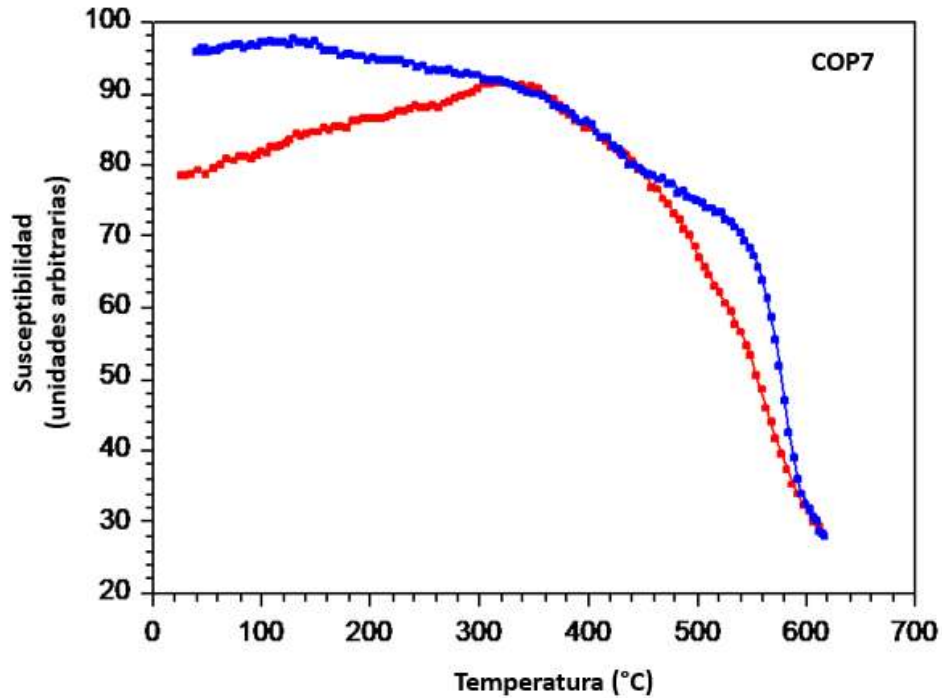


Figura 85. Curva termomagnética continua (k/T) para la muestra Cop7.

## 5.2. Magnetización remanente natural (MRN)

Para identificar las magnetizaciones primarias se midieron la magnetización remanente natural (MRN) de 53 especímenes correspondientes a los seis sitios de estudio. En el diagrama de iguales áreas se observó el agrupamiento de la mayoría (83%) de las direcciones de MRN de los especímenes. Posteriormente, visualizamos las direcciones de MRN de los especímenes por sitio de estudio, en cinco sitios pudimos observar un agrupamiento de las direcciones, mientras que las correspondientes al Sitio III mostraron una dispersión considerable.

Observando el agrupamiento en las direcciones de MRN pudimos confirmar que las muestras correspondían a pisos prehispánicos quemados, pues al momento de su



última exposición al fuego los minerales magnéticos se orientaron en la dirección del campo magnético terrestre presente al momento de su enfriamiento. En el caso del Sitio III podría ser que los minerales magnéticos de los pisos prehispánicos no alcanzaron la temperatura de desbloqueo al momento del incendio.

### **5.3. Ejemplos de tratamientos por campos alternos**

Con el objetivo de obtener la dirección característica de la remanencia, así como determinar su estabilidad e identificar posibles alteraciones magnéticas originadas por magnetizaciones de tipo secundarias (mayormente viscosas), se hizo un experimento de tratamiento por Campos Alternos.

Se desmagnetizaron un total de 46 especímenes, en un inicio se aplicó un campo magnético equivalente a 3 mT a tres especímenes piloto, posteriormente se aplicaron campos magnéticos desde 5 mT hasta 55 mT con incrementos graduales de 5 mT.

En los diagramas ortogonales de desmagnetización de la magnetización remanente natural, también llamados diagramas de Zijderveld (Zijderveld, 1967), los especímenes del sitio III mostraron un comportamiento de paleodirecciones inconsistentes y patrones de desmagnetización mal definidos, se aplicaron campos de hasta 40 mT sin lograr observar un comportamiento unidireccional hacia el origen de coordenadas, lo anterior nos llevó a descartar el sitio III para análisis de datación arqueomagnética (fig. 86).

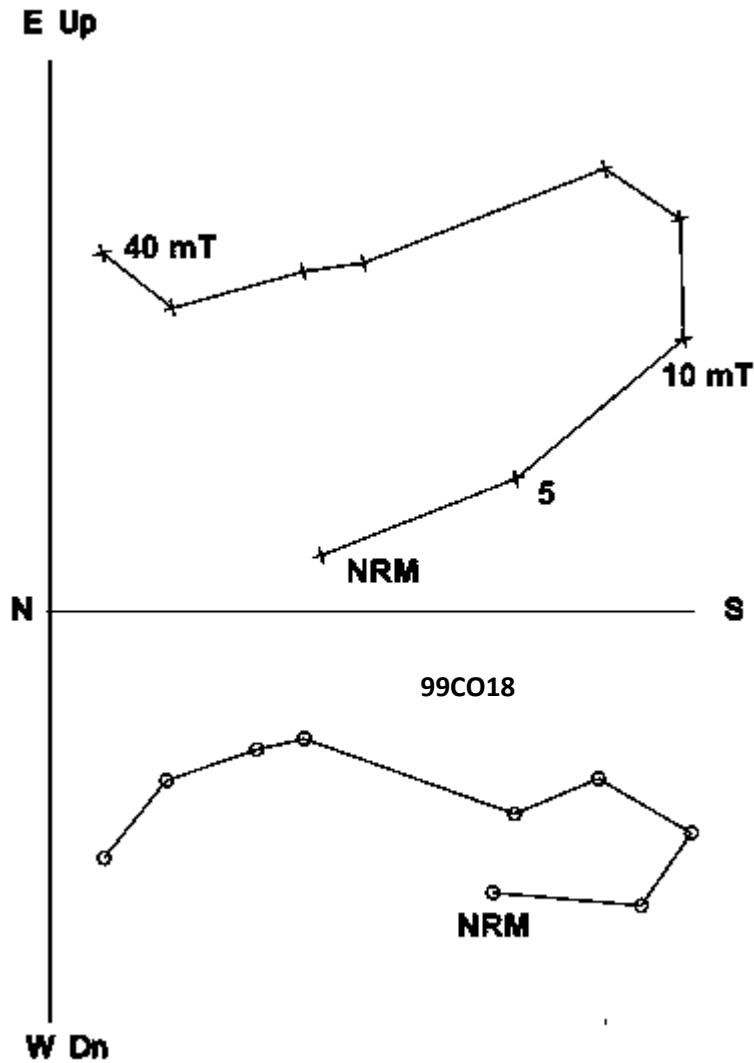


Figura 86. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO18 correspondiente al Sitio III.

En la mayoría de los especímenes restantes se observó una componente estable unidireccional, que muestra una desmagnetización a 40 mT, lo cual indica que el responsable de la magnetización es un mineral ferrimagnético de coercitividad relativamente baja (fig. 87 y fig. 88).

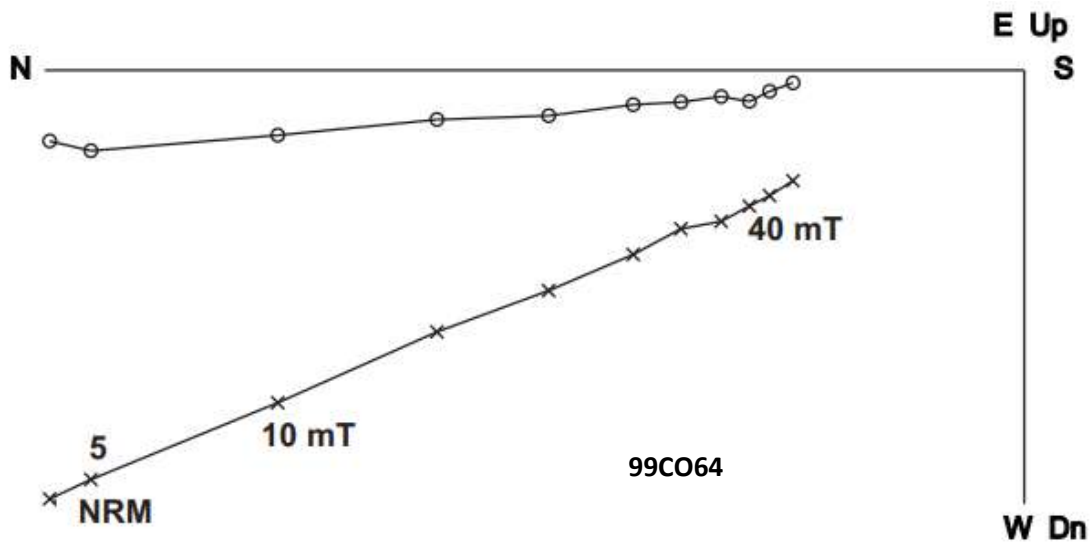


Figura 87. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO64 correspondiente al Sitio VI.

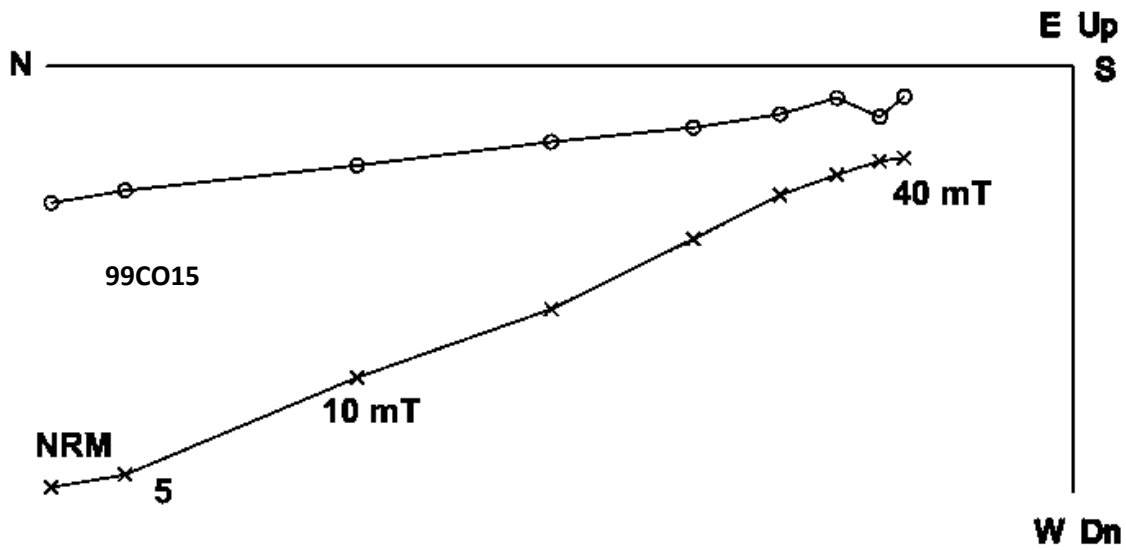


Figura 88. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO15 correspondiente al Sitio II.

En pocos especímenes se observó la presencia de una segunda componente de magnetización probablemente de origen viscoso, la cual fue removida al aplicar campos alrededor de 10 mT (fig. 89).

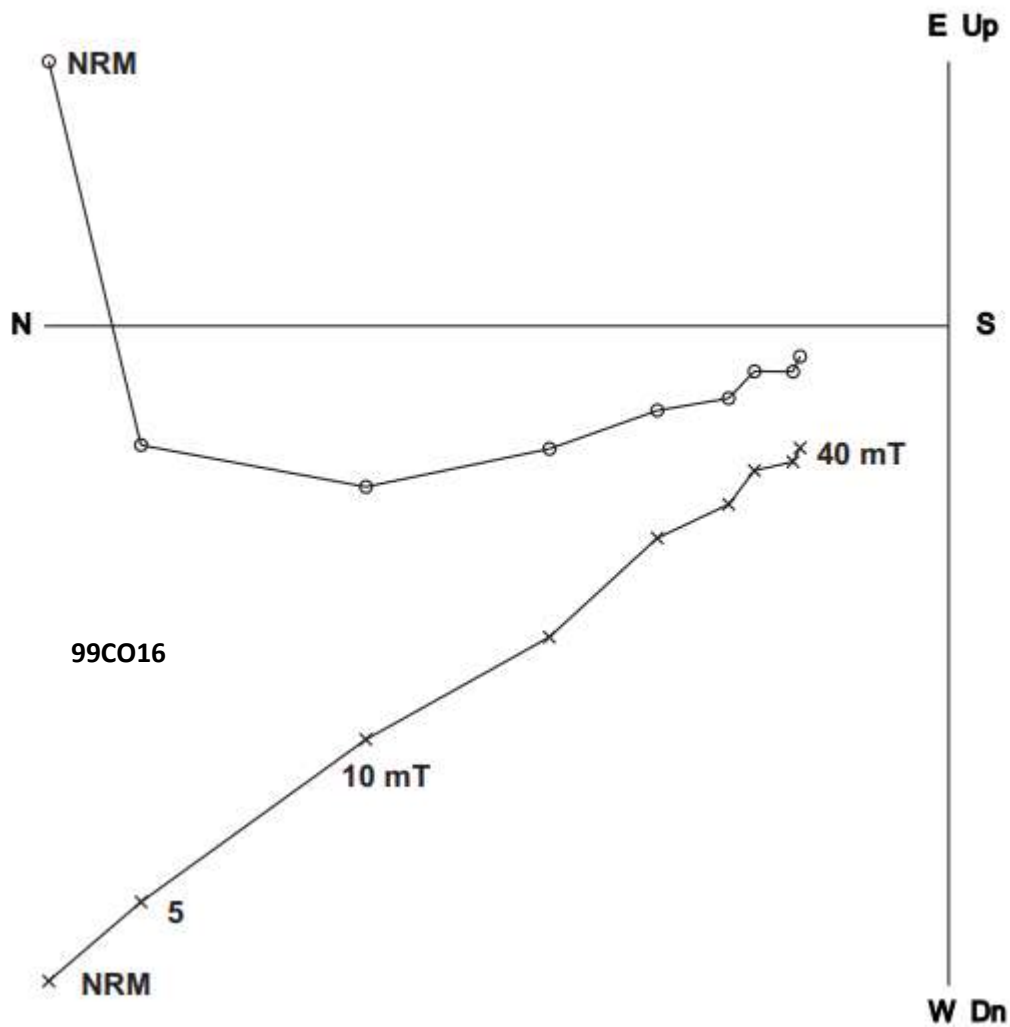


Figura 89. Diagrama de Zijderveld para el espécimen 99CO16 correspondiente al Sitio II.

#### 5.4. Datación arqueomagnética

Las direcciones arqueomagnéticas se calcularon con precisión para cuatro de los sitios de estudio, mediante la estadística de Fisher, arrojando valores para  $\alpha_{95} = 4^\circ$  o menores. El sitio IV, Cuarto Central de la Plaza del Ocaso, arrojó direcciones ligeramente dispersas con valores para  $\alpha_{95} = 8.7^\circ$ .

Finalmente, las medias obtenidas fueron comparadas con el modelo geomagnético SHA.DIF14K (Pavón Carrasco, 2014), utilizando la herramienta de MATLAB para la datación arqueomagnética (Pavón Carrasco, 2011) y funciones de densidad de probabilidad con un nivel de confianza del 95%, se logró obtener los intervalos de edad probable para los pisos prehispánicos quemados del sitio arqueológico El Cópore (fig.90, fig. 91, fig. 92, fig. 93 y fig. 94) (Tabla 9).

**CONJUNTO GOTAS, PLAZA DEL OCASO, SALÓN ROJO.**

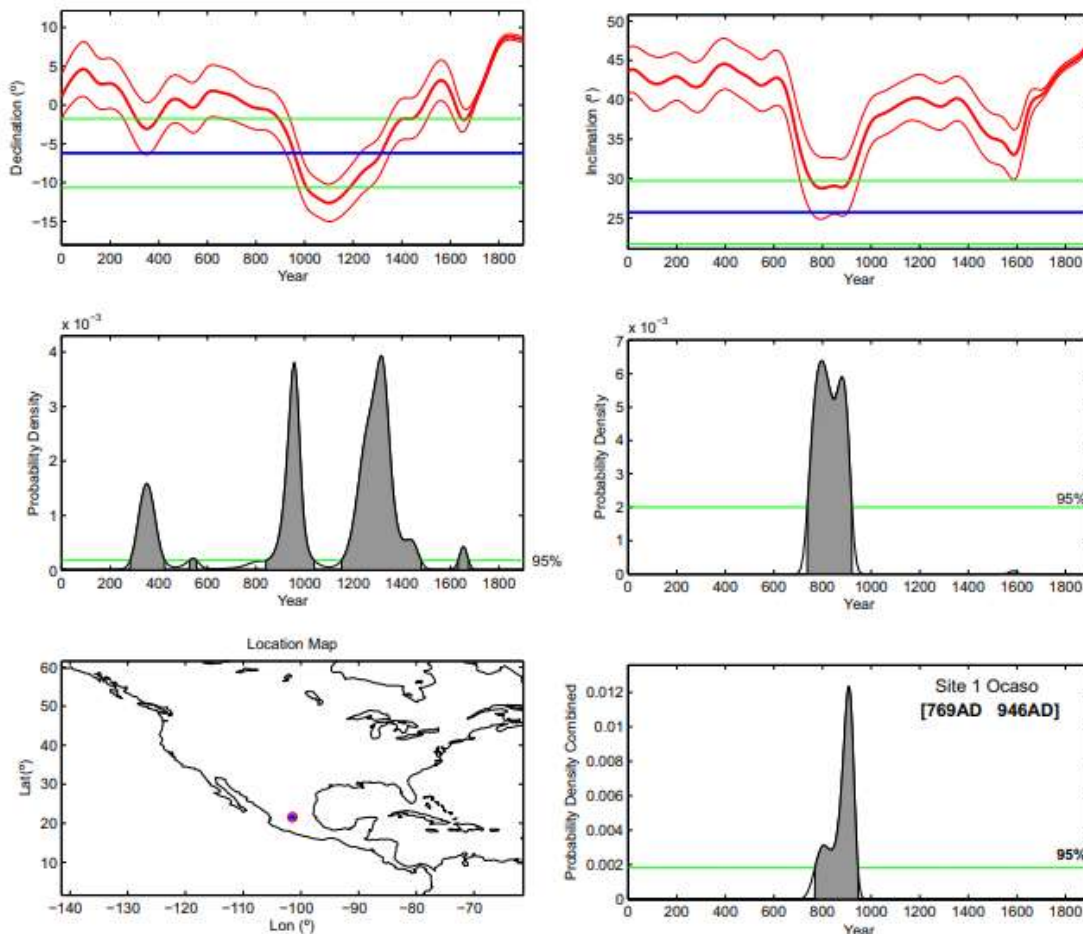


Figura 90. Intervalo de edad probable para el Sitio I.

CONJUNTO GOTAS, PLAZA DEL OCASO, CUARTO ORIENTE.

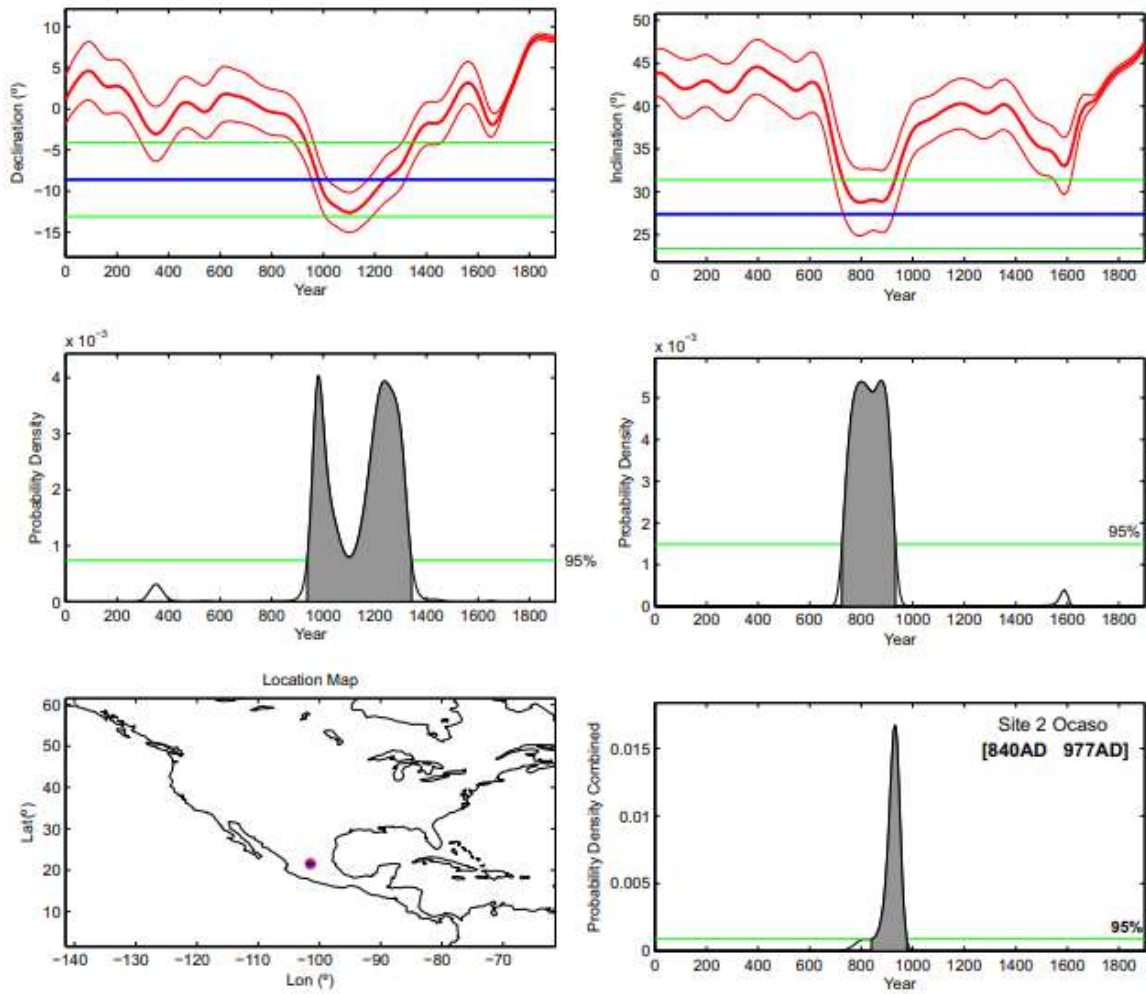


Figura 91. Intervalo de edad probable para el Sitio II.

CONJUNTO GOTAS, PLAZA DEL OCASO, CUARTO PONIENTE

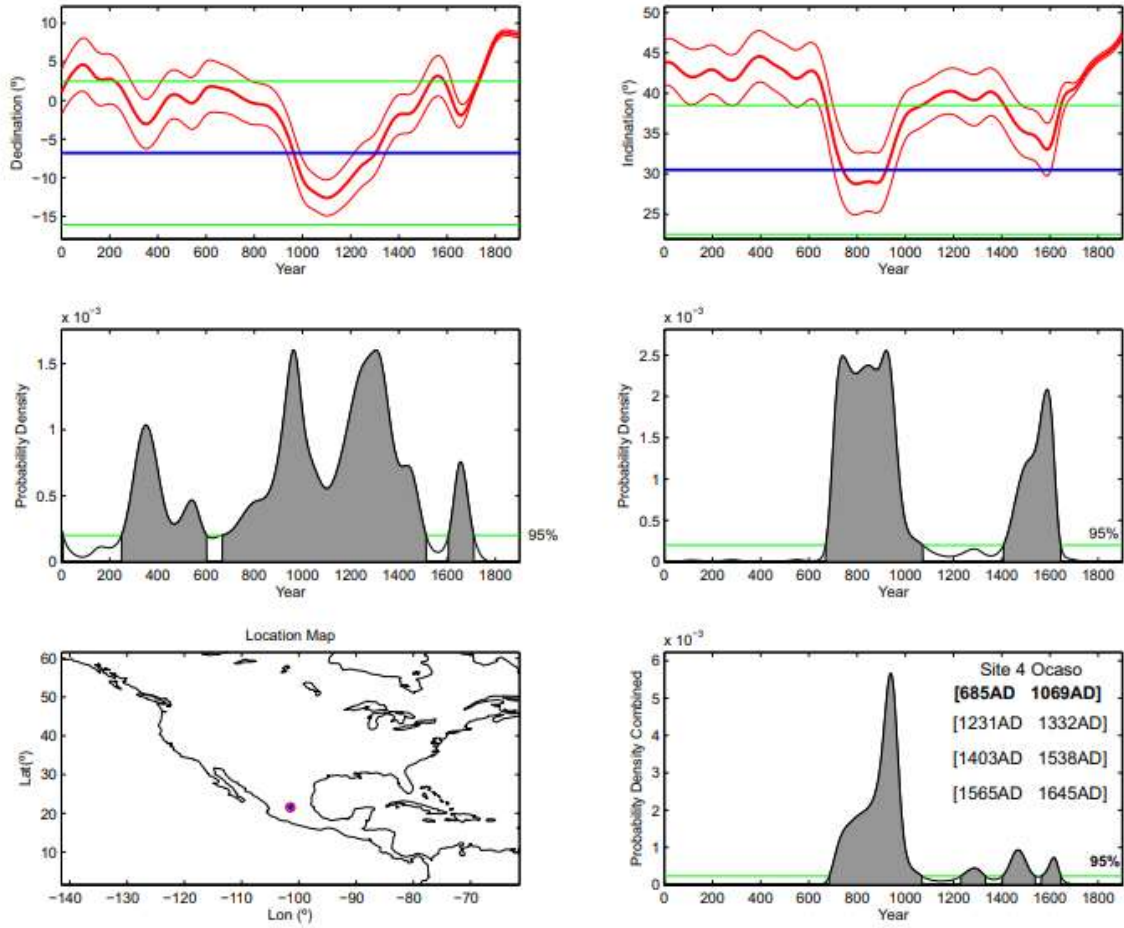


Figura 92. Intervalos de edad probable para el Sitio IV.

CONJUNTO MONTÉS, PLATAFORMA ESTE

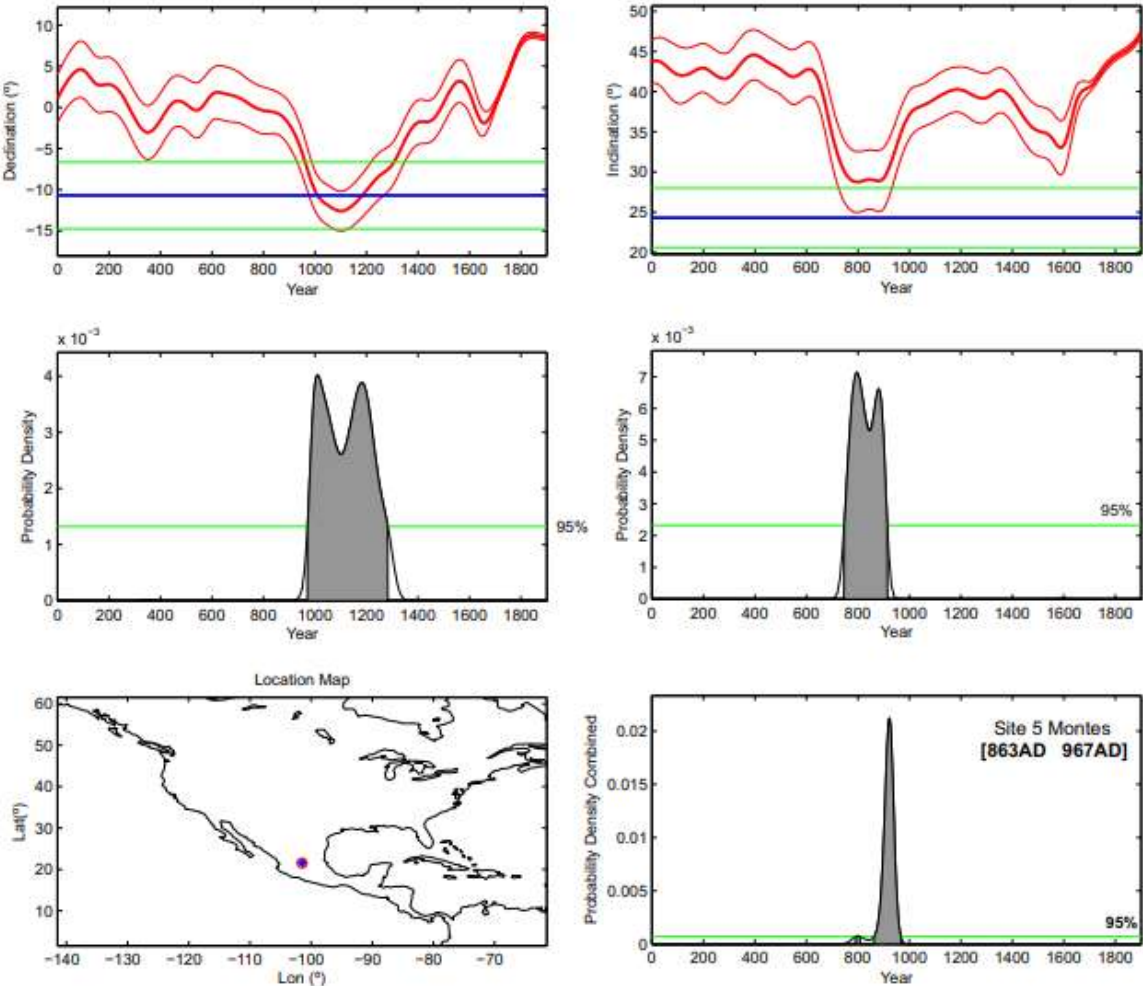


Figura 93. Intervalo de edad probable para el Sitio V.



CONJUNTO CÓPORO, PLATAFORMA SUR

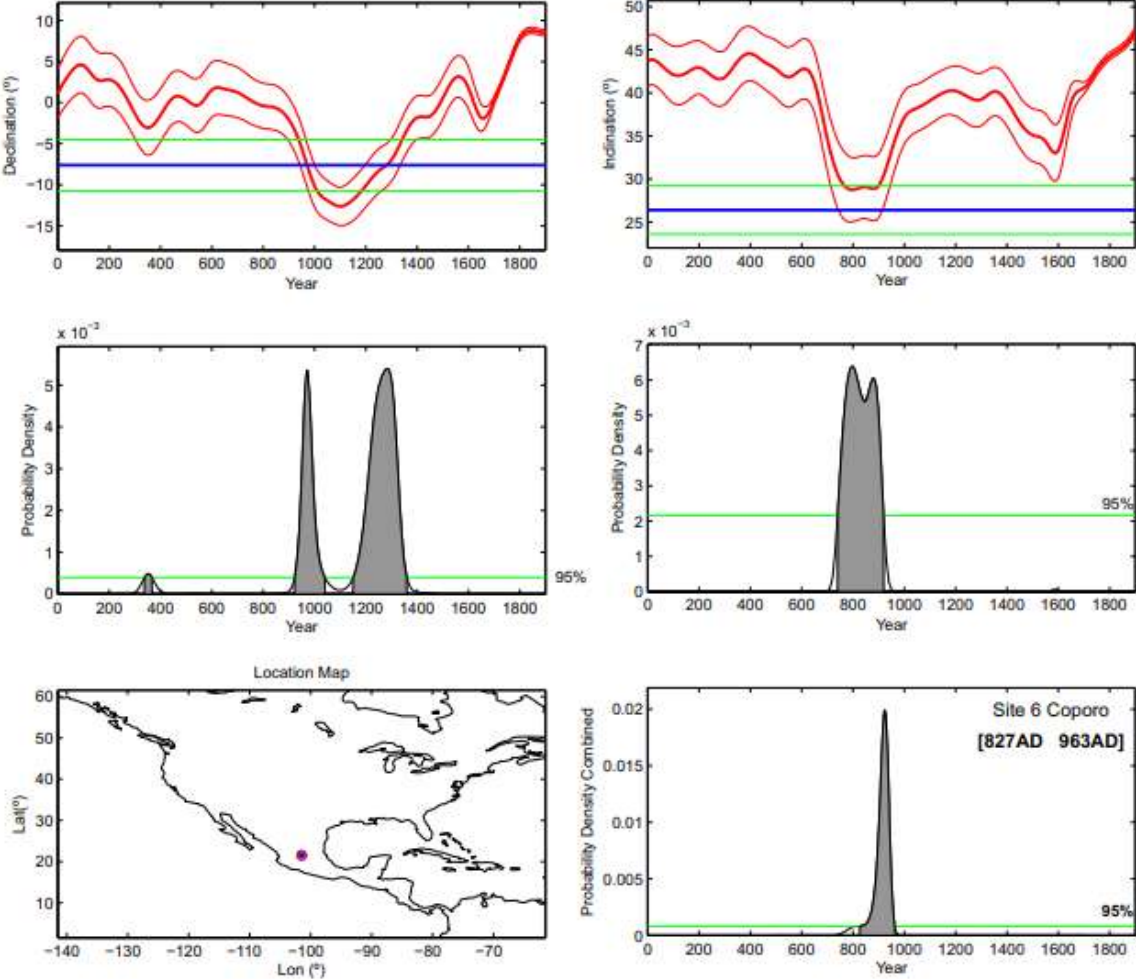


Figura 94. Intervalo de edad probable para el Sitio VI.

Tabla 9. Direcciones arqueomagnéticas obtenidas para cada sitio de estudio.

Sitio	Estructura	Localización*		n/N	INC (°)	DEC (°)	$\alpha_{95}$ (°)	k	Posible intervalo de datación (d.C)
		N	E						
<b>I</b>	Plaza del Ocaso, Plataforma Este, Salón Rojo	2377062	0245217	8/8	25.7	353.8	4.2	136	<b>769 - 946</b>
<b>II</b>	Plaza del Ocaso, Plataforma Norte, Cuarto Oriente	2377081	0245211	8/8	27.4	351.4	3.9	143	<b>840 - 977</b>
<b>III</b>	Plaza del Ocaso, Plataforma Norte, Cuarto Central	2377089	0245196	0/8	-	-	-	-	-
<b>IV</b>	Plaza del Ocaso, Plataforma Norte, Cuarto Poniente	2377086	0245791	8/8	30.5	353.2	8.7	44	<b>685 - 1069</b>
<b>V</b>	Conjunto Montes, Plataforma Este	2376933	0245192	8/8	24.3	349.3	3.7	189	<b>863 - 967</b>
<b>VI</b>	Conjunto Cópore, Plataforma Sur	2376720	0245498	8/8	26.4	352.4	2.8	295	<b>827 - 963</b>

\*Localización: UTM WGS84 Datum 14N

# CAPÍTULO VII.

## DISCUSIÓN

Las direcciones arqueomagnéticas para cada sitio de estudio resultaron muy similares, por lo que los intervalos de edad probable obtenidos también resultaron cercanos, la mayoría de las edades caen entre los años 820 d.C. y 950 d.C.; exceptuando el largo intervalo de edad obtenido para el Sitio IV (685 d.C. al 1069 d.C.) debido a que sus direcciones medias son ligeramente dispersas, por lo que este intervalo de edad debe considerarse con cierta precaución.

Actualmente la información obtenida sobre los vestigios, tanto arquitectónicos como arqueológicos fabricados en diferentes materias primas, indican correspondencia con la última etapa de ocupación del Cópore correspondiente al período Epiclásico (600 – 900 d.C.). Después de la caída de Teotihuacán en el año 600 d.C. se ha documentado una desintegración de las redes comerciales y una nueva conformación territorial que derivó en nuevos centros de gobierno regional. Durante esta etapa el Tunal Grande consolida su máxima extensión regional, creando un centro de poder en cada valle y en el estado de Guanajuato, El Cópore se convierte en el centro de poder del valle de Ocampo.

El abandono del Cópore es materia de debate, anteriores consideraciones arqueológicas indican la posible caída del sitio alrededor del año 900 d.C. mientras que estudios recientes indican un período de reocupación, por parte de los Toltecas,

entre el año 900 y 950 d.C. Para el año 1000 d.C. la región del Tunal Grande o frontera norte de Mesoamérica se encuentra completamente deshabitada de grupos agrícolas mesoamericanos. Con el abandono del Cópore así como de todo el valle del Río Grande de Ibarra y valles circundantes, se produce una etapa de despoblación de la región comprendida entre los años 1000 y 1300 d.C. En ese momento la región es reocupada por antiguos grupos humanos nómadas que posteriormente se convertirían en la cultura Chichimeca. Para la época de la conquista española, El Cópore se encuentra completamente cubierto por una vegetación espinosa, lo que impide su colonización.

El resultado principal de esta investigación radica en el hecho de que cualesquiera que sean los sitios de muestreo a lo largo de la zona arqueológica del Cópore, sus intervalos de datación absoluta son muy similares, lo que indica que un gran evento de incendio generalizado ocurrió casi simultáneamente, la presencia de vigas quemadas y manchas de hollín observadas en los pisos de La Plaza del Ocaso, así como en varios lugares dentro de los conjuntos Cópore y Montés, permite impulsar la hipótesis sobre un incendio intencional, la cual se ve reforzada por la presencia de edificios derrumbados debido al incendio generalizado. Sin embargo, debe considerarse también la posibilidad de un ritual de abandono y clausura del sitio, pues no existen rastros de acciones violentas o de guerra.

Como se menciona antes, los estudios arqueológicos anteriores sugirieron un período de abandono alrededor del año 900 d.C. tras el intento de reocupación del sitio por parte de los Toltecas, materiales cerámicos como el Plumbate y Blanco Levantado, característicos de los Toltecas, recuperados en El Cópore fortalecieron

esta idea. A este período se le llamó “Cóporo Tardío” (900 – 1100 d.C.), sin embargo actualmente es llamado “Fase Caracol” (900 – 1000 d.C.).

Basado en los nuevos resultados arqueomagnéticos obtenidos en este estudio, parece que la caída del Cóporo ocurrió muy probablemente entre los años 850 y 950 d.C. lo que coincide con la reocupación por parte de los Toltecas. Para el año 1100 d.C. el sitio estaba completamente abandonado, pues no se detecta evidencia de ocupación humana entre los años 1100 y 1300 d.C.

# CAPÍTULO VIII.

## CONCLUSIONES FINALES

Dentro de los objetivos específicos planteados al inicio del proyecto se encuentran la medición sistemática de la susceptibilidad magnética así como la identificación de los minerales magnéticos contenidos en los pisos prehispánicos, ambos objetivos fueron alcanzados exitosamente. Al observar las curvas termomagnéticas ( $k/T$ ), identificamos a la titanomagnetita pobre en titanio como responsable de la magnetización de los pisos y además observamos un comportamiento térmico inestable en las muestras.

La determinación de las arqueodirecciones de los pisos prehispánicos quemados y los intervalos probables de ocupación del sitio fueron alcanzados con éxito en cinco de los seis sitios de estudio, comparando las arqueodirecciones obtenidas con el modelo geomagnético SHA.DIF14K. Una característica que llama la atención en estos resultados, es la gran similitud que existe entre las arqueodirecciones obtenidas para cada sitio y por consecuencia entre los intervalos probables de ocupación, lo que indica que un gran evento de incendio generalizado ocurrió casi simultáneamente.

La contribución a la cronología absoluta y secuencia ocupacional del Tunal Grande durante la época prehispánica mediante el estudio arqueomagnético de los pisos

quemados ubicados en El Cópore es hoy una realidad, por lo que podemos afirmar que se cumplió con el principal objetivo de este proyecto.

Este proyecto de investigación derivó en la elaboración de un artículo científico titulado “The memory of fire in El Coporo (Northern Mesoamerica): Apogee and Abandonment” el cual fue aceptado y publicado en la revista “Journal of Archaeological SCIENCE: Reports”.

Durante la elaboración de este proyecto logramos cumplir con la mayoría de los objetivos que se plantearon al inicio y así realizamos una aportación, con un vasto sustento científico, a la ardua tarea que tienen los historiadores y arqueólogos por reconstruir los eventos, tradiciones y forma de vida de las antiguas civilizaciones prehispánicas.

Con lo anterior hemos logrado proporcionar un ejemplo claro del sentido de transversalidad de las ciencias exactas o experimentales (en este caso las matemáticas y la física) respondiendo a las necesidades de las ciencias sociales y humanidades (en este caso la arqueología), el cual será de mucho valor dar a conocer a los estudiantes de educación básica, por medio de la divulgación científica, con la intención de fomentar su interés por el estudio de las asignaturas de historia, matemáticas y física.

## Referencias

- Braniff, B., 1961a. La subarea mesoamericana del Tunal Grande, México. Ponencia presentada en IX Mesa redonda de la Sociedad Mexicana de Antropología, celebrada en Chihuahua, Chih. Septiembre, Archivo Técnico de la Sección de Arqueología del centro INAH Guanajuato.
- Braniff, B. 1961. La subárea mesoamericana del Tunal Grande, México (ponencia). Chihuahua, Chih., IX Mesa Redonda Sociedad Mexicana de Antropología.
- Braniff, B., 1961b. Exploraciones arqueológicas en El Tunal Grande, Boletín del INAH No.5: 6-7, INAH, México.
- Braniff, B., 1963. Breve informe sobre las excavaciones en El Cópore, Guanajuato. Archivo técnico de la sección de arqueología del INAH Guanajuato.
- Braniff, B., 1965a. Investigaciones arqueológicas en Guanajuato, México. Consideraciones preliminares, Archivo Técnico de la Sección de Arqueología del centro INAH Guanajuato.
- Braniff, B., 1965b. Estudios arqueológicos en el Río Laja, Guanajuato, Boletín del INAH, No.19, pp.12-13, INAH, México.
- Braniff, B., 1972. Secuencias arqueológicas en Guanajuato y la cuenca de México: un intento de correlación”, en Teotihuacan: xi mesa redonda de la sociedad mexicana de antropología. México, Sociedad Mexicana de Antropología, pp. 273-323.
- Braniff, B., 1975. Arqueología del Norte de México. En Los pueblos y señoríos teocráticos. El periodo de las ciudades urbanas. Primera parte. México: Panorama histórico y cultural. INAH-SEP, México.
- Braniff, B., 1998. Morales, Guanajuato y la tradición Chupícuaro. México, INAH (Colección Científica No. 373), p. 23.
- Braniff, B., 1999. Morales, Guanajuato y la tradición tolteca. Colección Científica No.395, INAH, México.
- Butler, R. F. (1992). *PALEOMAGNETISM: Magnetic Domains to Geologic Terranes*.
- Cervera, J. (2010). Breve reseña sobre métodos para datación arqueológica. *ESTRAT CRÍTIC Num. 4*, 91-99.
- Chauvin, A., Y. Garcia, P. Lanos, and F. Laubenheimer (2000). Paleointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 120, 111–136.
- Crespo-Oviedo A., Castañeda-López C., 1999. “Cueva de Indios”, en expresión y memoria. Pintura rupestre y petrograbado en las sociedades del norte de México. INAH, México (colección científica No. 385), p. 154.
- Darras V., Faugere B., 2007. “Chupícuaro, entre el occidente y el altiplano central. Un balance de los conocimientos y las nuevas aportaciones”, en Dinámicas culturales entre el occidente, centro-norte y la cuenca de México, del Preclásico al Epiclásico. Colmich/CEMCA, p. 65.
- De Marco, E., S. Spassov, D. Kondopoulou, I. Zananiri and E. Gerofoka. (2008). Archaemagnetic study and dating of a Hellenistic site in Katerini (N. Greece). *Phys. Chem. Earth*, 33, 481 – 495.



Donadini, F., K. Korhonen, P. Riisager, and L. Pesonen, (2006). Database for Holocene geomagnetic intensity information, EOS, Transactions, American Geophysical Union, 87(14), 137.

DUNLOP, D. J., 1995. Magnetism in rocks. *J. Geophys. Res.*, 100, 2161-2174.

Fisher, R. A. 1953. Dispersión on a sphere, *Proceedings of the royal society*, a.217, London, 295-305.

Goguitchaichvili, A., A. Soler, E. Zanella, G. Chiari, R. Lanza, 2004. Pre-columbian mural paintings from mesoamerica as geomagnetic field recorders. *Geophys. Res. Lett.*, 31, 12, L12607.

Florence C., 2000. "The late and terminal preclassic in southeastern Guanajuato: heartland or periphery?". En *Greater Mesoamérica*. Salt Lake City, The University of Utah Press, p. 29.

Nicolau A., 2003. Proyecto arqueológico El Cópore, Ocampo. Temporadas III-IV. Archivo del proyecto arqueológico El Cópore.

Gary A. Glatzmaier, P. H. (1995). A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature*, 203-209.

Genevey, A., Gallet, Y., Constable, C., Korte, M., Hulot, G. (2008), *ArcheoInt: An upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment*. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9(4), Q04038.

Genevey, A., Y. Gallet, J. Rosen, and M. Le Goff (2009). Evidence for rapid geomagnetic field intensity variations in Western Europe over the past 800 years from new French archeointensity data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 284, 132–143.

Genevey, A., Y. Gallet, E. Thébault, S. Jesset, and M. Le Goff (2013). Geomagnetic field intensity variations in Western Europe over the past 1100 years, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 2858–2872.

GOGUITCHAICHVILI, A., A. M. SOLER, E. ZANELLA, G. CHIARI, R. LANZA, J. URRUTIA-FUCUGAUCHI y T. GONZÁLEZ, 2004. Pre-Columbian mural paintings from Mesoamerica as geomagnetic field recorders. *Geophys. Res. Lett.*, 31, 12, L12607

Goguitchaichvili, A. (2018). *Avances en arqueomagnetismo y geofísica aplicada I*. Graus, España: Pacual Izquierdo - Egea.

Gómez-Paccard, M., A. Chauvin, Ph. Lanos and J. Thiriot, (2008). New archeointensity data from Spain and the geomagnetic dipole moment in western Europe over the past 2000 years. *J. Geophys. Res.*, 113, B09103

Gómez-Paccard, M., A. Chauvin, P. Lanos, P. Dufresneb, M. Kovachevad, M.J. Hill, E. Beamud, S. Blain, A. Bouvier, P. Guibert, and Archaeological Working Team (2012a), Improving our knowledge of rapid geomagnetic field intensity changes observed in Europe between 200 and 1400 AD, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 355–356, 131–143.

Gubbins, D., Bloxham, J., (1985). Geomagnetic field analysis. III. Magnetic fields on the core–mantle boundary. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 80, 695–713.

Hagstrum, J.T., Blinman, E., (2010). Archeomagnetic dating in western North America: an updated reference curve based on paleomagnetic and archeomagnetic data sets. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11 (Q06009).

Hervé, G., A. Chauvin, and P. Lanos (2013b), Geomagnetic field variations in Western Europe from 1500 BC to 200 AD. Part II: New intensity secular variation curve, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 218, 51-65.

INAH. (17 de septiembre de 2018). *GOBIERNO DE MÉXICO*. Obtenido de INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGIA E HISTORIA: <https://inah.gob.mx/boletines/7557-inah-da-tratamiento-de-conservacion-a-los-frisos-policromados-de-becan-y-balamku-en-campeche>

Korhonen, K., F. Donadini, P. Riisager, and L. Pesonen, (2008). GEOMAGIA50: an archeointensity database with PHP and MySQL, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9, doi:10.1029/2007GC001,893.

Lanos, Ph., (2004), Bayesian inference of calibration curves: application to archaeomagnetism, in *Tools for constructing chronologies: crossing disciplinary boundaries*. Vol. 177, edited by C. Buck, and A. Millard, pp. 43 – 82, Springer-Verlag, London.

Morales, J., Castañeda, C., Cárdenas, E., Goguitchaichvili, A. (2015). Evidencias sobre la edad de abandono del sitio arqueológico Plazuelas (Guanajuato, México) mediante la datación arqueomagnética de un piso quemado, *Arqueología Iberoamericana*, 28: 40–45.

Nachasova, I.E. and Burakov, K.S., (2011). Archeomagnetic Studies of Ceramics from the Archeological Monument in Ubeda, Spain. *Izv. Phys. Earth*, 47(12), 1086–1093.

Nagata, T. (1961). *Rock Magnetism*. Tokyo, Maruzen.

NAGATA, T., K. KOBAYASHI y E.J. SCHWARZ, 1965. Archeomagnetic intensity studies of South and Central America. *J. Geomag. and Geoelec.*, 17, 3-4, 399-405.

Néel, L. (1955), Some theoretical aspects of rock magnetism, *Adv. Phys.*, 4, 191–243.

Noël, M. and C.M. Batt, (1990). A method for correcting geographically separated remanence directions for the purpose of archaeomagnetic dating. *Geophys. J. Int.*, 102, 753 – 756.

Padilla, C. A. (2018). *Estudios Arqueomagneticos en El Cóporo, Guanajuato*.

Pavón Carrasco F. J., R. J. (2011). A Matlab tool for archeomagnetic dating. *Journal of Archeological Science* 38, 408-419.

Pavón Carrasco F.J., O. M. (2014). A Geomagnetic Field Model for the Holocene based on archeomagnetic and lava flow data. *Earth Planet Sci. Lett.* 388, 98-109.

Pavón-Carrasco, F. J., Gómez-Paccard, M., Hervé, G., Osete, M. L., and Chauvin, A. (2014b). Intensity of the geomagnetic field in Europe for the last 3ka: influence of data quality on geomagnetic field modeling. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, doi:10.1002/2014GC005311.

Pavón-Carrasco, F. J.-H. (2015). RECENT DEVELOPMENTS IN ARCHEOMAGNETISM: THE STORY OF THE EARTH'S PAST MAGNETIC FIELD.

Q&S, S. (Abril de 2017). *Socratic Q&S*. Obtenido de Socratic Q&S: <https://socratic.org/questions/what-is-the-source-of-earth-s-magnetic-field#400812>

Roy Thompson, F. O. (1986). *Environmental MAGNETISM*. Londres : Allen & Unwin.

- Soler-Arechalde, A. M. (2006). *Investigaciones arqueomagnéticas en México. Fundamentos. Historia y futuro*. Ciudad de México: Instituto de Geofísica, UNAM.
- Soler-Arechalde, A. M. (2014). Arqueomagnetismo en México 1965 - 2013. *Latinmag letters*.
- Tarling D.H., (1983). *Palaeomagnetism. Principles and applications in geology, Geophysics and archaeology*. Chapman and Hall, London: 379pp.
- Tema, E., I. Hedley and Ph. Lanos, (2006). Archaeomagnetism in Italy: a compilation of data including new results and a preliminary Italian secular variation curve. *Geophys. J. Int.* 167, 1160 – 1171.
- Tema, E., C. Fantino, E. Ferrara, A. Lo Giudice, J. Morales, A. Goguitchaichvili, P. Camps, F. Barello, and M. Gulmini (2013), Combined archaeomagnetic and thermoluminescence study of a brick kiln excavated at Fontanetto Po (Vercelli, Northern Italy), *J. Archaeol. Sci.*, 40, 2025 – 2035.
- Torreblanca, C., Alvarez, J., & Colon, I. (2013). Los materiales ceramicos del coporo y su contexto en la frontera septentrional de mesoamérica. 143-155.
- Torreblanca-Padilla, C. A. (2015). *El Cóporo. Una antigua ciudad bajo la nopalera*. Guanajuato, México.
- Torreblanca-Padilla C. A., Villalpando Alba A. (2015). Fases de ocupación prehispánica en torno a El Coporo, Guanajuato. En *Relaciones interregionales en el Centro Norte de Mesoamérica*, pp.157-173Ed. La Rana, IEC, Guanajuato, México.
- Wolfman, D., 1973. A re-evaluation of mesoamerican chronology : ad 1-1200. PhD Thesis, Colorado University, 293 pp.
- WOLFMAN, D., 1990. Mesoamerican chronology and archaeomagnetic dating, AD 1-1200. En: *Archaeomagnetic dating* Eghmy, J. L. y R. S. Sternberg editors, University of Arizona Press, Tucson.
- Zijderveld, J. D. A. (1967). AC demagnetization of rocks: Analysis of results, *Methods in Paleomagnetism* DW Collinson, KM Creer, SK Runcorn, 254–286.