



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Validación de la técnica de medición de radiocarbono en el  
Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con  
Aceleradores (LEMA) por medio del material estándar  
internacional y su aplicación en Arqueología

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Físico

PRESENTA:

Dulce Angélica Zugasti Fernández

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Corina Solís Rosales



Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Enero 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



---

## **Jurado Asignado**

---

Zugasti Fernández Dulce Angélica  
Tel: 47498028  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
306119464

Miembros del jurado  
Tutora: Dra. Corina Solís Rosales

Propietario: Dr. Efraín Rafael Chávez Lomelí

Propietaria: Dra. Julie Marie Caroline Gazzola

Suplente: Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga

Suplente: Dra. Rosalba Castañeda Guzmán

Título de la tesis: Validación de la técnica de medición de radiocarbono en el Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) por medio del material estándar internacional y su aplicación en Arqueología.

114 páginas

2017

Lugar donde se realizó la investigación: Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores, Instituto de Física, UNAM.



---

## Agradecimientos

---

A la Dra. Corina Solís Rosales por la dirección de la presente tesis, por su apoyo, su generosidad y por su tiempo.

A mis sinodales: a la Dra. Corina Solís Rosales, al Dr. Efraín Rafael Chávez Lomelí, a la Dra. Julie Marie Caroline Gazzola, a la Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga y a la Dra. Rosalba Castañeda Guzmán, por su amabilidad y su tiempo empleado para hacer las correcciones pertinentes a esta tesis.

A la Dra. María Rodríguez Ceja, al Fís. Arcadio Huerta Hernández y al Sr. Sergio Martínez González por su apoyo en las actividades del laboratorio.

Al Dr. Sergio Gómez Chávez y a la Dra. Julie Marie Caroline Gazzola y su equipo de trabajo por las muestras arqueológicas utilizadas en esta tesis.

A DGAPA UNAM (proyectos IG100313 y IG100216) por las becas otorgadas para la realización de este trabajo.

A CONACyT (proyectos 264245, 271802 y 205317 por el apoyo financiero para equipamiento y consolidación del LEMA.

Al Instituto de Física de la UNAM por todos los recursos y facilidades brindados para la realización de este trabajo.

A mis padres, por su amor, y por demostrarme que el trabajo duro siempre da buenos frutos, quiero agradecerles por nunca darse por vencidos con los retos que la vida les ha presentado, pues la forma en que los han afrontado ha sido el mejor ejemplo que podría tener. Gracias por enseñarme a nunca rendirme.

A mis hermanos, por abrirse camino en la vida y con su ejemplo mostrarme que existía un universo de posibilidades. Gracias por ser y darme motivación para alcanzar mis metas.

A mis amigos quienes han tenido la voluntad de estar a mi lado, y que han entendido, aceptado o compartido mi forma de ver la vida.

A todos los que han sido mis profesores, por compartir sus conocimientos y sabiduría, por ser inspiración para mí, por presentarme retos y darme su guía para superarlos. Por aquellos que

---

creyeron en mi, en especial mi profesor de primaria Alejandro, pues gracias a él me di cuenta de que nunca sería feliz si no cuestionaba constantemente todo lo que sucedía a mi alrededor.

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, por darnos la oportunidad de superarnos a todos aquellos que así lo deseemos, por brindarnos una educación en donde no se pierden de vista los valores humanos, y a la Facultad de Ciencias por enseñarme que realizar nuestros sueños es más difícil y satisfactorio que lo que podríamos imaginar, y que sólo existe un camino para llegar a ellos: el trabajo duro.

---

## **Dedicatoria**

---

*A mi familia*

*Fenrir incluido*

# Contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1 Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1. Formación del $^{14}\text{C}$	3
1.2. Ciclo del carbono	5
1.3. Materiales fechables	7
<b>2 Objetivos</b>	<b>9</b>
<b>3 Marco Teórico</b>	<b>11</b>
3.1. Descripción del sistema EMA	11
3.1.1. Espectrómetro de baja energía	15
3.1.2. La fuente de iones	15
3.1.3. El sistema de inyección	17
3.1.4. Acelerador	17
3.1.5. Espectrómetro de alta energía	19
3.1.6. Detector	19
3.2. Análisis de la medida $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	20
3.2.1. Estimación del error	20
3.2.2. Fraccionamiento isotópico	22
3.2.3. Variaciones de $^{14}\text{C}$ en la atmósfera	22
3.2.4. Materiales estándar	24
3.2.5. Edad radiocarbono	26
3.2.6. Variaciones debidas al campo magnético terrestre	26
3.2.7. Actividad Solar	27
3.2.8. Efecto Suess	27
3.2.9. El efecto <i>pico bomba</i>	27
3.2.10. Errores exactitud y precisión	28
3.2.11. Curvas de calibración	29
<b>4 Materiales y método</b>	<b>33</b>
4.1. Pretratamiento	33
4.1.1. Técnica ABA	34
4.1.2. Extracción de colágeno por el método Zurich	34
4.1.3. Pretratamiento para Celulosa	35
4.2. Grafitización	35
4.2.1. Analizador Elemental	36

4.2.2.	AGE III . . . . .	37
4.3.	Intercomparación . . . . .	39
4.4.	Material Estándar Internacional . . . . .	40
4.4.1.	Control interno del LEMA . . . . .	41
4.5.	EMA en Arqueología . . . . .	42
4.6.	Contexto arqueológico . . . . .	43
4.6.1.	Aspectos generales de la Ciudad de Teotihuacán . . . . .	45
4.6.2.	Mitología en Teotihuacán . . . . .	48
4.6.3.	Decadencia y abandono de Teotihuacán . . . . .	49
4.6.4.	La Ciudadela . . . . .	50
4.6.5.	El túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada . . . . .	53
4.6.6.	Muestras de la zona arqueológica de Teotihuacán . . . . .	54
4.7.	Uso del programa OxCal para el cálculo de las edades calendario . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>67</b>
5.1.	Resultados para el material estándar internacional . . . . .	67
5.1.1.	Resultados para VIRI F . . . . .	68
5.1.2.	Resultados para C7 . . . . .	70
5.1.3.	Resultados para C5 . . . . .	72
5.1.4.	Resultados para C4 . . . . .	74
5.1.5.	Resultados para C3 . . . . .	75
5.1.6.	Resultados para OXA II . . . . .	77
5.2.	Resultados de la comparación ETH Zurich-LEMA . . . . .	78
5.3.	Resultados de las muestras de la Ciudadela . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>91</b>
	<b>Apéndices</b>	<b>93</b>
.1.	Ley de decaimiento radiactivo. . . . .	93
.2.	Propagación del error . . . . .	95
.3.	Tablas de datos obtenidos para cada material estándar . . . . .	97
	<b>Referencias</b>	<b>111</b>

# Lista de figuras

1.1.	Cascada de partículas. (Fondo: Noche estrellada sobre el Ródano, de Vincent van Gogh.) . . .	4
1.2.	Formación del radiocarbono. . . . .	4
1.3.	Ciclo del carbono. . . . .	6
3.1.	Espectrómetro de masas con aceleradores empleado en el LEMA. . . . .	12
3.2.	Espacio fase donde se ubican las partículas buscadas . . . . .	14
3.3.	Diagrama que muestra las partes que componen el espectrómetro de masas con acelerador; en azul se muestra el espectrómetro de baja energía, en anaranjado el acelerador con su fuente, y en verde la zona del espectrómetro de alta energía. . . . .	15
3.4.	Diagrama de la fuente de iones [13] . . . . .	16
3.5.	Diagrama de la Lente Einzel [13] . . . . .	16
3.6.	Deflector electrostático [13] . . . . .	17
3.7.	Mecanismo Cockcroft-Walton para el acelerador por etapas (Tandem) [12] . . . . .	18
3.8.	Niveles de radiocarbono de 1950 a 2007 d.C., los niveles son expresados en términos de fracción moderna. . . . .	28
3.9.	Probabilidad de que la edad difiera de la edad media dada ( $\pm 1\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$ ) expresada en términos del error estándar $\sigma$ . La probabilidad de que la edad verdadera caiga dentro del intervalo está dada por el área bajo la curva para este intervalo; las probabilidades de la edad verdadera cayendo dentro de $\pm 1\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$ de la edad medida se indican en la parte superior [22]. . . . .	29
3.10.	<i>Meseta</i> en la curva de fechamiento por radiocarbono en 2400 – 2500 BP (700 BC y 400 BC), conocido como ‘ <i>meseta Hallstatt</i> ’ marcado en la curva de calibración INTCAL13 . . . . .	30
3.11.	Curva de calibración terrestre IntCal13, en la imagen se comparan las curvas IntCal 09 e IntCal13 (Fragmento) . . . . .	31
3.12.	Conversión de las edades radiocarbono convencionales a edades calendario utilizando la curva de calibración. A la edad radiocarbono A le corresponden 3 edades calendario. Para la edad B los límites del error $\pm\sigma$ aumentan la incertidumbre de la edad radiocarbónica correspondiente, esto sucede debido a la ‘meseta’ de la curva de calibración. . . . .	31
4.1.	Línea de grafitización [15]. . . . .	36
4.2.	Esquema de las conexiones del sistema AGE [15]. . . . .	37
4.3.	AGE III: 1– Entrada del AE 2– trampa de zeolita, 3– válvulas, 4– reactor, 5– enfriador Peltier, 6– horno [15]. . . . .	38
4.4.	Cronología de las fases arqueológicas de Teotihuacán [26]. . . . .	44
4.5.	Mapa de Teotihuacán [28]. . . . .	46
4.6.	Vista aérea del conjunto de la Ciudadela, foto hecha por Dra. Julie Gazzola. . . . .	51
4.7.	Templo de la Serpiente Emplumada. Fuente: foto tomada de internet, perteneciente a la revista Arqueología Mexicana. . . . .	52

4.8. Diagrama del túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada, vista aérea. Fuente: Ciclo de conferencias del proyecto Tlalocan, Gómez y Gazzola . . . . .	53
4.9. Diagrama del túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada, vista de perfil. Fuente: Ciclo de conferencias del proyecto Tlalocan, Gómez y Gazzola . . . . .	54
4.10. Muestra LEMA 160 . . . . .	57
4.11. Muestra LEMA 162 . . . . .	58
4.12. Muestra LEMA 163 . . . . .	58
4.13. Muestra LEMA 164 . . . . .	59
4.14. Muestra LEMA 165 . . . . .	59
4.15. Muestra LEMA 166 . . . . .	60
4.16. Muestra LEMA 167 . . . . .	60
4.17. Muestra LEMA 168 . . . . .	61
4.18. Muestra LEMA 182 . . . . .	61
4.19. Muestra LEMA 181 . . . . .	62
4.20. Ventana del programa OxCal. Archivo nuevo. . . . .	63
4.21. Ventana del programa OxCal. Captura de datos. . . . .	63
4.22. Ventana del programa OxCal. Guardar archivo. . . . .	64
4.23. Ventana del programa OxCal. Generación de gráficas. . . . .	64
4.24. Ventana del programa OxCal. Generación de imágenes. . . . .	65
5.1. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar VIRI F	68
5.2. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar VIRI F corregida . . . . .	69
5.3. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C7 .	70
5.4. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C7 corregida . . . . .	71
5.5. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C5 .	72
5.6. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C5 corregida . . . . .	73
5.7. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C4 .	74
5.8. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C3 .	75
5.9. Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C3 corregida . . . . .	76
5.10. Gráfica de fecha de análisis vs Fracción moderna (Fm) para el material estándar OXA II	77
5.11. Gráfica de los resultados obtenidos en porcentaje de carbono moderno pCM, ETH Zurich en azul, LEMA en rojo . . . . .	78
5.12. Gráfica de los resultados obtenidos en pCM ETH contra LEMA . . . . .	79
5.13. Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras analizadas entre el LEMA y el ETH, para las muestras de la Ciudadela . . . . .	82
5.14. Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, primera parte. . . . .	83
5.15. Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, segunda parte. . . . .	84
5.16. Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, tercera parte. . . . .	85
5.17. Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, cuarta parte. . . . .	85

5.18. Muestras analizadas sobre la línea de tiempo de acuerdo a la cronología de Rattray (en [26], ordenadas según la edad obtenida). (Primera parte). . . . .	86
5.19. Muestras analizadas sobre la línea de tiempo de acuerdo a la cronología de Rattray (en [26], ordenadas según la edad obtenida). (Segunda parte). . . . .	86

# Lista de tablas

1.1. Reacciones que producen radiocarbono [3] . . . . .	5
3.1. Algunos valores típicos de $\delta^{13}\text{C}$ . . . . .	23
4.1. Medida de la cantidad de muestra utilizadas en el LEMA . . . . .	39
4.2. Población aproximada de Teotihuacán para diferentes fases ( en [29]) . . . . .	45
5.1. Valores de consenso de los materiales estándar . . . . .	67
5.2. Edades radiocarbono y edades calendario para las muestras de la Ciudadela. . . . .	80
5.3. Edades radiocarbono y edades calendario para las muestras de la Ciudadela . . . . .	81
5.4. Edades calendario para las muestras de la Ciudadela, resultados ordenados por capas estratigráficas (Parte 1) . . . . .	88
5.5. Edades calendario para las muestras de la Ciudadela, resultados ordenados por capas estratigráficas (parte 2) . . . . .	89
.1. Datos obtenidos para el material estándar VIRI F . . . . .	97
.2. Datos obtenidos para el material estándar VIRI F . . . . .	98
.3. Datos obtenidos para el material estándar C7 . . . . .	99
.4. Datos obtenidos para el material estándar C7 . . . . .	100
.5. Datos obtenidos para el material estándar C5 . . . . .	101
.6. Datos obtenidos para el material estándar C5 . . . . .	102
.7. Datos obtenidos para el material estándar C4 . . . . .	102
.8. Datos obtenidos para el material estándar C4 . . . . .	102
.9. Datos obtenidos para el material estándar C3 . . . . .	103
.10. Datos obtenidos para el material estándar C3 . . . . .	104
.11. Datos obtenidos para el material estándar OXA II . . . . .	105
.12. Datos obtenidos para el material estándar OXA II . . . . .	106
.13. Datos obtenidos para el material estándar OXA II . . . . .	107
.14. Datos obtenidos para el material estándar OXA II . . . . .	108
.15. Datos obtenidos para el material estándar OXA II . . . . .	109
.16. Datos obtenidos para el material estándar OXA II . . . . .	110



---

## Introducción

---

El Laboratorio Nacional de Espectrometría con Aceleradores (LEMA) inició labores hacia el año 2013, en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México, convirtiéndose en el primero en su tipo en México y Latinoamérica. Esta tesis muestra distintos aspectos del desarrollo que ha tenido el LEMA en sus primeros tres años de existencia.

En este laboratorio es posible realizar el análisis de distintos isótopos, tales como  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{129}\text{I}$  y Pu. Sin embargo aunque es posible medir distintos isótopos, este trabajo se enfoca particularmente en la medida del  $^{14}\text{C}$ , por ello se inicia con una descripción del isótopo de estudio, pues conocer los por menores de su naturaleza permite la aplicación de la técnica sobre el mismo.

Después describen los principios de operación del sistema EMA, la Física involucrada en la teoría del desarrollo del sistema; la obtención de los cocientes ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) y ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) los cuales, como veremos más adelante, son las cantidades indispensables para el cálculo de la edad radiocarbónica. También veremos las consideraciones que deben ser tomadas en cuenta al transformar las edades radiocarbónicas a edades calendario.

Paralelamente a la instalación del sistema EMA ha sido necesario desarrollar distintas metodologías de preparación de muestras, las cuales incluyen la limpieza de las muestras, su combustión y grafitización, es en este paso donde se obtiene el carbono en forma de grafito, pues ésta es la forma óptima en la que su contenido de  $^{14}\text{C}$  puede medirse dentro del sistema EMA. Dichos métodos se mencionan en ésta tesis para cada tipo diferente de material que se desee datar.

Para verificar que los protocolos empleados son correctos en los laboratorios de preparación de muestras y en el análisis de  $^{14}\text{C}$  en el sistema EMA, se presentarán los ejercicios de validación que son llevados a cabo en el LEMA, los cuales se realizan continuamente. Esto sucede de la siguiente manera: al introducir una muestra al análisis EMA paralelamente se analiza una serie de muestras estándar, de esta forma se garantiza la reproducibilidad de los resultados. Las muestras estándar son adquiridas en el Organismo Internacional de Energía Atómica (AIEA, por sus siglas en inglés), así como en ejercicios de intercomparación internacional donde dichas muestras son repartidas en aquellos laboratorios que deseen participar, y que al finalizar el ejercicio éstas se convierten en los patrones de referencia.

Como caso de estudio particular, en esta tesis se aplica la técnica para la medida de muestras arqueológicas, dado que la riqueza cultural de nuestro país es vasta, y el análisis de  $^{14}\text{C}$  resulta ser una herramienta fundamental en el entendimiento del pasado, pues sus aplicaciones van desde la datación de piezas arqueológicas hasta objetos de arte contemporáneo, entre muchas otras. Por tanto en el LEMA recae el deber del uso de esta infraestructura para llevar a cabo el estudio de nuestra cultura, es por ello que uno de los primeros proyectos que se realizaron en estas instalaciones fue el análisis de las muestras provenientes de uno de los sitios arqueológicos más importantes de nuestra nación, Teotihuacán.

En la segunda parte de la tesis se abordará la aplicación de la datación con  $^{14}\text{C}$  al estudio de material recolectado en el túnel descubierto bajo la pirámide de la Serpiente Emplumada, en el sitio arqueológico de la Ciudadela en Teotihuacán. Este túnel fue descubierto en 2005 por el

equipo de los arqueólogos el Dr. Sergio Gómez y la Dra. Julie Gazzola. Ha sido excavado y hasta la fecha se han recuperado mas de 60 mil objetos. Algunos de estos materiales fueron fechados en el LEMA y los resultados son presentados en este trabajo. Dichos resultados podrán servir para establecer la cronología de varios eventos ocurridos en el túnel, siendo complementada con otras técnicas de datación, eventos como su construcción, uso, clausuras y reaperturas y finalmente, su clausura definitiva.

# CAPÍTULO 1

---

## Antecedentes

---

La característica que nos permite distinguir un elemento químico de otro es la cantidad de protones en su núcleo. Un isótopo de un elemento químico es aquel con el mismo número atómico, pero con distinto peso atómico (mismo número de protones, pero diferente cantidad de neutrones). Existen tres isótopos naturales del carbono, los cuales se conocen como  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  y  $^{14}\text{C}$ . Estos isótopos no se encuentran en la misma proporción, 99 % del carbón presente en la naturaleza es  $^{12}\text{C}$ , 1 % es  $^{13}\text{C}$ , pero solamente una parte por millón de millón de carbono moderno corresponde a  $^{14}\text{C}$  [1]. La principal propiedad que caracteriza al  $^{14}\text{C}$  es su radiactividad, por lo cual también se le conoce con el nombre de radiocarbono.

### 1.1. Formación del $^{14}\text{C}$

El radiocarbono se produce en la atmósfera de la Tierra debido al efecto de los rayos cósmicos, estos son núcleos de átomos despojados de sus electrones, que provienen del espacio exterior y son producidos por la explosión de supernovas, o bien de la actividad solar. Los rayos cósmicos primarios están formados de protones, partículas  $\alpha$  y núcleos más pesados. Los rayos cósmicos que logran llegar a la atmósfera tienen que pasar a través de la heliósfera y el campo magnético de la Tierra, los cuales tienen la capacidad de desviarlos, es por ello que sólo logran atravesar aquellos con energías muy altas, mayores a 1 GeV [2].

La producción de isótopos cosmogénicos en la atmósfera requiere que un elemento se transforme en otro, para ello es necesario cambiar el número de nucleones de un átomo atmosférico. Ya que los principales componentes de la atmósfera son nitrógeno y oxígeno, la mayoría de los isótopos cosmogénicos son de masas menores a 16. De modo que casi todo el  $^{14}\text{C}$  se produce a partir de nitrógeno atmosférico  $^{14}\text{N}$ . La energía cinética de un rayo cósmico es más grande que la energía de unión de los núcleos de los átomos, y consecuentemente los rayos cósmicos primarios alfa y otros más pesados se dividen en sus nucleones componentes durante la primera interacción con la atmósfera. Estos a su vez continúan sus caminos independientemente, y cada uno genera su propia cascada.

Con respecto a las partículas secundarias, podemos distinguir entre una componente nucleónica (n, p), una componente mesónica ( $\pi^0$ ,  $\pi^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ), y una componente electromagnética ( $e^\pm$ ,  $\gamma$ ). La componente nucleónica consiste en protones y neutrones de alta energía resultado de interacciones nucleón-nucleón, los cuales originan la desintegración del núcleo que es golpeado por los rayos cósmicos, y dan como resultado nucleones secundarios. En la atmósfera, neutrones y protones dominan la producción isótopos cosmogénicos [2], [3] (Figura 1.1).

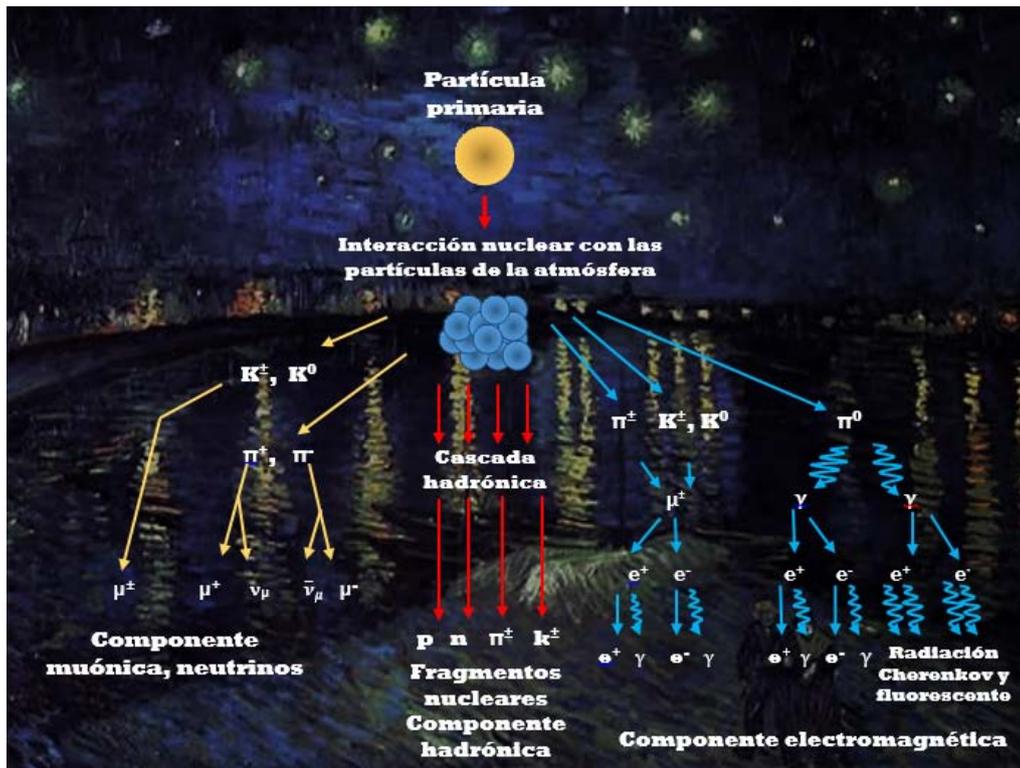


Figura 1.1: Cascada de partículas. (Fondo: Noche estrellada sobre el Ródano, de Vincent van Gogh.)

De este modo, el bombardeo continuo de la atmósfera por parte de los rayos cósmicos produce neutrones secundarios libres. El 90% de las desintegraciones nucleares que generan  $^{14}\text{C}$  son causadas por neutrones térmicos libres, es decir con energías de  $1/40$  eV, que interactúan con los átomos de la estratosfera. Algunos de ellos como el oxígeno, son prácticamente inertes ante esta situación, pero otros como el nitrógeno ( $^{14}\text{N}$ ) son altamente reactivos, y como consecuencia forman  $^{14}\text{C}$ , emitiendo a su vez protones libres en el 99% de las veces y tritio en el 1% restante. Cuando un neutrón alcanza el núcleo de un átomo de  $^{14}\text{N}$  éste despiden un protón del núcleo, de este modo se forma el  $^{14}\text{C}$  [3] (Figura 1.2).

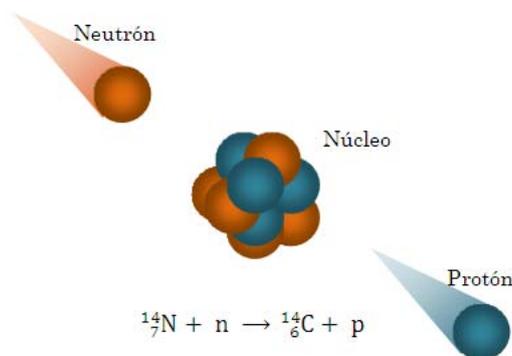


Figura 1.2: Formación del radiocarbono.

La tasa de producción de  $^{14}\text{C}$  debida a los rayos cósmicos varía de dos a tres neutrones por centímetro cuadrado de la superficie terrestre por cada segundo:  $2,47 \pm 0,19 \text{ ncm}^2/\text{seg}^{-1}$  durante los mínimos solares y de  $2,02 \pm 0,13 \text{ ncm}^2/\text{seg}^{-1}$  durante los máximos solares, con un promedio de  $2,38 \pm 0,13 \text{ ncm}^2/\text{seg}^{-1}$ . Las principales reacciones químicas que pueden producir  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera terrestre se muestran en la Tabla 1.1.

Reacción	Energía liberada	Abundancia isotópica relativa
$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$	0,63 MeV	1
$^{16}\text{O} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + ^3\text{He}$	14,60 MeV	0,269
$^{15}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + ^2\text{H}$	7,98 MeV	0,0037
$^{17}\text{O} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + \alpha$	1,82 MeV	0,000099
$^{13}\text{C} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + \gamma$	8,17 MeV	0,0000023
Espalación de $^{20}\text{Ne}^{21}\text{Ne}^{22}\text{Ne}$	— — —	0,000012

Tabla 1.1: Reacciones que producen radiocarbono [3]

El  $^{14}\text{C}$  se oxida en cuestión de horas formando moléculas de monóxido de carbono ( $^{14}\text{CO}$ ), que se mantienen en la atmósfera por casi un siglo, tiempo suficiente para mezclarse homogéneamente en la tropósfera, luego de lo cual se oxidan nuevamente para formar moléculas de dióxido de carbono ( $^{14}\text{CO}_2$ ) [4], [5].

## 1.2. Ciclo del carbono

El carbono del planeta se almacena en cinco grandes depósitos: las reservas geológicas, los océanos, la atmósfera, los suelos, y la biomasa vegetal.

El conjunto de átomos que componen el sistema de la Tierra se ha conservado más o menos desde el origen de la Tierra. Los átomos, en forma de diversas moléculas, migran continuamente entre los diferentes embalses del sistema. Un ciclo geoquímico se refiere al flujo de elementos a través de los depósitos de la Tierra, en este caso nos referimos al ciclo del carbono.

Para medir la cantidad de  $\text{CO}_2$  en el ambiente a través del tiempo, los científicos utilizan el  $\text{CO}_2$  atrapado en núcleos de hielo para medir su concentración. Las mediciones muestran que las concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  han aumentado de 280 ppmv (partes por millón por volumen) en la época preindustrial a 365 ppmv en la actualidad [5]. Es decir las emisiones antropogénicas tienen un impacto importante en la producción de  $\text{CO}_2$  debido a la quema de combustibles fósiles [6]. Aproximadamente la mitad del dióxido de carbono antropogénico o se disuelve en el agua del mar y se mezcla en el océano profundo, o bien es absorbido por los ecosistemas terrestres mientras que la otra mitad permanece en la atmósfera.

Los tiempos de residencia del agua son mayores de 18 años para la capa de mezcla oceánica (capa superficial), 40 años para el océano intermedio, y 120 años para el océano profundo, por lo que el equilibrio de todo el océano en respuesta a un cambio en el  $\text{CO}_2$  atmosférico se lleva a cabo en una escala de tiempo del orden de 200 años [5].

Esta escala de tiempo es relativamente larga para la mezcla oceánica, lo cual implica que el  $\text{CO}_2$  liberado en la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles durante el siglo pasado no ha tenido tiempo para equilibrarse con todo el océano.

El ciclo de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera con la biosfera implica procesos de fotosíntesis y la respiración en plantas, así como la descomposición microbiana. Las plantas superiores adquieren  $\text{CO}_2$

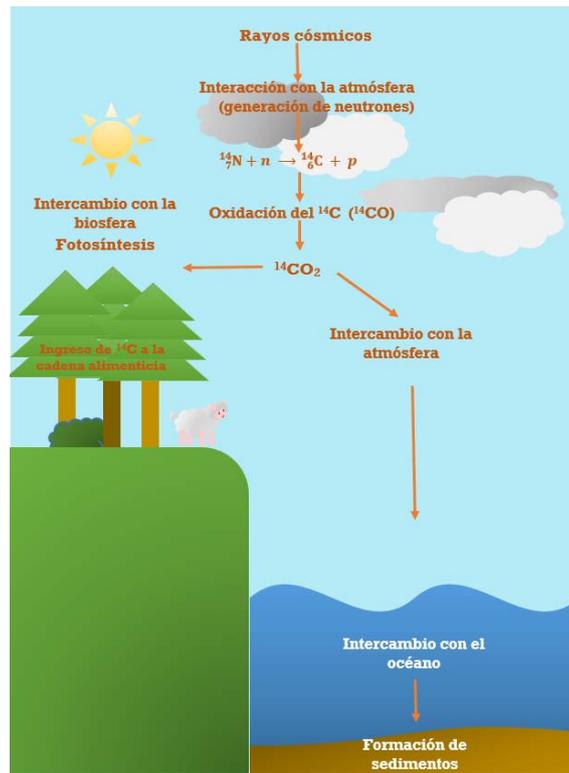


Figura 1.3: Ciclo del carbono.

por difusión a través de poros diminutos en sus hojas, llamados estomas, y con ello realizan la fotosíntesis. La cantidad de  $\text{CO}_2$  que es absorbida por las plantas es más de un tercio del que se encuentra disponible en la atmósfera. Los experimentos realizados en laboratorios y al aire libre bajo condiciones controladas muestran que el aumento de  $\text{CO}_2$  no estimula el crecimiento de las plantas [5].

La eliminación definitiva de la adición de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles requiere transferencia de carbono oceánico a la litosfera por la formación de sedimentos, cerrando así el ciclo del carbono. La escala de tiempo para esta transferencia se define por el tiempo de vida de carbono en el conjunto de la atmósfera, la biosfera, el suelo y embalses oceánicos, obteniendo un valor de 170 mil años [5] (Figura 1.3).

Para fines prácticos podemos decir que existe un estado de equilibrio entre la tasa de producción y de decaimiento del contenido de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera el cual se alcanza justamente mediante los procesos de intercambio de  $^{14}\text{CO}_2$  entre los distintos depósitos de la Tierra. Por lo tanto en principio existen niveles constantes de  $^{14}\text{C}$  en todos los seres vivos [6]. Aunque más adelante veremos cómo se tratan las variaciones en la concentración de  $^{14}\text{C}$  que pudieran existir.

Como se mencionó, el  $^{14}\text{C}$  entra a la cadena alimenticia mediante la fotosíntesis. Así cuando una planta o un animal mueren, estos cesan de participar en el intercambio de carbón con la biósfera y por ello dejan de absorber  $^{14}\text{C}$ . Si el  $^{14}\text{C}$  fuera estable, su concentración debería permanecer constante después de la muerte, ya que no es así, los niveles caen a una tasa determinada por *la ley de decaimiento radiactivo* (ver apéndice 1).

Con esta ley podemos relacionar la cantidad de átomos restantes  $A$  después de un tiempo  $t$

para un número inicial  $A_0$  al tiempo  $t = 0$ , la ecuación es la siguiente

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

donde  $\lambda$  es una constante igual al recíproco de la vida media  $\tau$  [7]. A partir de esta ecuación se obtiene la edad radiocarbono, la cual se puede expresar como sigue

$$t = \frac{-1}{\lambda} \ln \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (1.2)$$

Como se puede ver en el apéndice 1, existe una cantidad que se deriva de la ecuación (1.1), que se conoce como el tiempo de vida promedio y está dado por

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \approx \frac{T_{1/2}}{0,693} \quad (1.3)$$

donde  $T_{1/2}$  es la vida media del elemento. La vida promedio y la vida media son específicas para cada átomo radiactivo en particular, y para  $^{14}\text{C}$  la mejor estimación de  $T_{1/2}$  es de 5730 años. Sin embargo, por razones históricas, la vida media que se usa convencionalmente para el cálculo de las edades radiocarbono es la vida media Libby, la cual es de 5568 años y es 3% más pequeña que la mejor estimada, la vida promedio correspondiente es de 8033 años [1]. Por lo que la edad radiocarbono se calcula como

$$t = -8033 \ln \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (1.4)$$

En principio, si el número de átomos de  $^{14}\text{C}$  restante y el número inicial o de equilibrio puede ser evaluado experimentalmente, entonces el tiempo que ha transcurrido desde la muerte del material a fechar puede ser determinado. Para un hueso excavado en un sitio arqueológico éste provee un estimado desde la muerte del animal, aunque no debe asumirse necesariamente para fechar la era del contexto (por ejemplo, una capa estratigráfica) en la cual el hueso fue encontrado [1]. Sin embargo existe una corrección a esta expresión debido a efectos de cambio en la concentración de  $^{14}\text{C}$  en la muestra, por lo que más adelante explicaremos cómo debe realizarse dicha corrección.

Existen tres métodos de medición del  $^{14}\text{C}$ . El método convencional y el método de conteo proporcional por gas, los cuales detectan la actividad de la muestra, esto es, el número de electrones emitidos por el decaimiento beta del radiocarbono por unidad de tiempo y peso de la muestra. El otro método, espectrometría de masas con acelerador (EMA), es una técnica que detecta directamente el número o la proporción del número de átomos de  $^{14}\text{C}$  en la muestra, relativa a los átomos de  $^{13}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$ . Los tres realizan mediciones similares sobre referencias de materiales estándar modernos para establecer la actividad inicial o proporción de concentración de  $^{14}\text{C}$ .

### 1.3. Materiales fechables

En general, los materiales que pueden ser fechados por radiocarbono son aquellos que una vez formaron parte de la biósfera y por lo tanto son orgánicos. Para poder fechar una muestra es importante el estado de preservación de la misma, pues la preservación puede ser afectada, por ejemplo, por carbonización con carbón de origen vegetal. La mayor parte del material a fechar consiste en huesos y todo aquello que pueda contener colágeno, pues esta proteína es la que conserva mejor el carbono durante más tiempo a diferencia de otros tejidos; así, cuernos, astas, dientes, marfil, son material fechable. Otros materiales tales como tejidos blandos, cabello, residuos de sangre, papel, piel, plantas, entre otros, también pueden ser fechados, incluso sedimentos y suelos, aunque las

## 1. ANTECEDENTES

---

fuentes de carbón dentro de muchos y diversos materiales son raramente fechadas para propósitos arqueológicos.

En algunos casos es posible fechar materiales que no han sido parte de la biósfera, si su formación envuelve incorporación de carbón con una concentración de  $^{14}\text{C}$  que puede asumirse en equilibrio con la atmósfera.

## CAPÍTULO 2

---

### Objetivos

---

Durante los primeros tres años de vida del LEMA se han recibido cientos muestras provenientes de diferentes sitios, y han sido fechados para diferentes propósitos. Sin embargo es deber del LEMA garantizar la reproducibilidad y precisión de sus análisis para asegurar a los usuarios la confianza de que los resultados que reciben son de calidad. Esto ocurre no sólo en el LEMA, sino en todos los laboratorios donde se aplican las técnicas de datación por  $^{14}\text{C}$ . Por tal motivo, desde que el método de datación por  $^{14}\text{C}$  fue propuesto en 1946 por Williard F. Libby, se han elegido diferentes materiales que sirven como estándares internacionales de referencia para llevar a cabo las mediciones de  $^{14}\text{C}$ , y comparar así las edades obtenidas en cada laboratorio con las que se espera deba tener cada material de referencia. Dichas mediciones se llevan a cabo en el LEMA continuamente, de esta forma el objetivo de esta tesis es la validación de las mediciones de estándares internacionales. Para ello se toman todas las mediciones de estos materiales realizadas en el LEMA durante sus primeros tres años y se comparan los resultados obtenidos con los valores esperados para cada material de referencia. De lograrse este objetivo a su vez se cumplirá con el objetivo de validar el método de medición en el LEMA. Pues en caso contrario se deberá evaluar los protocolos que se ejecutan en cada parte del procedimiento de tratamiento y medición de las muestras.

Como un ejercicio interno, en el LEMA se llevó a cabo una intercomparación entre nuestros resultados con los obtenidos en el laboratorio del mismo tipo en el ETH, Zurich. De modo que un objetivo más de esta tesis es verificar que los resultados entre ambos laboratorios sean consistentes.

En esta tesis se toma como caso de estudio el sitio arqueológico de Teotihuacán, particularmente las muestras encontradas en el túnel bajo del Templo de la Serpiente Emplumada, en donde no sólo se hace la aplicación de la técnica, sino también se transforman las edades radiocarbono por edades calendario, por lo cual se tiene como objetivo verificar que estas edades caen dentro del intervalo de ocupación del sitio.

El LEMA es un laboratorio en el que se llevan a cabo diversos estudios de importancia tanto científica como social. Puesto que los procedimientos y las aplicaciones que realiza el LEMA son variadas, la intervención de científicos y estudiantes de distintas disciplinas es fundamental. Es por ello que uno de los objetivos de esta tesis es presentar los conceptos básicos que son necesarios para el entendimiento de la técnica, tomando en cuenta especialmente a los futuros estudiantes que deseen realizar sus actividades de servicio social y titulación en el LEMA, este trabajo busca facilitar su consolidación como parte del equipo de trabajo del laboratorio.

Por lo anterior podemos enumerar los principales objetivos de esta tesis de la siguiente forma:

- Validar el método de la medida de  $^{14}\text{C}$  en el LEMA por medio de la validación de las mediciones de estándares internacionales

## 2. OBJETIVOS

---

- Validar los resultados obtenidos en el LEMA mediante la comparación de los mismos con los obtenidos en el laboratorio del mismo tipo en el ETH Zurich para las mismas muestras.
- Llevar a cabo la calibración a fechas calendario para las muestras correspondientes al sitio arqueológico de la Ciudadela, Templo de la Serpiente Emplumada, y hacer un análisis de los resultados.
- Que la presente tesis sirva como una introducción a la técnica de medida de radiocarbono para futuros estudiantes del LEMA.

# CAPÍTULO 3

---

## Marco Teórico

---

Esta tesis describe la técnica de espectrometría de masas con acelerador (EMA) la cual se puede emplear, entre otras cosas, para realizar fechamiento de muestras, utilizando para ello el isótopo radiactivo de carbono ( $^{14}\text{C}$ ) con el cual, debido a su naturaleza radiactiva, es posible fechar muestras con una antigüedad de hasta 50,000 años [1].

### 3.1. Descripción del sistema EMA

La espectrometría de masas con acelerador (EMA) es una técnica ultra sensitiva para el conteo de átomos individuales.

En el Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Acelerador (LEMA) del Instituto de Física de la UNAM, se lleva a cabo el conteo de átomos de  $^{14}\text{C}$ . Una de las principales características que destacan a la técnica de EMA sobre otras técnicas de datación es su alta precisión. Por ejemplo la edad una muestra con una antigüedad de 10,000 años puede ser determinada con una precisión del 0,5 % a 0,3 % en tan sólo unos minutos y con apenas 1 mg de muestra.

La técnica EMA surge de los laboratorios de física nuclear de baja energía a finales de los años 70's. Su desarrollo fue producto de la necesidad de llevar a cabo la datación de muestras cada vez más pequeñas empleando un método de conteo de decaimiento bien determinado.

Existen  $6 \times 10^{10}$  átomos de  $^{14}\text{C}$  en 1 g de muestra de carbono moderno. De éstos, sólo 14 decaen por minuto. Para lograr una precisión estadística del 0,5 % con la técnica de conteo de decaimiento es necesario contar por 48 h. En contraste, las tasas de conteo de  $^{14}\text{C}$  en un sistema EMA son de  $\sim 100\text{s}^{-1}$ , por lo cual se puede lograr la misma precisión con tan sólo 10 min de conteo, y una muestra de apenas 1 mg es todo lo que se requiere [9], [11].

La técnica EMA combina la alta eficiencia de la espectrometría de masas con una excelente discriminación contra las interferencias isobáricas y moleculares, lo cual se logra debido a:

- El uso de iones negativos.
- La disociación de iones moleculares y el proceso de desprendimiento de electrones de iones atómicos a estados de carga altamente positivos (**stripping**), después de la primera etapa de aceleración.
- El empleo de una segunda etapa de aceleración seguida por una identificación de iones individuales.



Figura 3.1: Espectrómetro de masas con aceleradores empleado en el LEMA.

El funcionamiento del espectrómetro de masas con acelerador, puede ser descrito brevemente como sigue:

- Iones negativos son generados a partir de una muestra mediante una fuente de bombardeo de átomos de cesio (Cs), pre-acelerados de 30 a 200 keV, posteriormente su masa es analizada mediante un imán.
- Los iones negativos que han sido analizados son acelerados a una terminal positiva de alto voltaje del acelerador, donde se encuentran con gas a baja presión. Muchos electrones son desprendidos, convirtiendo los iones atómicos negativos en múltiples iones cargados positivamente, y causando que los iones moleculares negativos se disocien en los átomos que los componen, los cuales también resultan cargados positivamente.
- Los iones ahora se encuentran cargados positivamente y son por lo tanto acelerados de nuevo a un potencial de base en la segunda etapa del acelerador por etapas (tandem accelerator). Un análisis magnético subsecuente selecciona los iones de interés con una combinación bien definida de carga y energía, y los dirige a un detector el cual determina generalmente la masa atómica y el número atómico de los iones individuales. Tal identificación es necesaria puesto que otros isótopos podrían llegar al detector. Alguna cantidad de fragmentos moleculares también pueden llegar al detector, como resultado de las colisiones que causan un cambio de carga con las moléculas del gas residual durante la segunda etapa de aceleración. Muchos sistemas EMA por lo tanto incorporan un filtro de velocidad o un analizador electrostático para remover los iones de fondo.
- Generalmente, la técnica EMA determina la proporción de isótopos raros para un isótopo abundante del mismo elemento,  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  por ejemplo, esto se lleva a cabo acelerando los iones del isótopo o isótopos abundantes, como también los isótopos raros. Mientras los últimos son analizados individualmente, los primeros (los cuales son típicamente  $10^{12}$  veces más abundantes) deben ser medidos como una corriente eléctrica en una caja de Faraday. Varios esquemas han sido ideados, y estos pueden ser en general clasificados en métodos de inyección simultáneos o secuenciales [10].

El objetivo del espectrómetro de masas es el de separar átomos con diferentes masas y medir sus abundancias relativas, a partir del comportamiento de las partículas dentro de los campos eléctricos y magnéticos.

El radio de circunferencia que describen los iones al entrar a un campo magnético depende de la masa del ion. Los iones con mayor masa describirán trayectorias circulares de radios mayores. Sabemos que la magnitud de la fuerza de magnética  $F$  está dada por:

$$F = qBv \quad (3.1)$$

Donde  $q$  es la carga de la partícula,  $B$  es la magnitud de campo magnético y  $v$  la velocidad de la partícula. Esta fuerza es igual a la fuerza centrípeta que se requiere para mantener a una partícula en movimiento circular

$$F = \frac{mv^2}{r} = Bqv \quad (3.2)$$

Donde  $r$  es el radio que describe la partícula y  $m$  la masa de la partícula. La energía cinética de la partícula está relacionada con el potencial  $V$  al que es sometida por

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = qV \quad (3.3)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene el radio de la circunferencia que describen los diferentes isótopos

$$r = \frac{\sqrt{2mqV}}{Bq} \quad (3.4)$$

Como  $E_{cin} = qV$ , entonces la ecuación anterior queda como

$$r = \frac{\sqrt{2mE_{cin}}}{Bq} \quad (3.5)$$

De aquí podemos definir a la rigidez magnética como el producto  $rB$ . También es posible saber la resonancia de ciclotrón dada por

$$\frac{\omega}{B} = \frac{q}{M} \quad (3.6)$$

En un razonamiento similar se puede obtener la cantidad llamada rigidez eléctrica  $r\varepsilon$  donde  $\varepsilon$  representa el campo eléctrico. Tenemos que la fuerza eléctrica está dada por

$$F = q\varepsilon \quad (3.7)$$

Utilizando las ecuaciones (3.2) y (3.7) se obtiene la rigidez eléctrica dada por

$$\varepsilon r = \frac{2E}{q} \quad (3.8)$$

De lo anterior se tiene que un selector de velocidades tiene la siguiente ecuación

$$v = \frac{\varepsilon}{B} \text{ o bien } v^2 \propto \frac{E/q}{m/q} \quad (3.9)$$

Esto es necesario pues las componentes del espectrómetro de masas con acelerador empleado en el LEMA funciona bajo estos principios físicos: el deflector magnético utiliza la ecuación (3.5), el deflector eléctrico la ecuación (3.8), el filtro de Wien la ecuación (3.9) y la frecuencia de ciclotrón se calcula mediante la ecuación (3.6), a continuación detallaremos la descripción de dichas componentes. Para llevar a cabo la selección de partículas se requiere de un acoplamiento

### 3. MARCO TEÓRICO

---

de estas componentes, para representar dicho acoplamiento se puede emplear el siguiente espacio fase.

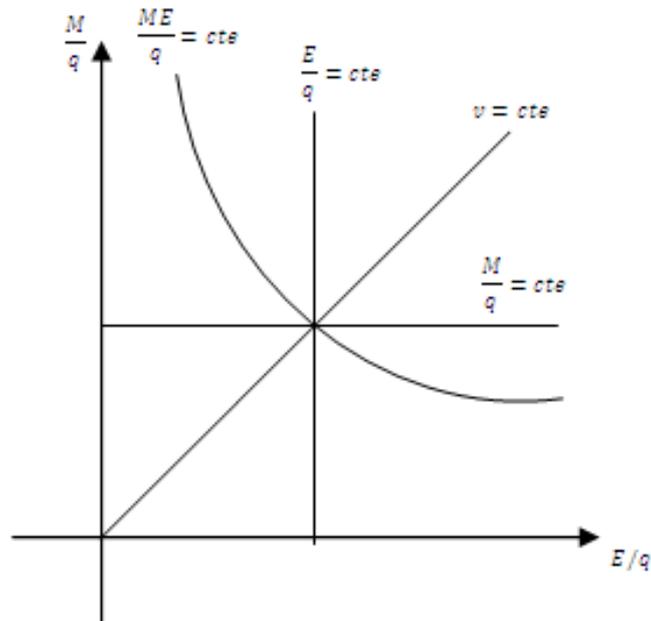


Figura 3.2: Espacio fase donde se ubican las partículas buscadas

Es decir, las partículas que deseamos medir son seleccionadas para su detección al cumplir con los parámetros de masa, carga y energía.

Podemos dividir en tres secciones el proceso de medición en el acelerador: un espectrometro de baja energía, el espectrometro de alta energía y la zona de detección (Figura 3.3).

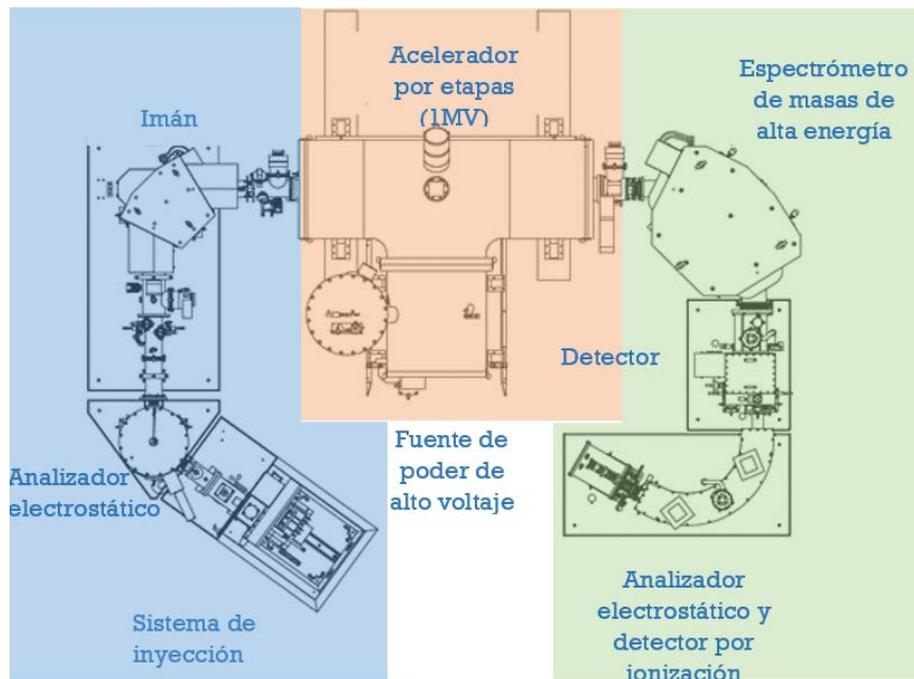


Figura 3.3: Diagrama que muestra las partes que componen el espectrómetro de masas con acelerador; en azul se muestra el espectrómetro de baja energía, en anaranjado el acelerador con su fuente, y en verde la zona del espectrómetro de alta energía.

### 3.1.1. Espectrómetro de baja energía

### 3.1.2. La fuente de iones

Los sistemas EMA basados en un acelerador por etapas (tandem) emplean una fuente de iones la cual utiliza un haz de iones de  $\text{Cs}^+$  para realizar el proceso de erosión catódica (sputtering) al material de la muestra. La fuente de iones utilizada en el LEMA cuenta con una capacidad de 50 cátodos en el carrusel donde las muestras a analizar son introducidas, cada una de estas muestras será expuesta a la ionización. Muchos laboratorios ahora poseen fuentes las cuales utilizan un ionizador parabólico caliente de tantalio que se encuentra a  $-27.72 \text{ kV}$  recibiendo una corriente de  $17.9 \text{ A}$ , y la muestra dentro de un volumen que contiene vapor de Cs. Algo de este vapor es ionizado en la superficie del tantalio mediante termoionización, para crear un haz de iones de  $\text{Cs}^+$  el cual es enfocado en la muestra debido a este ionizador parabólico. Al mismo tiempo, el vapor de Cs baña la superficie de la muestra que se encuentra en el portacátodos el cual se encuentra a un potencial de  $-35 \text{ kV}$ , de esta manera se forman iones tanto positivos como negativos, sin embargo a la salida de la fuente de iones se encuentra un electrodo de extracción, de modo que únicamente las partículas con carga negativa se dirigen al electrodo, el cual se encarga de acelerar dichos iones, de este modo se crea un haz de iones negativos, un diagrama de esta componente se muestra en la Figura 3.4.

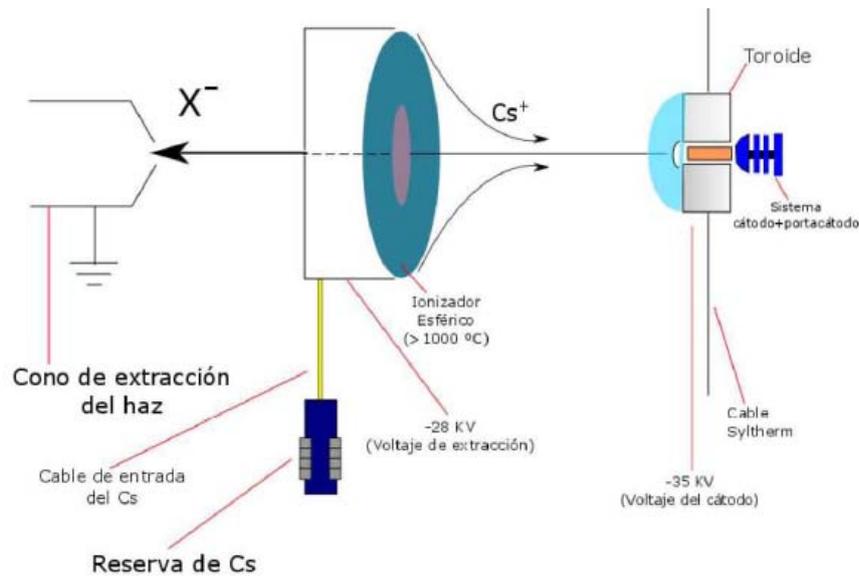


Figura 3.4: Diagrama de la fuente de iones [13]

El haz atraviesa una lente Einzel que es una lente electrostática, la cual está compuesta por tres cilindros, el cilindro central se mantiene a un potencial de manera que no haya cambio de energía en los iones y además cumpla con la función de mantener enfocado el haz en su trayectoria, el valor óptimo de dicho potencial es de  $-20.7\text{ V}$  (Figura 3.5).

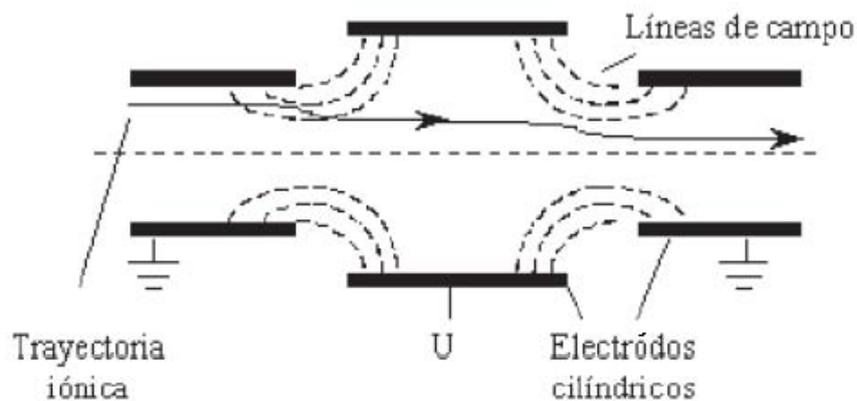


Figura 3.5: Diagrama de la Lente Einzel [13]

Un deflector electrostático esférico (Figura 3.6) realiza la primera selección de iones según su carga, energía y momento. Este se compone de dos placas paralelas, las cuales se encuentran a cierto potencial (el óptimo es de  $16.5\text{ kV}$ ), con ello se logra un enfoque tanto vertical como horizontal. El haz se dirige hacia otra sección en la que se lleva a cabo otra focalización antes de ser inyectado al deflector magnético. En esta parte actúan simultáneamente otra lente Einzel, dos electrones planos que forman un tubo de dirección (Y-Steerer) y algunas aperturas que controlan el tamaño del haz [12].

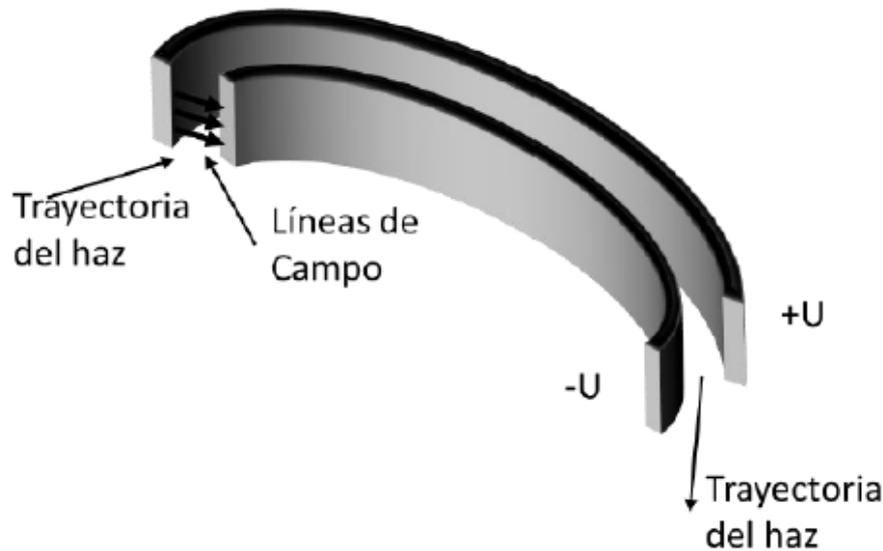


Figura 3.6: Deflector electrostático [13]

### 3.1.3. El sistema de inyección

Los sistemas de inyección especializados han sido desarrollados con el objetivo de inyectar tanto isótopos raros así como isótopos abundantes dentro del acelerador. Un método es inyectar diferentes isótopos secuencialmente, cambiando la energía de los iones más importantes para su análisis de masa, o cambiando el campo magnético del analizador de masa, este último tiene la ventaja de ser rápido cambiando los tiempos muertos a microsegundos lo cual puede lograrse aplicando un voltaje a una caja de vacío aislada del analizador de masas magnético (deflector magnético). El imán utilizado en el LEMA utiliza una corriente de 48.79 A como valor óptimo.

Se requieren lentes electrostáticas al inicio y al final de esta sección para asegurar trayectorias idénticas para los diferentes isótopos. Muchos de los laboratorios de EMA emplean este sistema de ciclo rápido para minimizar la fluctuación de la salida de la fuente de iones. Los elementos en esta parte del acelerador, trabajan con otros valores de potenciales para asegurar una transmisión del haz óptima: 3.97 kV para el deflector electrostático,  $-75.9$  V para el Y-Steerer, y 17.586 kV para la lente Einzel.

Los haces de corrientes de isótopos estables pueden ser tan grandes como  $100\mu\text{A}$  [10]. Si son inyectadas por más de unos milisegundos, tales corrientes causan que el voltaje de la terminal del acelerador caiga, porque el sistema de carga no puede ajustarse para el aumento de carga. Las secuencias de ciclos rápidos se eligen para asegurar que la intensidad del haz en el acelerador no sea un problema para tiempos suficientemente cortos. La secuencia de medida del  $^{14}\text{C}$  consiste en  $100\mu\text{s}$ ,  $100\mu\text{s}$  y  $9.75$  ms para  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  y  $^{14}\text{C}$  respectivamente.

### 3.1.4. Acelerador

El acelerador es electrostático y está compuesto por un tubo de aceleración de baja energía, un canal de *stripping* y un tubo de aceleración de alta energía (1 MV). La función de los tubos de aceleración es regular el gradiente de potencial electrostático entre la línea de análisis que se sitúa a tierra física y a la terminal.

### 3. MARCO TEÓRICO

Cuando los iones negativos entran al primer tubo reciben una aceleración debido al estado de carga de la terminal situada a la mitad del acelerador. Es en la terminal donde se lleva a cabo el proceso de *stripping* donde se provoca un cambio de estado de carga, de negativo a positivo, debido al choque del haz con el gas que se encuentra dentro de la terminal, la energía del haz está dada por la siguiente ecuación

$$E = \frac{M(eV_0 + eV_T)}{M_0} + qeV_T \quad (3.10)$$

En donde  $V_T$  es el voltaje de la terminal,  $V_0$  el voltaje de la fuente,  $M$  y  $M_0$  son las masas del isótopo de interés y del ion inyectado respectivamente,  $q$  el estado de carga y  $e$  la carga del electrón.

Este arreglo permite eliminar moléculas contaminantes que hayan logrado pasar los filtros anteriores, pues las moléculas que pasan por el proceso de stripping se rompen en sus componentes y por tanto su masa deja de ser igual a la masa de los isótopos de interés.

El campo eléctrico de la terminal se mantiene constante gracias a un generador de cascada tipo Cockcroft-Walton. Como resultado del cambio de carga, debido al nuevo estado de carga del haz es ahora repelido por la terminal y acelerado en el segundo tubo hacia la salida del mismo (Figura 3.7).

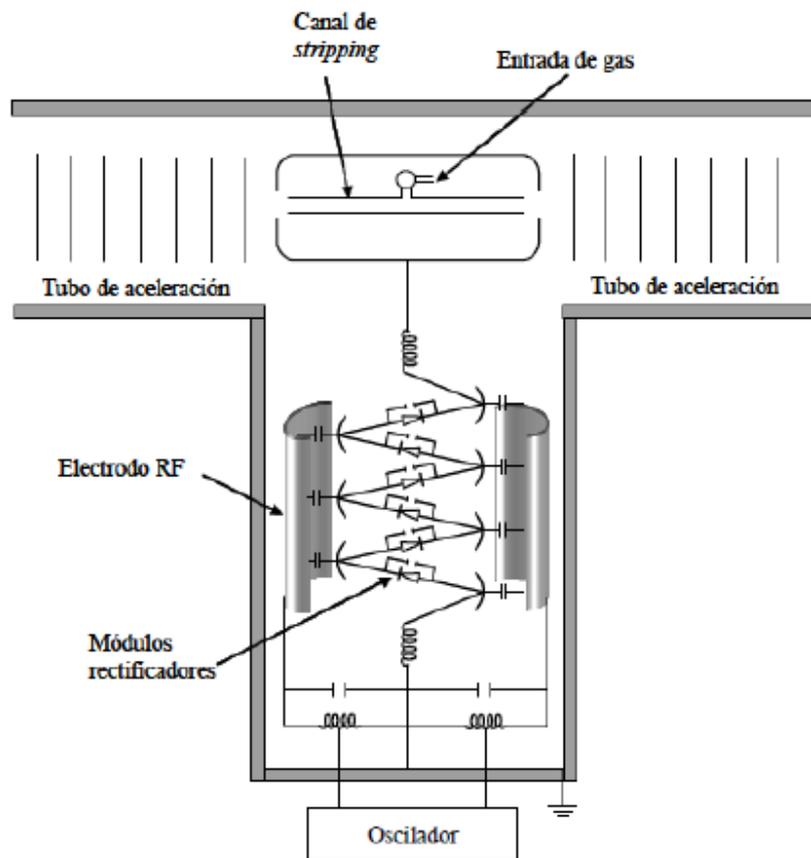


Figura 3.7: Mecanismo Cockcroft-Walton para el acelerador por etapas (Tandem) [12]

Un criterio que debe cumplir el acelerador del sistema EMA es que la transmisión de los iones a través del acelerador debe ser alta y reproducible, esto es, la transmisión debe ser insensible a

cambios pequeños en la inyección o parámetros de aceleración, y el voltaje terminal debe ser muy estable. Lo anterior se logra empleando tubos de aceleración de gran diámetro y cámaras de vacío espaciosas dentro de los magnetos, y aperturas tan grandes como sea posible.

La consistencia de la transmisión se logra de una mejor manera cuando se utiliza un gas para llevar a cabo la ionización en la terminal de alto voltaje y la mayoría de las instalaciones que tienen por objetivo la precisión de la medida de  $^{14}\text{C}$  usan gas de argón, tal como se hace en el LEMA. La estabilización del voltaje terminal del acelerador presenta un reto en particular, para ello la posición fuera del eje de uno de los haces estables es monitoreado por una caja de Faraday que es dividida para dar dos señales separadas, una izquierda y una derecha. La primera es extensamente utilizada y es capaz de una excelente estabilidad.

### 3.1.5. Espectrómetro de alta energía

En la siguiente aceleración, el estado de carga y por lo tanto la energía de interés es seleccionada por un análisis magnético. En estos sistemas se emplea un ciclo rápido o inyección simultánea; el radio de curvatura de los isótopos radiactivos y de los isótopos estables es diferente, y los últimos son colectados en cajas de Faraday fuera del eje después del magneto. Evidentemente el ancho de los polos del magneto y la caja de vacío a la salida del magneto deben ser suficientes para organizar las diferentes especies de iones. Por ejemplo, la separación entre  $^{14}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$  es de 8 cm a la salida de un magneto con radio de 1 m.

El radio de la trayectoria puede ser calculado nuevamente, tomando en cuenta que la energía del haz está dada ahora por la ecuación 3.10, sustituyendo este valor en la ecuación 3.5 se obtiene que

$$r = \frac{\sqrt{2m \frac{M(eV_0 + eV_i)}{M_0} + qeV_T}}{Bq} \quad (3.11)$$

Muchos sistemas emplean una etapa adicional de análisis, que consiste en un analizador electrostático o un filtro de velocidad, para remover la pequeña fracción de fragmentos moleculares que han adquirido la energía correcta para tener la misma trayectoria que el isótopo que se desea analizar.

### 3.1.6. Detector

El sistema EMA del Instituto de Física de la UNAM utiliza una cámara de ionización. Las cámaras de ionización proporcionan no sólo una medida de la energía total de los iones, también miden la proporción de energía que se pierde cuando las partículas se frenan en el detector de gas. La ventana del gas confinado es de nitrato de silicio de 10 nm de espesor. Para el conteo de partículas los gases que generalmente son utilizados son el propano y el isobutano. Los electrones son producidos por el paso de los iones energéticos a la deriva hacia el ánodo en el campo eléctrico transversal. El ánodo es subdividido en secciones, cada una de las cuales colecta esos electrones que son producidos debajo de él, de este modo la pérdida de energía del ion es medida a lo largo de una porción de trayectoria. Debido a que iones de diferente número atómico pierden energía a diferentes tasas, esta información de la pérdida de energía permite la separación de isóbaros que tienen la misma energía al llegar al detector.

La tasa de cambio de la energía medida, debido al frenado de la partícula depende del número atómico, por lo que es también un filtro a otras partículas de la misma masa, por ejemplo litio

molecular. Dicha energía está dada por la siguiente ecuación

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \left( \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0} \right)^2 \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (3.12)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $m_e$  la masa del electrón,  $\epsilon_0$  la permitividad del vacío,  $\beta = v/c$  y  $n$  la densidad electrónica del material.

Con la eficiencia de los sistemas EMA se espera llegar más allá del límite de fechamiento convencional el cual es de  $\sim 50000$  años. En gran medida, este límite es intrínseco en el sentido de que entre más vieja sea la muestra, mayor será el efecto de cualquier carbono más reciente adquirido por la muestra en el curso de su historia posterior [1] [8] [10].

Para mayores detalles acerca de los valores óptimos y los procedimientos de calibración específicos del espectrometro de masas con aceleradores del LEMA es posible consultar la tesis de licenciatura de Javier Aragón Navarro, titulada: Determinación de la medida de  $^{14}\text{C}$  por espectrometría de masas con aceleradores [13], de donde los valores de optimización referidos en esta tesis fueron consultados.

### 3.2. Análisis de la medida $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$

En las medidas de  $^{14}\text{C}$  es necesaria una precisión del 0,5 % correspondiente a 40 años en edad radiocarbono. Para lograr este nivel de precisión es necesario obtener suficientes cuentas de  $^{14}\text{C}$  para que la incertidumbre estadística esté a un nivel deseado, y segundo para lograr un alto grado de reproducibilidad. Estos requerimientos duales se cumplen como siguen:

- Muchos laboratorios emplean una corriente alta, o muestras múltiples en la fuente de iones con grafito como material de muestra. Debido a que las mediciones son hechas relativas a un estándar el cual se cuenta aproximadamente a la misma cantidad de tiempo que la muestra desconocida, se requieren 60 000 cuentas para una precisión estadística de 0,5 % [11].
- Para fechamientos de alta precisión, es necesario corregir el fraccionamiento natural inherente a los procesos biológicos. Por ejemplo, el carbón de las plantas C3 (por ejemplo árboles del bosque), es empobrecido por 1,5 % en  $^{13}\text{C}$  relativo a plantas C4 (pastos). Es por ello que además de la medida de  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ , también es necesario llevar a cabo la medida de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ . Usualmente la proporción de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  es medida con espectrometría de masas convencional en una submuestra de  $\text{CO}_2$ . Esta aproximación también tiene la ventaja de dar cuenta de cualquier fraccionamiento adicional introducido en el proceso de grafitización [10].

A continuación hablaremos sobre el cálculo de la edad radiocarbono hecha con las diferentes correcciones, y los diferentes aspectos por los cuales dichas correcciones deben realizarse.

#### 3.2.1. Estimación del error

En la introducción hablamos sobre la actividad ( $A$ ) de una muestra. Para nuestros fines es necesario comparar la actividad de la muestra de la cual deseamos conocer su edad ( $\tilde{A}_m$ ) con la de una muestra de edad conocida, es decir una muestra estándar ( $\tilde{A}_e$ ); además debido a que la muestra a fechar puede llegar a contaminarse con material carbonoso (el cual puede tener distinta actividad), o bien la contaminación puede venir del fondo instrumental, debe considerarse la actividad

de una muestra de fondo ( $\tilde{A}_f$ ), se trata de un material que es tan viejo que la actividad con que contribuye se considera como ruido en la señal de salida. En EMA en lugar de medir la actividad específica de las muestras, se miden las proporciones de los isótopos ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) y ( $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ ), dado que la actividad específica de la muestra es proporcional a

$$\frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C}) + N(^{13}\text{C}) + N(^{14}\text{C})} \approx \frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C}) + N(^{13}\text{C})} \approx \frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C})} \quad (3.13)$$

donde  $N(^{12}\text{C})$ ,  $N(^{13}\text{C})$  y  $N(^{14}\text{C})$  representan el número de núcleos de diferentes isótopos en la muestra. La última aproximación genera un error equivalente a 1 año de  $^{14}\text{C}$  [19].

Para obtener estos valores y conocer cómo son afectados por las diversas fuentes de error, veremos todo en términos de la actividad de la muestra y después observaremos qué sucede cuando expresamos nuestros resultados en términos de proporciones de los diferentes isótopos de carbono. Para comenzar consideremos la actividad neta específica de  $^{14}\text{C}$  de la muestra  $A_m$ , la cual está dada por

$$A_m = \tilde{A}_m - \tilde{A}_f \quad (3.14)$$

Para el estándar se debe hacer el mismo cálculo para eliminar también la actividad debida al fondo.

$$A_e = \tilde{A}_e - \tilde{A}_f \quad (3.15)$$

Es importante mencionar que para que la medición pueda ser representativa, la muestra, el estándar, y la muestra de fondo deben recibir el mismo pretratamiento.

La actividad de la muestra relativa al estándar está dada por

$$u = \frac{A_m}{A_e} = \frac{\tilde{A}_m - \tilde{A}_f}{\tilde{A}_e - \tilde{A}_f} \quad (3.16)$$

Todas estas cantidades son afectadas por errores (estadísticas de conteo así como otras, que no se especifican). Es importante conocer cómo estas cantidades contribuyen al error total  $\sigma_u$ .

Debido a que  $u$  es una función de varias variables, podemos utilizar la siguiente fórmula para la propagación del error (ver apéndice 2). Tenemos entonces que

$$\sigma_u^2 \approx \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots \quad (3.17)$$

De lo anterior se deduce que el error relativo  $\sigma_u/u$  puede ser escrito como

$$\frac{\sigma_u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\tilde{A}_m}}{\tilde{A}_m - \tilde{A}_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tilde{A}_e}}{\tilde{A}_e - \tilde{A}_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tilde{A}_m - \tilde{A}_e}}{(\tilde{A}_m - \tilde{A}_f)(\tilde{A}_e - \tilde{A}_f)}\right)^2} \quad (3.18)$$

Para muestras jóvenes ( $\tilde{A}_m \gg \tilde{A}_f$ ) por lo que la ecuación (3.18) se reduce a

$$\frac{\sigma_u}{u} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\tilde{A}_m}}{\tilde{A}_m - \tilde{A}_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tilde{A}_e}}{\tilde{A}_e - \tilde{A}_f}\right)^2} \quad (3.19)$$

#### 3.2.2. Fraccionamiento isotópico

Los efectos de alteración son aquellos que pueden cambiar la concentración de  $^{14}\text{C}$  en la muestra, haciendo que sea diferente al de la atmósfera o que cambie el valor que se esperaría tener debido al decaimiento radiactivo. Dichos efectos son el fraccionamiento isotópico, la recristalización y la producción in situ. De estos, el fraccionamiento isotópico es el más importante, y es descrito a continuación.

El fraccionamiento isotópico es la *separación parcial* de diferentes isótopos, que puede suceder mediante reacciones químicas o bien durante procesos físicos; la evaporación, la condensación y la difusión térmica pueden resultar en un fraccionamiento importante. Para entender mejor a qué nos referimos con *separación parcial* podemos tomar como ejemplo la absorción de  $\text{CO}_2$  en las plantas durante la fotosíntesis. Debido a que el  $^{14}\text{C}$  es más pesado que los otros dos isótopos, éste es absorbido en menor proporción, por lo tanto hay un empobrecimiento de  $^{14}\text{C}$ ; lo mismo sucede en el caso de  $^{13}\text{C}$  comparado con  $^{12}\text{C}$ . Por lo cual podría suceder que la actividad del  $\text{CO}_2$  en la planta pudiera ser distinta de la actividad de la atmósfera en la que la planta creció. Antes de continuar debemos ver cómo afectan las variaciones de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera a la técnica de fechamiento por radiocarbono [20] [1].

#### 3.2.3. Variaciones de $^{14}\text{C}$ en la atmósfera

Existen diferentes factores que pueden afectar las edades radiocarbono que obtenemos, por lo cual éstas no coinciden con la edad real de las muestras. Esto se sabe ya que en principio se realizaron pruebas a las técnicas de datación con radiocarbono mediante el fechado de muestras de edad conocida. Por ejemplo durante los años 50, las discrepancias fueron en aumento entre las edades radiocarbono y las edades históricas para el Viejo Reino de Egipto [1]. Estas discrepancias fueron más allá de ser insignificantes puesto que los resultados radiocarbono eran varios siglos más jóvenes. La validez de las edades históricas, por supuesto, no fueron puestas en duda, de esta manera se buscó cuál era la falla que existía en el método, puesto que la ciencia detrás de ella tampoco era puesta en duda.

Para comprobar que en efecto existía una discrepancia entre los resultados de radiocarbono, se necesitaba era conocer la concentración de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera a lo largo del tiempo; para ello se auxiliaron de la dendrocronología.

La dendrocronología establece la edad de los árboles mediante el crecimiento de sus anillos; en climas templados, los árboles crecen por la adición de un anillo anual, pero el ancho del anillo varía dependiendo de las condiciones climáticas, tales como la temperatura y las lluvias. Los árboles que crecen en la misma localidad, y que pertenecen a la misma especie, deberían tener un patrón similar en el ancho de sus anillos. Para lograr esto, varios patrones de anillos son promediados para cada sección de cronología para asegurar que no se introduzcan errores por el crecimiento de peculiaridades de árboles individuales. La escala de tiempo de la dendrocronología es precisa en un rango de un año [18] [1].

Así, los científicos se encargaron de medir la concentración de  $^{14}\text{C}$  en los anillos de los árboles y de este modo lograron comprobar que en efecto existía una discrepancia entre la edad que los árboles indicaban y la edad radiocarbono.

En los años 60's, una secuencia continua de anillos de árboles que se remonta a 8000 años fue establecida por Wesley Ferguson, y la primera curva de calibración usando estos resultados fue publicada por Hans Suess [1].

Debido a lo anterior, la actividad de los anillos de árboles de edad conocida y su fraccionamiento isotópico bien determinado se utilizan para comparar el valor de  $^{14}\text{C}$  en diferentes materiales,

Material	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$
Carbonatos marinos	$0(-4a + 4)$
$\text{CO}_2$ Atmosférico	$-9(-11a - 6)$
Granos, semillas, maíz, mijo	$-10(-13a - 7)$
Organismos marinos	$-15(-19a - 11)$
Colágeno de huesos, celulosa de madera	$-20(-24a - 18)$
Granos (trigo, avena, arroz, etc.)	$-23(-27a - 19)$
Madera reciente, carbón	$-25(-30a - 20)$
Hojas de árboles, trigo, paja	$-27(-32a - 22)$

Tabla 3.1: Algunos valores típicos de  $\delta^{13}\text{C}$ 

tomando en cuenta el fraccionamiento isotópico de éstos. Por lo tanto la actividad de una muestra se traduce a la actividad que la muestra debió haber tenido si esta hubiese sido madera con una composición isotópica particular estable. El proceso, llamado normalización, se describe más adelante; antes debemos introducir antes el término  $\delta^{13}\text{C}$ , el cual es la medida del fraccionamiento isotópico.

En lugar de establecer la proporción de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ , el fraccionamiento isotópico es expresado en términos de  $\delta^{13}\text{C}$ , el cual es la desviación relativa de la proporción de  $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$  de la muestra comparada con el material estándar VPDB por sus siglas en inglés (Vienna Pee Dee Belemnite) expresada en partes por mil.

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_m - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{VPDB}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{VPDB}} \right) \cdot 1000\text{‰} \quad (3.20)$$

Algunos valores típicos de  $\delta^{13}\text{C}$  se muestran en la Tabla 3.1.

La normalización se refiere a la traslación de la actividad medida a la actividad que la muestra debería tener si fuera madera con  $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ . Para ello es necesario introducir el factor de fraccionamiento ( $Frac_{13/12}$ ):

$$Frac_{13/12} = \frac{\left( \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{[\delta^{13}\text{C}=-25]}}{\left( \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_m} \quad (3.21)$$

El factor de fraccionamiento para  $^{14}\text{C}$  ( $Frac_{14/12}$ ) está dado por aproximadamente el cuadrado del factor de fraccionamiento  $^{13}\text{C}$ .

$$Frac_{14/12} \simeq (Frac_{13/12})^2 \quad (3.22)$$

Por lo tanto la actividad específica normalizada de una muestra ( $A_{m_N}$ ) está dada por

$$A_{m_N} = A_m \cdot Frac_{14/12} \simeq A_m \cdot (Frac_{13/12})^2 = A_m \left( \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{[\delta^{13}\text{C}=-25]}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_m} \right)^2 \quad (3.23)$$

Utilizando la definición de  $\delta^{13}\text{C}$  (ecuación 3.20), la ecuación (3.23) puede reescribirse como

$$\begin{aligned}
 A_{mN} &= \left( \frac{\left(1 - \frac{25}{1000}\right) \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{VPDB}}{\left(1 + \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000}\right) \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{VPDB}} \right)^2 \\
 &= A_m \left( \frac{\left(1 - \frac{25}{1000}\right)}{\left(1 + \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000}\right)} \right)^2 \\
 &= A_m \left( \frac{0,975}{\left(1 + \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000}\right)} \right)^2 \\
 &\simeq A_m \left( 1 - \frac{2(25 + \delta^{13}\text{C})}{1000} \right)
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

El último paso es una aproximación la cual nos da un error máximo de 1‰ para valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -35 y +3‰ [19].

### 3.2.4. Materiales estándar

Las mediciones de radiocarbono se realizan relacionándolas a un estándar de actividad relativa (ec. 3.15). Debido al decaimiento radiactivo del  $^{14}\text{C}$  la actividad específica de cualquier material estándar de  $^{14}\text{C}$  decrece con el tiempo. Por lo tanto, es necesario establecer un estándar absoluto. La actividad específica de este estándar de radiocarbono absoluto ha sido definido como:

$$A_{abs} = 226\text{Bq/kgC} \tag{3.25}$$

$A_{abs}$  corresponde a la actividad específica hipotética de carbón atmosférico del año 1950, haciendo la suposición de que esta atmósfera hipotética está libre de perturbaciones humanas y normalizada a  $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ .  $A_{abs}$  puede escribirse como

$$A_{abs} = A_{1950[-25]} e^{\lambda_c(y-1950)} \tag{3.26}$$

donde  $A_{1950[-25]}$  significa la actividad de la atmósfera hipotética de 1950, normalizada a  $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$ , y con decaimiento en el presente. Notemos que  $A_{1950[-25]}$  corresponde a la actividad medida en el presente, mientras que  $A_{abs}$  se refiere a la actividad medida en 1950. En la exponencial  $\lambda_c$  se basa en la vida media Cambridge de  $(T_{1/2})_C = 5730 \pm 40$  años e y corresponde al año de medición: por lo tanto la exponencial convierte a  $A_{1950[-25]}$  al valor que podría haber tenido en 1950 [1] [20].

En realidad el nivel atmosférico en 1950 fue más bajo que  $A_{abs}$  debido a la influencia humana. Ya que era deseable que la atmósfera estuviera libre de efectos por la quema de combustibles fósiles de la época de la revolución industrial, se eligió madera del año 1890 como el estándar absoluto de radiocarbono.

El principal estándar de radiocarbono es el NIST ácido oxálico I, también conocido como OXA I. El estándar OXA I fue obtenido de una cosecha de betabel, en el tiempo en que la actividad específica del  $^{14}\text{C}$  comenzó a crecer debido a pruebas de armas termonucleares. La actividad específica de OXA I ( $A_{OXI}$ ) es 95 % de la actividad específica en 1950 de OXA I normalizada a  $\delta^{13}\text{C} = -19\text{‰}$  con respecto a VPDB. En otras palabras primero es medida y normalizada a  $\delta^{13}\text{C} = -19\text{‰}$  dando la actividad normalizada de la muestra  $A_{ON}$

$$A_{ON} = 0,95A_{OXI} \left( \frac{1 - \frac{19}{1000}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}}{1000}} \right)^2 \simeq 0,95A_{OXI} \left( 1 - \frac{2(19 + \delta^{13}\text{C})}{1000} \right) \tag{3.27}$$

Este valor es entonces corregido para el decaimiento desde 1950 para obtener la actividad absoluta específica del estándar internacional,  $A_{abs}$ :

$$A_{abs} = A_{ON} e^{\lambda_c(y-1950)} \quad (3.28)$$

donde  $\lambda_c = 1/8267 \text{ años}^{-1}$  e  $y$  es el año de medición. El estándar OXA I no se encuentra disponible comercialmente. En vez de OXA I, se utiliza otro llamado OXA II, para el cual también hay que realizar la normalización, tomando como referencia el OXA I. De este modo se tiene que

$$\begin{aligned} A_{ON} &= A_{1950[-25]} \\ &= 0,95 A_{OXI} \left( \frac{1 - \frac{19}{1000}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_{OXI}}{1000}} \right)^2 \\ &= 0,7459 A_{OXII} \left( \frac{1 - \frac{25}{1000}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_{OXI}}{1000}} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Así, retomando la ecuación 3.13 la ecuación 3.29 puede ser reescrita en términos de la razón isotópica  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$

$$\begin{aligned} \left( \frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{1950[-25]} &= 0,95 \left( \frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{OXI} \left( \frac{1 - \frac{19}{1000}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_{OXI}}{1000}} \right)^2 \\ &= 0,7459 \left( \frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{OXII} \left( \frac{1 - \frac{25}{1000}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_{OXI}}{1000}} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Esto es, para medidas de  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ , el término  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  ha sido sustituido simplemente por la actividad específica  $A$ .

Para  $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$  la situación es un poco diferente, pues se tiene

$$\begin{aligned} \left( \frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}} \right)_{1950[-25]} &= 0,9558 \left( \frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}} \right)_{OXI} \left( \frac{1 - \frac{19}{1000}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_{OXI}}{1000}} \right)^2 \\ &= 0,7459 \left( \frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}} \right)_{OXII} \left( \frac{1 - \frac{25}{1000}}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_{OXI}}{1000}} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

Entre otras unidades empleadas en el fechamiento con radiocarbono, tenemos el *porcentaje de carbono moderno*,  $pMC$  por sus siglas en inglés, el cual es frecuentemente usado en muestras ambientales y aplicaciones post bomba, y se define como

$$pMC = \frac{A_{mN}}{A_{ON}} \cdot 100\% \quad (3.32)$$

Esta proporción es constante en el tiempo.

El término *fracción moderna*  $F$  se define como

$$F = \frac{\left( \frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}} \right)_{m[-25]}}{\left( \frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}} \right)_{1950[-25]}} \quad (3.33)$$

Pero por lo visto anteriormente  $F$  también puede ser vista como

$$F = \frac{\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}}\right)_{m[-25]}}{\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}}\right)_{1950[-25]}} = \frac{\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}}\right)_{m[-25]}}{0,9558 \left(\frac{^{14}\text{C}}{^{13}\text{C}}\right)_{OXI[-19]}} = \frac{A_{mN}}{A_{ON}} \quad (3.34)$$

Finalmente expresamos la fracción moderna de  $^{14}\text{C}$  como

$$F_{^{14}\text{C}} = \frac{A_{mN}}{A_{ON}} \quad (3.35)$$

### 3.2.5. Edad radiocarbono

Tomando en cuenta todo lo anterior, podemos replantear la ley de decaimiento radiactivo en términos de las expresiones revisadas hasta el momento. Podemos entonces escribir equivalentemente que

$$A_{mN} = A_{ON} e^{-\lambda t} \quad (3.36)$$

De esto se tiene que

$$F_{^{14}\text{C}} = \frac{A_{mN}}{A_{ON}} = e^{-\lambda t} \quad (3.37)$$

Por convención el año 1950 D.C. se coloca como  $t = 0$  donde  $\lambda$  en este caso es la constante de decaimiento Libby que se define como  $\lambda_L = 1/8033 \text{ años}^{-1}$ . Vale la pena notar que no es la misma que la constante de decaimiento Cambridge. La edad radiocarbono convencional está dada entonces por

$$T_{^{14}\text{C}} = \frac{1}{\lambda_L} \ln \left( \frac{A_{mN}}{A_{ON}} \right) = -8033 \ln F_{^{14}\text{C}} \quad (3.38)$$

Lo siguiente que necesitamos conocer son las curvas de calibración, las cuales son de suma importancia en el momento de calcular la edad radiocarbono. Antes de abordar ese tema veremos los factores que han dado origen a dichas curvas, así como su funcionamiento.

Entre los efectos más importantes que afectan la edad radiocarbono se encuentran principalmente los efectos debidos a la influencia del ser humano en la producción de  $^{14}\text{C}$ , y otras no menos importantes como las excursiones del campo magnético terrestre, así como la actividad solar.

### 3.2.6. Variaciones debidas al campo magnético terrestre

El campo de la Tierra cambia con el tiempo, pues éste se genera por el movimiento de aleaciones de hierro fundido en el núcleo externo de la Tierra (la geodinamo). El polo norte magnético se desplaza, pero de una manera suficientemente lenta como para que las brújulas sean útiles en la navegación. Al cabo de ciertos periodos de duración aleatoria, con un promedio de duración de varios cientos de miles de años, el campo magnético de la Tierra se invierte, es decir, el polo norte y sur geomagnético permutan su posición [1] [8].

El momento geomagnético afecta la producción de  $^{14}\text{C}$  puesto que los rayos cósmicos son partículas cargadas, y por lo tanto son deflectadas por el campo magnético. Si el momento magnético es alto, más rayos cósmicos son deflectados lejos de la Tierra y la producción de  $^{14}\text{C}$  debería descender, si es bajo, la producción crece. Si el momento es alto o bajo, el efecto del campo magnético varía con la latitud, pero la rápida mezcla con la atmósfera da lugar a una concentración global uniforme de  $^{14}\text{C}$ . Sin embargo cuando la tasa de producción cambia, una nueva concentración de equilibrio será establecida en el ciclo del carbono como un todo, sólo después de

un tiempo considerable, debido a la finita, y en algunos casos larga, tasa de mezcla e intercambio y los tamaños relativos de las reservas [1] [18].

Las variaciones en la fuerza del dipolo geomagnético se reconstruyen utilizando registros de palaeointensidad relativa de los sedimentos de aguas profundas. Una comparación de las tasas de producción derivadas de la fuerza geomagnética con el registro de núcleo de hielo de  $^{10}\text{Be}$  muestran tener una correlación. Cambios relativamente cortos (eventos) han sido observados durante los últimos 50 mil años; una mayor producción las tasas de los isótopos cosmogónicos  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  y  $^{14}\text{C}$  caracterizan periodos de excursiones geomagnéticas cuando la intensidad del campo geomagnético fue baja [1].

### 3.2.7. Actividad Solar

Existe una correlación entre el número de manchas solares y la tasa de producción de isótopos cosmogónicos. El Sol cuenta con dos ciclos, uno largo de cerca de 200 años, y uno corto de alrededor de 11 años. La alta actividad de manchas solares disminuye la fuerza del campo magnético que existe en los planetas, y en tales momentos hay una deflexión magnética más grande de rayos cósmicos y por lo tanto la producción de  $^{14}\text{C}$  decrece.

Previamente, si intentaban datarse muestras que tuvieran tan sólo año de crecimiento, por ejemplo pastos, se pensaba que el ciclo corto del Sol afectaría la concentración de radiocarbono en la muestra, lo cual representaría una dificultad en los fechamientos de este tipo de muestras; esto se hizo sobre la suposición de que existía un gran cambio en la concentración atmosférica año con año. Hasta ahora se ha demostrado que los ciclos cortos no causan más que una variación en la edad obtenida de 20 años. El ciclo de 200 años, sin embargo, tiene un efecto significativo, pues puede representar cambios en la edad radiocarbono de uno o dos siglos, cuando la edad calendario correspondiente ha cambiado por sólo unas décadas. Por lo cual esto representa un problema al convertir las edades radiocarbono a edades calendario [1] [20].

### 3.2.8. Efecto Suess

La revolución industrial de finales del siglo XIX cambió el contenido de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera. El aumento de la quema de combustibles fósiles, que son libres de  $^{14}\text{C}$  (prácticamente todo el  $^{14}\text{C}$  fijo en la materia orgánica de millones de años atrás ya ha decaído), añadió una parte significativa de dióxido de carbono libre de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera. En efecto, la relación  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  atmosférica se redujo y, por tanto, las edades de radiocarbono medidos en tiempos postindustriales sobreestimarán la edad real de la muestra. El efecto fue nombrado después por Hans Suess quien lo describió por primera vez en la década de 1950. Se ha observado que el efecto por la quema de combustibles fósiles es más pronunciado en el aire de las zonas urbanas [1] [20].

Este efecto es el responsable de que el material orgánico reciente no pueda ser usado como estándar moderno. En lugar de eso, el ácido oxálico I (OXA I) guardado en la Oficina Nacional de Estándares de E.U.A. ha sido adoptado y la actividad de  $^{14}\text{C}$  es medida relacionada a la predicha teóricamente, en ausencia del efecto de los combustibles fósiles, para muestras de maderas crecidas en 1950 D.C.

### 3.2.9. El efecto *pico bomba*

Los ensayos nucleares en la década de 1950 provocaron un aumento de la corriente de neutrones térmicos en la estratosfera.

Los neutrones producidos en turno producen  $^{14}\text{C}$  por interacción con  $^{14}\text{N}$ , simulando la producción cosmogénica natural, aunque en grandes estallidos. Usando esta inyección artificial de  $^{14}\text{C}$  para un buen propósito, los científicos de radiocarbono han sido capaces de probar teorías acerca de las tasas de mezcla de  $^{14}\text{C}$  a través de varios depósitos de carbono. Éstas también muestran que una vez que se asientan, los anillos de árboles no intercambian  $^{14}\text{C}$  con otros anillos; esto es fundamental para el uso en dendrocronología para la construcción de la curva de calibración [20].

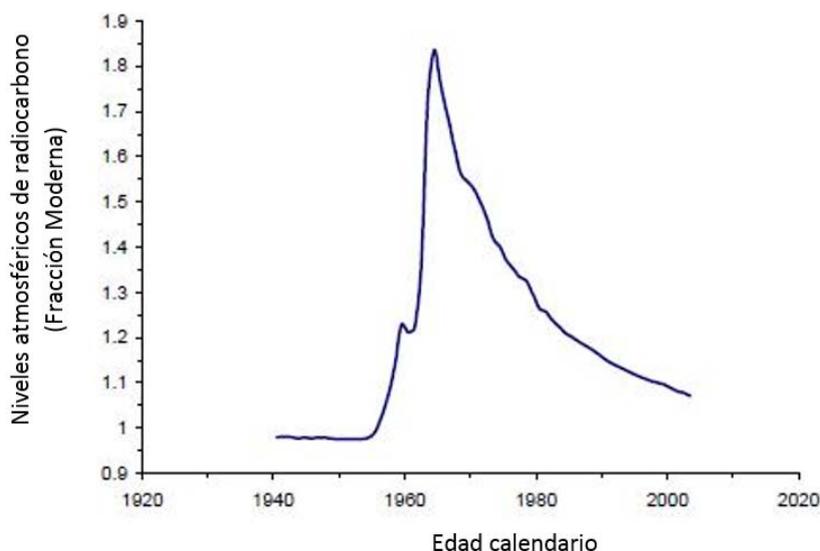


Figura 3.8: Niveles de radiocarbono de 1950 a 2007 d.C., los niveles son expresados en términos de fracción moderna.

#### 3.2.10. Errores exactitud y precisión

Los errores sistemáticos son errores que se repiten de manera conocida en varias realizaciones de una medición. Dicha característica es la que nos permite corregirlo *a posteriori*.

Los errores aleatorios se producen de manera no regular, sin un patrón predefinido, variando en magnitud y sentido de forma aleatoria, son difíciles de preveer y dan lugar a falta de calidad en la medición. Si bien no es posible corregir estos errores en los valores obtenidos, frecuentemente es posible establecer su distribución de probabilidad, que muchas veces es una distribución normal, y estimar el efecto probable del mismo, esto permite establecer el margen de error debido a errores no sistemáticos.

La precisión de una medida queda determinada por los errores aleatorios. La exactitud de una medición es determinada por errores sistemáticos.

En el caso de los resultados de las mediciones de radiocarbono, podemos asumir que se trata de un fenómeno aleatorio por lo cual la función de probabilidad Gaussiana puede utilizarse para calcular el error estimado. Supongamos que  $N$  es el número de partículas contadas; la desviación estándar  $\sigma$  que se define como  $\sigma = \sqrt{N}$ . Así, el término de error  $1\sigma(\pm\sigma)$  significa que hay un 68,3% de que el resultado real esté dentro del intervalo  $\pm\sigma$  del resultado experimental, un 95,4% de que esté dentro de  $\pm 2\sigma$  y un 99,7% de que esté dentro de  $3\sigma$ .

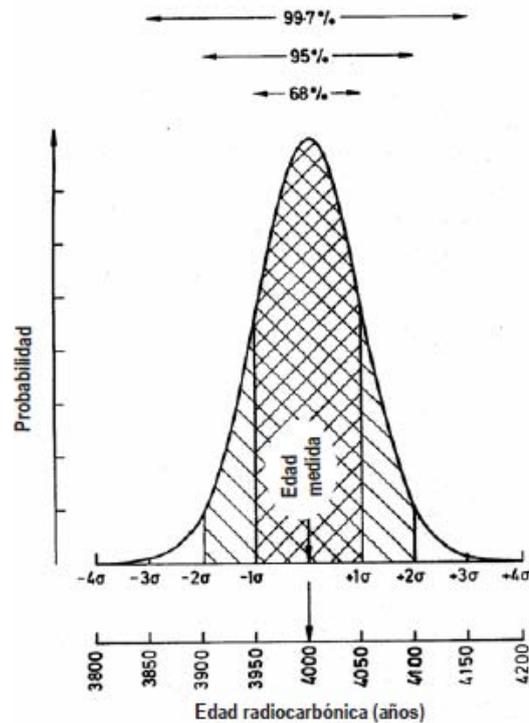


Figura 3.9: Probabilidad de que la edad difiera de la edad media dada ( $\pm 1\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$ ) expresada en términos del error estándar  $\sigma$ . La probabilidad de que la edad verdadera caiga dentro del intervalo está dada por el área bajo la curva para este intervalo; las probabilidades de la edad verdadera cayendo dentro de  $\pm 1\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$  de la edad medida se indican en la parte superior [22].

Dado que la desviación estándar es  $\sqrt{N}$ , esto significa que se deben hacer 100 cuentas para lograr un error de 10% en la estimación del número real; 10000 para 1%, y 1000000 para 0,1%. Mientras más se cuenta, el término de error será mucho más pequeño en términos de porcentaje. Evaluando el error total en los resultados de radiocarbono, sin embargo, se necesitan incorporar tres estadísticas de conteo: para la muestra, para el fondo y para el estándar. Si nosotros deseamos que el porcentaje de probabilidad de que la edad calculada coincida con la edad real, mayor será el intervalo que abarque la fecha encontrada. Es decir, la edad obtenida por el análisis de radiocarbono no nos proporcionará un año específico, sino la probabilidad de que la edad obtenida provenga de un intervalo de tiempo de decenas y hasta centenares de años (Figura 3.9)

### 3.2.11. Curvas de calibración

Todas las variaciones en los niveles de  $^{14}\text{C}$ , generaron la necesidad de crear las llamadas curvas de calibración. Una curva de calibración nos muestra la variabilidad en los niveles de  $^{14}\text{C}$  atmosférico a lo largo del tiempo. Para ello se emplean las edades proporcionadas por la dendrocronología y se relacionan con el contenido de  $^{14}\text{C}$  en los anillos de los árboles, dando así cronologías largas [22]. Muchas de éstas ahora existen para diferentes especies de árboles en diferentes localidades, por ejemplo, arriba de 8000 años para el pino de bristlecone (*Pinus aristata*) en California y más de 7000 años para roble (*Quercus* sp.) en Irlanda. El primero fue usado por Suess para establecer la primera curva de calibración útil [1].

### 3. MARCO TEÓRICO

---

Sin embargo, no siempre es posible obtener datos por medio de la dendrocronología, es por ello que para construir las curvas de calibración, también se han auxiliado de los datos recogidos en los núcleos de hielo formados en los polos de la Tierra [20].

Las curvas de calibración actuales consideran también las edades radiocarbono de conchas foraminíferas de los sedimentos de la cuenca de Cariaco y mediciones de  $^{14}\text{C}$  en U/Th de corales fechados. Además de la curva de calibración atmosférica, la edad de una capa de mezcla global de un depósito marino ha sido modelada y se utiliza para la construcción de una curva de calibración marina.

Existen ciertos periodos de tiempo en la curva de calibración en donde las concentraciones varían de tal forma que provocan que más de una edad calendario corresponda a una edad radiocarbono. Dichos comportamientos en la curva se conocen como ‘wiggles’ y ‘mesetas’. Las ‘mesetas’ en la edad radiocarbono son causadas por una disminución en la concentración de  $^{14}\text{C}$  atmosférico, estas aparecen como una realentización del reloj  $^{14}\text{C}$ , por ejemplo como la que se produjo en 2500 – 2400 BP, es decir, entre 700 BC y 400 BC (‘meseta Hallstatt’) [20] (Figura 3.10).

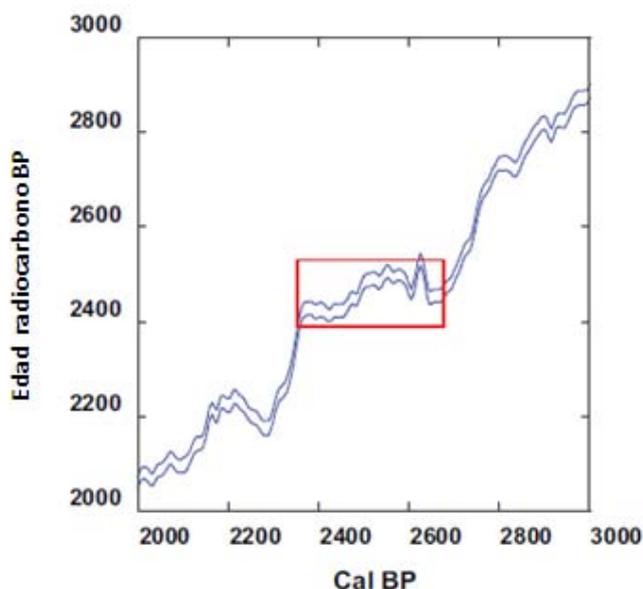


Figura 3.10: *Meseta* en la curva de fechamiento por radiocarbono en 2400 – 2500 BP (700 BC y 400 BC), conocido como ‘*meseta Hallstatt*’ marcado en la curva de calibración INTCAL13

La última curva de calibración disponible fue generada por el grupo de trabajo IntCal en el año 2013, que representaba una mejora con respecto a la anterior [16]. A continuación se muestra parte de la misma (Figura 3.11). En la Figura 3.12 se muestra cómo se obtiene la edad calendario a partir de la curva de calibración.

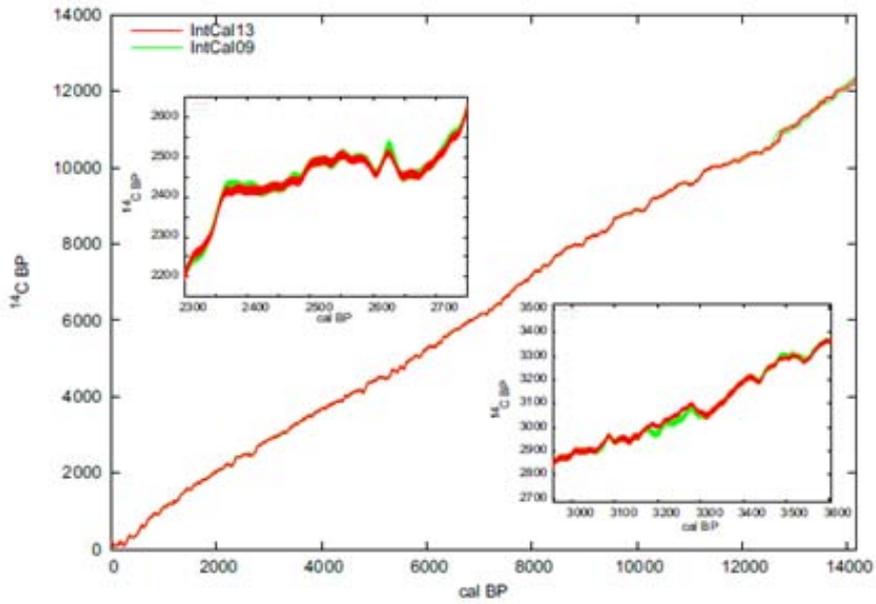


Figura 3.11: Curva de calibración terrestre IntCal13, en la imagen se comparan las curvas IntCal 09 e IntCal13 (Fragmento)

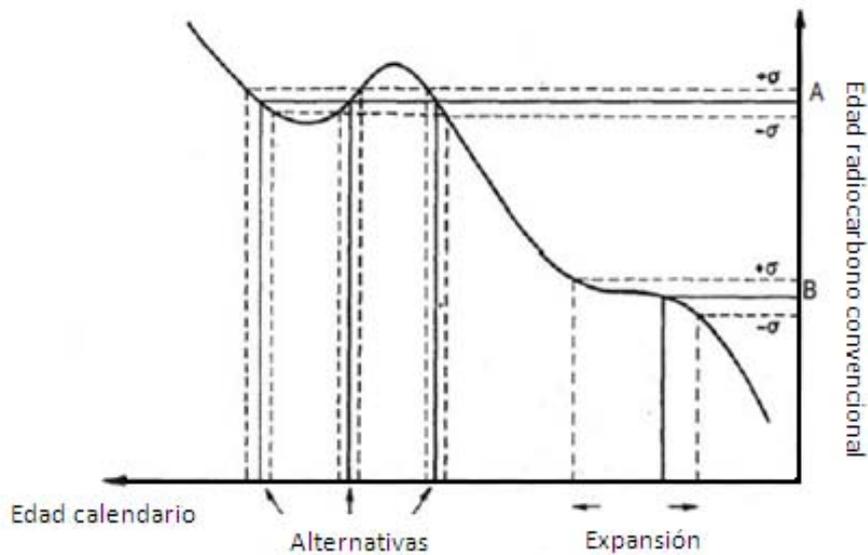


Figura 3.12: Conversión de las edades radiocarbónicas convencionales a edades calendario utilizando la curva de calibración. A la edad radiocarbónica A le corresponden 3 edades calendario. Para la edad B los límites del error  $\pm\sigma$  aumentan la incertidumbre de la edad radiocarbónica correspondiente, esto sucede debido a la 'meseta' de la curva de calibración.



# CAPÍTULO 4

---

## Materiales y método

---

Como se mencionó en la introducción, los diferentes tipos de muestra que se pueden fechar a partir de la medición de su contenido de radiocarbono son aquellas que formaron parte de la biósfera, es decir que contienen  $^{14}\text{C}$  en su estructura. Los materiales que usualmente se fechan son huesos, cuernos, astas, dientes, marfil, tejidos blandos, cabello, residuos de sangre, papel, piel, maderas, plantas, incluso sedimentos y suelos.

Las muestras que son estudiadas en el LEMA tienen que pasar por tres etapas: pretratamiento, grafitización y análisis en el acelerador. Para realizar el procesamiento químico (limpieza) de las muestras es necesario tomar las precauciones necesarias para evitar la contaminación de las mismas, ya que la técnica de fechamiento por espectroscopía de masas con aceleradores (EMA), como antes se mencionó es ultra sensible, es decir, cualquier tipo de contaminación podría afectar significativamente la edad obtenida de las muestras.

### 4.1. Pretratamiento

Dependiendo del tipo de muestra se elige un pretratamiento adecuado para seleccionar la fracción de carbono más relevante, así como la eliminación más eficaz de contaminantes. Entre las fuentes más comunes de contaminación se encuentra el polvo, pues éste contiene partículas de pelo, tejidos, papel, granos de polen entre otras cosas que añaden carbono moderno a las muestras. También es importante la forma en la que las muestras son almacenadas, ya que otro tipo de contaminación que puede afectar los fechamientos es el crecimiento bacteriano en las muestras, por lo que se recomienda que se mantengan secas y a bajas temperaturas, pues esto impide su crecimiento.

En el caso de muestras arqueológicas, concretamente huesos, el problema más común es la degradación de los mismos debido a un proceso llamado diagénesis, el cual consiste en la formación de rocas sedimentarias sobre el hueso. Por otro lado si los huesos se encuentran enterrados, la contaminación proviene de la incorporación de ácidos húmicos en su estructura, éstos se encuentran en el humus, que es una sustancia que se encuentra en los suelos y que resulta de la descomposición de material orgánico debido a hongos y bacterias en la superficie del suelo.

Todo material a fechar que llega al laboratorio debe ser sometido a una examinación visual para remover cualquier tipo de contaminación visible, en estos casos se utiliza la limpieza mecánica, la cual depende del material, puede ser por ejemplo remoción de componentes ajenos a la muestra usando pinzas, tamizado en el caso de los sedimentos, incluso se emplean instrumentos como el dremel y punta de acero para remover la contaminación en el caso de los huesos.

A continuación se describen las técnicas de pretratamiento que se utilizan en el LEMA.

### 4.1.1. Técnica ABA

Esta técnica recibe el nombre de ABA debido a los tres pasos a los que la muestra es sometida (ácido– base–ácido). Su objetivo es la eliminación de carbonatos y ácidos húmicos. En el LEMA se utiliza esta técnica para la limpieza de sedimentos. El primer paso consiste en un lavado de la muestra en solución de ácido, 8ml de HCl a 0,5M, la cual elimina la contaminación por carbonatos, ésta se deja a 60°C por 12 horas, se enjuaga varias veces con agua ultrapura hasta obtener un pH de 5 a 6. Lo siguiente es aplicar un tratamiento con una base para disolver los ácidos húmicos, utilizamos 8 ml de NaOH a 0.1M, nuevamente a 60°C por 12 horas. Se enjuaga varias veces con agua ultrapura hasta obtener un pH de 5 a 6. El lavado final se lleva a cabo con un baño de ácido 8 ml de HCl a 0.5M en caliente para eliminar los carbonatos que se precipitaron a partir de CO<sub>2</sub> atmosférico moderno, que se disuelven en la solución de NaOH. Se enjuaga en agua ultrapura hasta obtener un pH = 5 – 6. Finalmente se deja secar en la estufa por 12 horas a 60°C.

### 4.1.2. Extracción de colágeno por el método Zurich

Después de la limpieza mecánica, para la preparación del hueso se toman aproximadamente 2g de material, el cual se limpia utilizando un baño ultrasónico, es decir, se toma el hueso y se coloca dentro de un tubo Falcon, al cual se le agrega agua ultrapura, después se coloca en un aparato (sonicador), mediante el cual se aplican ondas de ultrasonido para agitar la muestra y así desprender el polvo y otros agentes contaminantes en ella, después de 15 minutos en el baño ultrasónico se desecha el agua y se repite este paso hasta que el agua no se muestre turbia. Posteriormente se deja secar por un día en una estufa a una temperatura entre 50°C y 60°C.

A continuación el hueso se pulveriza y se pesa, para más tarde conocer la fracción de colágeno obtenido y su relación con la cantidad de hueso, esto se hace para cada muestra de hueso pues esta información es indispensable para saber si es posible realizar el análisis, puesto que existen huesos en los que el colágeno que se extrae no es suficiente debido a lo deteriorado que puede estar el hueso.

El siguiente paso es someter la muestra a un baño ácido, los carbonatos precipitados en la superficie del hueso son removidos en el baño ácido disolviendo además la fracción mineral. Se coloca el hueso pulverizado dentro de un tubo Falcon y se agregan 10 ml de HCl a 0,5M, se agita y se almacena por 24 horas a una temperatura de 5°C. Se decanta y se enjuaga con agua ultrapura, se agita y se centrifuga a 4400 rpm por tres minutos para después decantarse, este proceso se repite por lo menos tres veces. Para realizar la gelatinización se agregan 10 ml de HCl 0.2M y se guarda a 80°C durante toda la noche. La fracción orgánica es llamada a menudo ‘colágeno’ o proteínas remanentes, i.e. los residuos después de la disolución de la parte mineral.

Ya que se debe procurar una excelente limpieza en los materiales utilizados en el laboratorio para el procesamiento de las muestras, en el caso de los huesos se utilizan filtros, Amicon de 30kDa, que deben limpiarse mediante un baño ultrasónico durante 15 minutos y centrifugarse por 30 minutos a 4400 rpm; esto debe hacerse por lo menos tres veces. También son requeridos agrofiltros, los cuales también deben limpiarse mediante un baño ultrasónico durante 15 minutos, se guardan húmedos, y en ambos casos el almacenamiento no puede ser mayor a 24 horas antes de su uso. El propósito de estos filtros es llevar a cabo la ultrafiltración de la fracción húmica ligera (30)kDa. La diferencia entre la filtración y la ultrafiltración es que en la última se utiliza una membrana semipermeable.

Para ultrafiltración se transfiere el sobrenadante con ayuda de una jeringa a través del agrofiltro hacia el ultrafiltro y se centrifuga a 4400 rpm cada tres minutos hasta que queden de 1 a 0.5 ml en el filtro, después se transfiere la fracción 30kD a un tubo Roth, se tapa y se congela utili-

zando nitrógeno líquido, para liofilizar se reemplaza la tapa del tubo por papel aluminio al cual previamente se le realiza una pequeña perforación, se deja liofilizar por 24 horas.

### 4.1.3. Pretratamiento para Celulosa

Para realizar la extracción de celulosa se agregan a la muestra 5ml de NaOH 4% a 75°C, con agitación, se deja reposando toda la noche, al día siguiente se decanta el NaOH, de ser necesario la muestra es centrifugada. Para eliminar restos de NaOH se enjuaga con agua desionizada, se centrifuga y posteriormente se decanta, en al menos tres ocasiones para asegurar que no queden residuos. El siguiente paso es agregar 5 ml de HCl 4% con agitación, por al menos una hora, se decanta y se enjuaga con agua desionizada. Para saber que no queda HCl en la muestra utilizamos tiras reactivas en las que debemos medir un pH de 5 o 6, de otra forma es necesario volver a enjuagar hasta obtener dicho pH. Después se agregan 5 ml de NaOH 4% a 75°C con agitación durante 1.5 horas, se decanta y se enjuaga hasta obtener un pH de 5 o 6. Se agregan después 5 ml de NaClO<sub>2</sub> 5% y 7 gotas de HCl 4% hasta obtener un pH de 2 a una temperatura de 75°C con agitación; en este paso es en el que se extrae la celulosa, la muestra permanece en esta solución durante dos horas, y posteriormente se somete a un baño ultrasónico durante veinte minutos a 25°C, se decanta. De ser necesario se centrifuga, enjuagamos por lo menos 3 veces con agua desionizada las veces que sean necesarias hasta obtener un pH de 4. Si se obtuvo celulosa en el procedimiento, la muestra debe ser de color blanco, de lo contrario hay que repetir el paso de extracción. Una vez obtenida la celulosa se congela y liofiliza para su almacenamiento.

## 4.2. Grafitización

Nuestro objetivo en este paso es obtener el carbono de la muestra que deseamos fechar. Debido a que el carbono forma parte de diversas moléculas en el material orgánico, se ha ideado un sistema que cumple con la función de separar el carbono de las muestras. Tal proceso se conoce como *grafitización* y en nuestro laboratorio se lleva a cabo en un sistema que consta de un *Análizador Elemental* (AE, Vario Micro Cube) y un grafitizador (AGE III), cuyo funcionamiento es automático. Un diagrama del sistema completo se muestra en la Figura 4.1

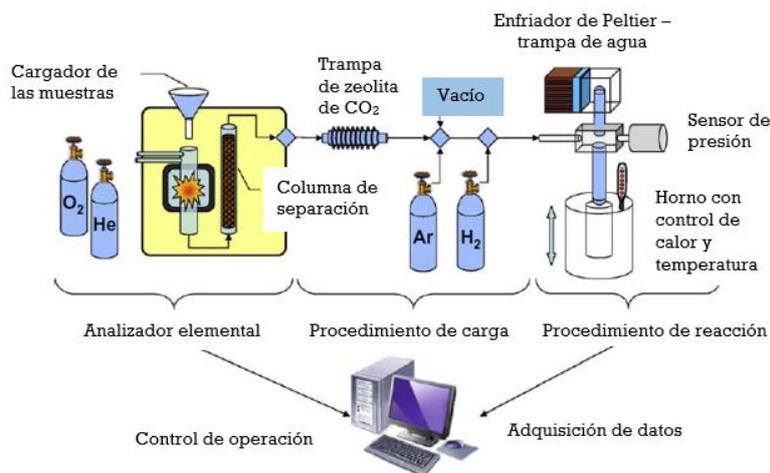
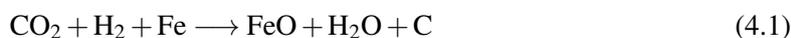


Figura 4.1: Línea de grafitización [15].

A grandes rasgos el proceso es el siguiente: se realiza la combustión de la muestra, y como sabemos de la combustión se obtienen los gases  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  y  $H_2O$ . El nitrógeno molecular, el dióxido de azufre y el agua son separados y desechados en la primera etapa del proceso, la cual se lleva a cabo en el analizador elemental. El dióxido de carbono continúa a la segunda etapa, donde se utilizan hierro e hidrógeno como catalizadores para obtener la siguiente reacción



Para separarlos, el agua es evaporada y luego condensada y congelada, mientras que el óxido de hierro y el carbono permanecen en estado sólido y se prensan sobre un cátodo de aluminio (Al).

El programa de computación LabVIEW es el encargado de controlar que cada paso del proceso se lleve a cabo adecuadamente. Todo el proceso se describe a continuación con más detalle.

#### 4.2.1. Analizador Elemental

En el *Analizador Elemental* se llevan a cabo las primeras etapas del proceso; las muestras ingresan al AE dentro de crisoles de estaño, donde dentro de la columna de combustión las muestras son incineradas a  $950^\circ C$  en presencia de oxígeno. De la reacción de combustión se obtienen  $N_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ . De esta forma ingresa helio (He) como gas portador.

Posteriormente, el exceso de oxígeno se retira en la columna de reducción con cobre, y los gases de combustión se separan ( $N_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ ); este paso tiene como finalidad la limpieza del  $CO_2$ . Los gases resultantes que se encuentran en el gas portador se detectan individualmente dentro de una columna de desorción<sup>1</sup> programada por temperatura (DPT) mediante la medición de la conductividad térmica que se realiza por medio de un termistor, antes de salir de la AE. Se utiliza una válvula de 4 puertos para cambiar la corriente de gas a través de la trampa de zeolita o para desecharse (ver Figura 4.2).

<sup>1</sup>Fenómeno por el cual un gas abandona un sólido cuando este alcanza cierta temperatura

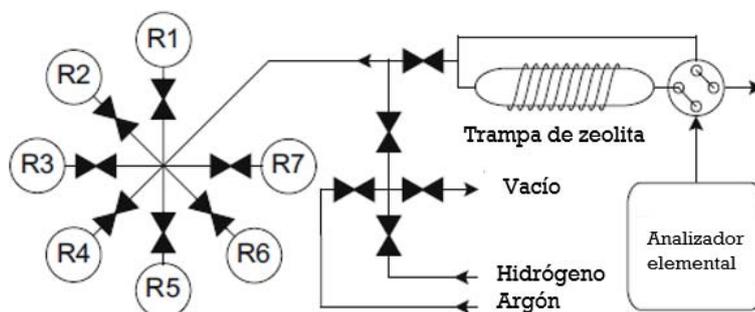


Figura 4.2: Esquema de las conexiones del sistema AGE [15].

El  $N_2$  fluye y es desechado, entonces la columna se calienta a  $60^\circ C$  para liberar  $CO_2$  que se absorbe del gas portador y es llevado a la trampa, continúa el calentamiento y a  $100^\circ C$  libera  $H_2O$  que se descarga para desecharse. Finalmente la temperatura se incrementa a  $200^\circ C$  y el  $SO_2$  se descarga para desecharse.

La trampa contiene zeolita ( $1Na_2O: 1Al_2O_3: 2.8SiO_2$ ), la cual funciona como material adsorbente. La trampa está envuelta en alambre de calentamiento, es decir un termopar, controlado térmicamente para liberar el  $CO_2$  atrapado. Además la trampa está conectada a los reactores por los capilares de 0,5 mm de diámetro interior de pequeño volumen y válvulas neumáticas (Valco Instruments Inc.).

#### 4.2.2. AGE III

El sistema AGE III consiste en un arreglo de siete hornos, los cuales tienen una capacidad de 4,4mL y en los cuales se colocan tubos de reacción (tubos de ensayo Duran de  $8 \times 70$ mm) a los cuales se les vierte en la base hierro (Fe) como catalizador, además se coloca sobre éste un tubo colector que se encarga de atrapar el agua una vez condensada y congelada (tubo de ensayo Duran de  $4 \times 50$ mm). Para montar estos tubos verticalmente se utiliza un racor, este es el nombre que se le da a una pieza metálica con dos roscas internas en sentido inverso, que sirve para unir tubos y otros perfiles cilíndricos, Swagelok Ultra-Torr modificado ( $3/8$  ",  $1/4$ " ) [15]. Esta disposición vertical permite la mezcla rápida de los gases de reacción por convección. Una válvula neumática y un sensor de presión están conectados a los otros dos puertos horizontales (Figura 4.3).

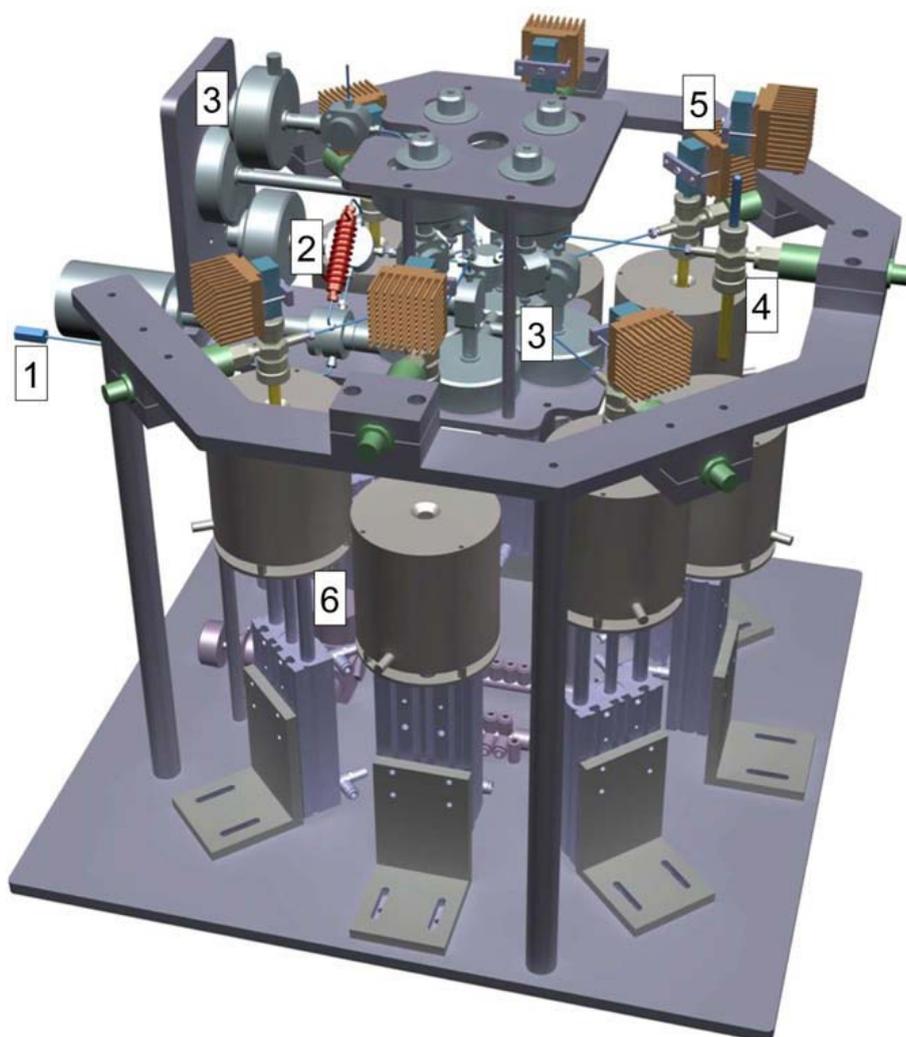


Figura 4.3: AGE III: 1– Entrada del AE 2– trampa de zeolita, 3– válvulas, 4– reactor, 5– enfriador Peltier, 6– horno [15].

La trampa de agua se enfría durante la reacción con un pequeño refrigerador termoeléctrico Peltier (Supercool,  $30 \times 15 \times 3,8$  mm, 16.5 W,  $\Delta T_{(max)} 74^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ ) su temperatura es suficientemente baja como para congelar el agua producida por la reacción durante grafitización.

Los reactores se colocan por encima de horno eléctrico, y pueden ser levantados neumáticamente. Los hornos, diseñados para temperaturas de hasta mil grados centígrados, se construyeron alrededor de un anillo de calentamiento (Watlow fibra cerámica Unidad de Calefacción) aislados en carcasas de aluminio. Los termopares (Tipo N) tocan el fondo de los viales de reacción, cuando se levantan los hornos[15].

Antes de iniciar la grafitización es necesario precalentar los hornos. Una vez que esto se lleva a cabo, se encienden los refrigeradores Peltier y los hornos se levantan para iniciar la grafitización. Durante la reacción se controla la presión de los gases de reacción y dicha presión es monitoreada y registrada. Para evitar el fraccionamiento isotópico, una vez terminada la reacción se dejan pasar 20 min antes de retirar los hornos. Una vez que se retiran los hornos, los reactores son evacuados y se ventilan con argón para preservar las muestras. Las muestras deben ser prensadas lo antes posible sobre los cátodos de aluminio que se introducen en el acelerador, con el fin de reducir su

interacción con el aire.

Es de suma importancia mencionar que al momento de realizar el proceso de grafitización, las cantidades de muestra que pasan por esta etapa están bien definidas, la cantidad de muestra que se introduce al grafitizador depende del tipo de muestra que se desea fechar. Debido a su estructura interna, podrían no tener la misma cantidad de carbono (ver Tabla 4.1), también es necesario tener en mente qué clase de análisis se llevará a cabo, puesto que para el análisis de pequeñas muestras la cantidad de material a fechar es infima comparada con las muestras regulares. En seguida se describen algunos de los materiales que se encuentran en la siguiente tabla.

Material	Masa (mg)
Carbón (fondo)	1.2 a 1.4
OXA I, OXA II, C7, C8	5.2 a 5.5
Madera, carbón, textiles, piel, C4, C5	2.0 a 2.3
Papel, C3	3.0 a 3.5
Hueso, C6	2.5 a 2.8
Carbón mineral	1.7 a 2.0
Celulosa	2.5 a 3.0

Tabla 4.1: Medida de la cantidad de muestra utilizadas en el LEMA

### 4.3. Intercomparación

Desde el comienzo de la aplicación de la medida de radiocarbono, se ha convertido en una práctica común entre los laboratorios el intercambiar muestras en el intento de probar si sus resultados son confiables. Con el tiempo esta práctica dio lugar a ejercicios internacionales de este tipo que resultan ser más formales, de esta forma surge la intercomparación.

Los laboratorios prueban si tienen o no errores sistemáticos tomando parte en las intercomparaciones. Varias muestras de diferente edad y material son usualmente incluidas en la prueba, y los laboratorios fechan porciones de cada una. La mayoría de los laboratorios deben estar de acuerdo en los resultados. Sin embargo, hay a menudo una sorprendente variabilidad [23].

Para cada muestra en la prueba, un consenso de los resultados de los laboratorios participantes es tomado como valor verdadero. De esta forma, los laboratorios que muestran una variación muy grande comparada con los valores de consenso, deben encontrar las fuentes que provocan la desviación de sus resultados, pues estos casi siempre resultan ser errores sistemáticos. El propósito de las intercomparaciones es dar a los laboratorios la oportunidad de realizar revisiones independientes. El material que es utilizado en la intercomparación no es medido por una sola técnica de fechamiento, así en la intercomparación participan los tres tipos de laboratorio: EMA, laboratorios de centelleo y laboratorios de conteo proporcional de gas [21] [23].

Para tener resultados de alta calidad, es necesario tener material de referencia cuyas actividades estén estimadas y sean reconocidas internacionalmente. A este material se le conoce como Material Estándar Internacional, en el que se incluye el material analizado en la intercomparación. El LEMA participó en la sexta y más reciente intercomparación (SIRI), los resultados de dicha intercomparación al momento aún no han sido publicados, por lo cual para la revisión del buen funcionamiento del laboratorio empleamos el material estándar correspondiente a la quinta intercomparación (VIRI).

### 4.4. Material Estándar Internacional

#### **VIRI E: Hueso de mamut (5 vidas medias).**

Este hueso es originario de Quartz Creek, Dawson City, Yukon, Canadá. Se trata de una parte de pelvis de mamut. La muestra se recogió en agosto de 2003 por Ross Barnett del Departamento de Zoología de la Universidad de Oxford. De acuerdo con la quinta intercomparación de radiocarbono internacional (VIRI) se recuperó 0,58 g de colágeno a partir de 5 g de hueso. El porcentaje de carbono de esta muestra de colágeno fue de 41 % [23].

#### **VIRI F: Hueso de caballo (1 vida media).**

Este hueso fue encontrado en Siberia, pertenece al Instituto de Historia de la cultura material de San Petersburgo. De acuerdo con el VIRI se recuperaron 0,34 g de colágeno a partir de 1,67 g de hueso. El porcentaje de carbono de esta muestra fue de 30,3 % [23].

#### **VIRI G: Hueso humano.**

Este hueso perteneció a una mujer de 25 años de edad quien fue enterrada junto con un recién nacido dentro de un ataúd que se encontraba hundido en agua. El ataúd fue datado por dendrocronología, la muestra pertenece al Patrimonio Inglés [23].

#### **VIRI H: Hueso de Ballena (aproximadamente 2 vidas medias).**

La muestra es una mandíbula de ballena, la cual se encontró en la arena de una playa en Svalbard, Spitsbergen, Noruega, y pertenece a la Universidad de Queen, en Belfast [23].

#### **VIRI I: Hueso de ballena (aproximadamente 2 vidas medias).**

Este hueso es parte del cráneo de una ballena, pertenece al Laboratorio Nacional de Datación en Trondheim[23].

De acuerdo con el reporte de la intercomparación, no se encontraron diferencias significativas en los resultados, debido al pretratamiento de las muestras.

La información de las siguientes ocho muestras, con las siglas IAEA en su nombre, **fue consultada de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés)[24].**

#### **IAEA-C1: Mármol.**

Se trata de una losa de mármol originaria de Lucca, Italia. Este mármol contiene 100 % de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). El mármol se preparó posteriormente en el OIEA, aplastado mecánicamente, y fue molido hasta una fracción libre de polvo de 1,6 a 5,0 mm [24].

#### **IAEA-C2: Travertino.**

El travertino es una roca sedimentaria de origen parcialmente biogénico, formada por depósitos de carbonato de calcio. El material C2 Travertino se obtuvo a partir de un carbonato de agua dulce depositados la Cuenca Melaza en Baviera, Alemania. El C2 es homogeneizado por el OIEA. El material se molió mecánicamente y se mezcló. Después de añadir agua a la suspensión se mezcló completamente nuevo. Después del secado, el material se molió hasta conseguir polvo [24].

**IAEA-C3 Celulosa.**

La celulosa se obtuvo de árboles de 40 años de edad originarios de Suecia, importados por Holanda. Los árboles fueron cortados y blanqueados a celulosa en una fábrica de papel en Bergum, Países Bajos, y se suministran en hojas, el material fue preparado por el GT Mook y J. van der Plicht del Centro de Investigación de Isótopos CIO, Universidad de Groningen, Países Bajos [24].

**IAEA-C4: Madera.**

Se trata de madera subfósil Kauri proveniente de la isla norte de Nueva Zelanda, donde los árboles cayeron naturalmente hace unos 40-50.000 años, y se conservaron en turbas profundas. El material se preparó bajo la guía de W.G Hogg y H.A Polach, en cooperación con la Universidad de Waikato, la Universidad Nacional de Australia (ANU), y el Centro de Investigación de Nueva Zelanda. Se preparó una muestra homogénea en base a la técnica de fabricación de pulpa, esto se realizó con vapor a alta presión y temperatura de las virutas de madera. Las astillas de madera - astillas de tamaño medio de lápiz - se mezclaron, la pulpa resultante se mezcló, se comprimió en tablero suave, y se dejó secar. Durante la preparación, el molino se limpió con vapor y agua y los primeros 10 kg de pulpa fueron descartados [24].

**IAEA-C5:Madera.**

Esta madera es subfósil y se obtuvo de los bosques del este de Wisconsin, EE.UU. Se cree que todos los árboles individuales conservados en esa ubicación crecieron dentro de un intervalo de tiempo de menos de 500 años, con edades individuales de registros en ese sitio entre 110 y 250 años. Con el fin de reducir al mínimo la actividad microbiológica después del muestreo, se seca de inmediato al aire durante 30 días en un ambiente de baja humedad. La molienda y homogeneización final se llevaron a cabo en un molino de vapor de alta presión [24].

**IAEA-C6: Azúcar.**

Fue preparado originalmente por el científico checoslovaco H.A. Polach (1925-1996), mediante la selección de un lote de 2 toneladas de caña de sacarosa, para servir como un estándar secundario de  $^{14}\text{C}$  calibrado en relación con ácido oxálico I[24].

**IAEA-C7 y IAEA-C8: Ácido oxálico.**

Uno es producido por la ruta de oxidación de carbohidratos, y el otro es producido utilizando la síntesis  $\text{CO}_2$ -  $\text{H}_2\text{O}$  alcalina. Ambos materiales, que contienen uno niveles modernos de  $^{14}\text{C}$  y el otro es libre de  $^{14}\text{C}$ , se mezclaron los dos juntos en proporciones deseadas por disolución y re-cristalización, en cantidades de 150 kg para cada producto [24].

De todas los estándares mencionados, en el LEMA utilizamos, además del OXII, los materiales VIRI F, VIRI H, C3, C4, C5 y C7. Se han realizado análisis además de C1, C2, VIRI E, y VIRI I, pero estos solamente se han realizado en muy pocas ocasiones, dado que habría muy pocos puntos experimentales donde no se muestra una tendencia clara, los resultados de estos análisis no se presentan en esta tesis.

Para la medición de la masa de todas las muestras se utiliza una balanza METTLER TOLEDO XP6 sensible hasta  $1 \times 10^{-2}$  mg.

#### **4.4.1. Control interno del LEMA**

Con el fin de tener un mejor control, descripción de la muestra y análisis de datos es necesario conocer a detalle los pasos realizados en cada una de las tres etapas anteriores, toda la información

anterior debe ser capturada en una base de datos, la cual se encuentra disponible en las computadoras de el LEMA.

Para el pretratamiento la información capturada fue la clase de pretratamiento al que la muestra era sometida, entre los cuales podía ser:

- ABA (ácido-base-ácido)
- AA (ácido-alcalino)
- Extracción de colágeno empleando el método de Zurich
- Celulosa

Para el proceso de grafitización la información capturada es la siguiente:

- Fecha de grafitización.
- Número de cátodo
- Peso (mg)
- Área C
- %Carbono
- Tasa C/N (carbono-nitrógeno)
- Fecha de prensado

Para el proceso de análisis en el acelerador se capturan los siguientes datos con sus respectivas incertidumbres asociadas.

- Fecha de análisis
- Carrusel
- fmC (fracción moderna de carbono)
- $\delta C^{13}$
- Edad  $^{14}C$  (edad carbono 14)
- Edad calibrada ( $1\sigma$  y  $2\sigma$ )

### 4.5. EMA en Arqueología

Desde su introducción en los años 50's, la datación por radiocarbono ha sido una herramienta importante para los arqueólogos. La recolección de carbón y huesos durante las excavaciones es una práctica usual, y la datación con propósitos de investigación también se ha convertido en una práctica común. Con la técnica EMA es posible fechar material con una vida corta tal como una sola semilla o una hoja de pasto que se encuentren en condiciones aceptables de preservación, pues material con mayor degradación necesitará de mayor cantidad (algunos gramos más) para realizar una buena datación. Muestras muy pequeñas de hueso o de hueso quemado eran imposibles de fecharse anteriormente, pues se requerían grandes cantidades de estos materiales. Además con la

técnica EMA es posible analizar más de un objeto encontrado en un sitio, lo que puede aumentar la fiabilidad de los resultados e incluso dar indicios de posible contaminación.

Hasta hace poco, las pinturas en cuevas eran fechadas de acuerdo con criterios de estilo asociados con fechas obtenidas de restos arqueológicos encontrados en la vecindad de las superficies decoradas. Gracias a los avances en el fechamiento con radiocarbono con EMA ahora es posible fechar directamente los pigmentos de los que están hechas las pinturas.

Ya que la técnica EMA requiere cantidades pequeñas de muestra, es posible llevar a cabo una limpieza exhaustiva de las muestras. De este modo el carbono incorporado posteriormente sobre los huesos puede ser eliminado, de este modo obtener fechas más precisas. Esto es muy importante sobre todo en huesos muy antiguos. Por ejemplo, aplicaciones recientes de esta técnica han mostrado que algunas fechas son de 2000 a 7000 años más antiguas que las edades originalmente estimadas [25].

La técnica EMA también permite saber si una muestra pertenece al lugar en donde se encontró, puesto que la actividad física y biológica pueden causar el movimiento de la muestra que deseamos fechar. Lo anterior puede lograrse fechando piezas individuales de carbón o semillas y comparar las edades con la muestra que deseamos conocer su edad.

## 4.6. Contexto arqueológico

En esta tesis se analizaron los resultados de las edades para muestras provenientes del túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada, ubicado en la Ciudadela en Teotihuacán.

A continuación se tratará de establecer un contexto arqueológico para las muestras, pues recordemos que la técnica de datación por radiocarbono, en su aplicación a la Arqueología, va de la mano con los resultados que se esperan obtener, pues las variabilidades con la edad que se estima deben tener las muestras nos podrían sugerir diversas causas, por ejemplo, el movimiento de las muestras, contaminación, e incluso que las muestras no correspondan al sitio de donde se toman, por ejemplo si nos dan fechas recientes, podrían ser muestras ajenas al contexto, esto sólo por mencionar algunas.

El comienzo formal del estudio sobre Teotihuacán inicia con las primeras excavaciones hechas por Manuel Gamio y su equipo en los años 1917 a 1922, en donde comienza la exploración de los edificios principales de la ciudad (en [33]).

Antes del desarrollo de la técnica de datación por radiocarbono en el año 1946, los arqueólogos ya habían desarrollado técnicas de datación basados en el estudio de objetos cerámicos, así como en las llamadas estratigrafías, entre otros métodos, siendo los que se mencionan los más utilizados en este particular sitio arqueológico, de acuerdo a la literatura del tema.

Para la ciudad de Teotihuacán se han realizado varias cronologías de acuerdo a las cerámicas; en la (Figura 4.4) se presentan la cronología de Rattray (en [26]), la cual también incluye la de Millon, pues la cronología hecha por Rattray se basa en la de Millon para tatar de mejorar la precisión de las fases que ésta presenta. Esta información nos servirá para relacionar los resultados obtenidos con las cronologías ya establecidas. Cabe mencionar que existen otros autores quienes proponen otras cronologías, sin embargo en la literatura consultada en esta tesis, los autores citados se basan principalmente en estas dos.

Una vez desarrollado el contexto arqueológico esperamos poder hallar una relación entre las muestras y su contexto.

#### 4. MATERIALES Y MÉTODO

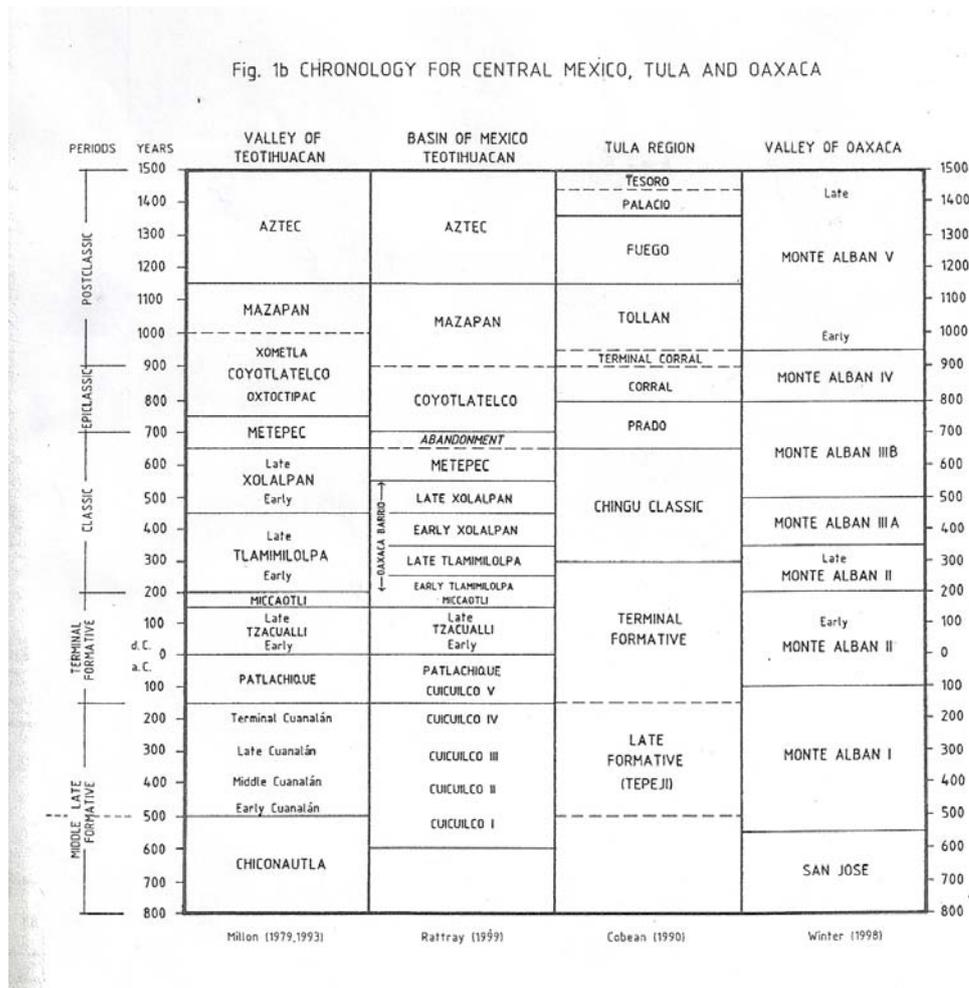


Figura 4.4: Cronología de las fases arqueológicas de Teotihuacán [26].

#### 4.6.1. Aspectos generales de la Ciudad de Teotihuacán

La ciudad de Teotihuacán está situada en la zona denominada como Mesoamérica, a unos 40 km al noreste de la Ciudad de México. Teotihuacán fue la más grande ciudad de Mesoamérica, cubriendo un área de aproximadamente 20km<sup>2</sup> [27]. De acuerdo a las cronologías de Rattray y Millon (en [26]), Teotihuacán se desarrolló aproximadamente entre los años 150 a. C. y 700 d. C. Durante este periodo de tiempo la población en Teotihuacán fue variando, con una tendencia al aumento, siendo a veces “*explosivo*” [27]. La siguiente tabla contiene la cantidad de personas que habitaban la ciudad (aproximadamente) para sus diferentes fases.

Fase	Habitantes (aproximados)
Cuanalán Terminal alrededor de 200 a. C.	1500
Patlachique (150 a. C. – 0)	40000
Tzacualli (0 – 150 d. C.)	50000
Miccaotli (150 – 200 d. C.)	100000
Metepc (650 -750 d. C.)	200000

Tabla 4.2: Población aproximada de Teotihuacán para diferentes fases ( en [29])

Una de las características más destacables de Teotihuacán es su arquitectura, pues de acuerdo con Millon “*Al mapear toda la ciudad también permitió reconocer la complejidad del a planeación urbana*” (en [27]). El siguiente mapa nos muestra la distribución de la ciudad de Teotihuacán [28]. El cuál nos será útil para reconocer de qué lugar provienen las muestras que se han analizado.

# 4. MATERIALES Y MÉTODO

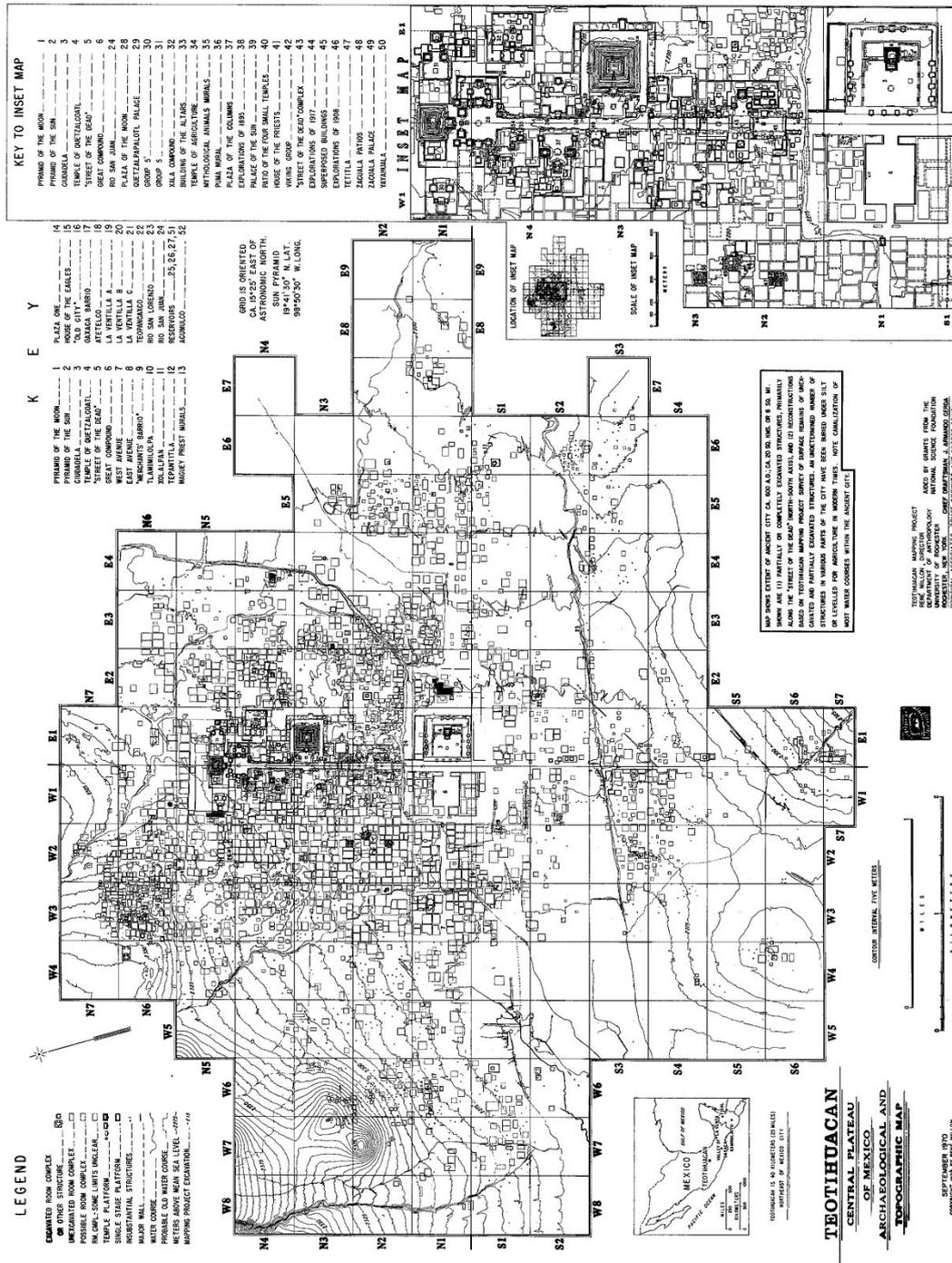


Figura 4.5: Mapa de Teotihuacán [28].

El mapa divide a la ciudad en una rejilla utilizando las direcciones cardinales para indicar la ubicación de cada sector de  $500\text{m} \times 500\text{m}$  en el mapa: N: Norte, S: Sur, E: Este, W: Oeste, respectivamente (debido a que el mapa fue publicado en inglés por René Millon de la Universidad de Rochester en Nueva York), estos sectores se dividen a su vez en secciones de  $100\text{m} \times 100\text{m}$ , las secciones se dividen en unidades de  $10\text{m} \times 10\text{m}$  y dichas unidades se dividen en cuadros de  $1\text{m} \times 1\text{m}$ .

La región norte y sur del mapa se dividen en siete partes, enumeradas como: N1, N2, . . . , N7 y S1, S2, . . . , S7. Para las regiones este y oeste del mapa se dividen como: E1, E2, . . . , E9, y W1, W2, . . . , W8, respectivamente. De este modo se obtiene un sistema de coordenadas sobre el cual se puede ubicar cualquier región dentro de la ciudad utilizando dos de las coordenadas: una vertical y una horizontal de acuerdo al mapa, por ejemplo: N1E1, que nos ubica en la región ocupada por la Ciudadela, lugar de donde provienen las muestras que se analizaron.

En principio se pensaba que la ciudad había sido construida a partir de la región que ocupan las pirámides de la Luna y el Sol y que las construcciones al sur, como la Ciudadela, habían sido concebidas hasta mucho después, sin embargo las excavaciones y los estudios recientes hechos por Gazzola y Gómez, y anteriormente por Cabrera muestran que en la Ciudadela hay construcciones que pertenecen a fases tempranas de la ciudad las cuales se han denominado como pre-Ciudadela (en [30] y [29]).

Teotihuacán fue una comunidad multiétnica, con barrios de personas procedentes de Oaxaca, el Golfo y occidente, como señala Millon: “*La ciudad incluía dos barrios foráneos; la gente en estos vecindarios mantuvo su identidad étnica por 400 años*” (en [27]). Además, la evidencia cerámica muestra objetos pertenecientes a la costa del Golfo y al área Maya (en [27] y [26]). Así también hay muchos elementos teotihuacanos en otras regiones mesoamericanas, tales como cerámica, vasijas y figurillas; representaciones de personajes teotihuacanos, así como elementos arquitectónicos (en [31]).

Respecto a su lenguaje, y debido a esta multiétnicidad, se piensa que en Teotihuacán se hablaba más de una lengua [27]. Sin embargo los teotihuacanos originarios debían manejar un lenguaje propio de su comunidad. King y Gómez inducen que el lenguaje de los teotihuacanos no pudo simplemente desaparecer tras la caída de Teotihuacán, más bien, éste debió esparcirse y mezclarse con otras lenguas, señalan que “*De haber un descendiente moderno del idioma hablado por los teotihuacanos étnicos, éste se encontraría en algún punto cercano a la cuenca de México o al mismo valle de Teotihuacán*”(en [32]).

Al parecer los teotihuacanos desarrollaron una escritura por medio de glifos la cual se piensa que pudo servir para nombrar cosas (personas, lugares, profesiones). King y Gómez nos hablan del descubrimiento de dichos glifos en el barrio de la Ventilla, en la Plaza de los Glifos, en donde se hallaron cerca de 40 glifos, los cuales por sus características pueden estar relacionados con nombres de lugares o bien, algunos de ellos, con el rol que desempeñaban algunos de los teotihuacanos con acceso a la Plaza de los Glifos, pues se piensa que por la disposición arquitectónica del lugar y debido la localización de estos glifos dentro de la plaza, podría indicar que aquí se llevaban a cabo reuniones de carácter institucional. Y con respecto al lenguaje se propone una correspondencia con el proto-nahuatl-pochuteca.

La sociedad teotihuacana al parecer fue muy compleja, no sólo debido al carácter multiétnico de ésta, también se sabe que la población y el gobierno estaban estrechamente relacionados con la religión, pues todas sus construcciones monumentales tienen algún significado simbólico, e incluso la ciudad entera tiene una orientación especial, que se ha relacionado con mitos de la creación, como veremos más adelante.

Otro aspecto importante de la sociedad teotihuacana es la división de las clases sociales en la

misma. Pues existen construcciones donde se observa una clara diferencia entre las viviendas de la clase baja y las de la clase alta, la diferencia radica en el tamaño, acabados en las estructuras y el uso de materiales que pueden considerarse como de lujo, como es el caso de pinturas utilizadas en los murales sobre las construcciones ocupadas por la clase alta (en [29]).

De acuerdo con Manzanilla a partir de la evidencia pictórica se puede proponer que la escala social más alta fue la sacerdotal. Y estos fueron los que llevaban la función de gobernantes, ya que no había una distinción clara entre la función política y ritual [31]. Así también Millon nos habla de que en los últimos 400 a 500 años antes de la caída de Teotihuacán se debió mantener un gobierno colectivo, aunque no hace énfasis en que fuera necesariamente la clase sacerdotal, y propone junto con Cowgill una división de clases sociales (en [27] y [34]).

Otra peculiaridad que se suma a Teotihuacán es el hecho de que sus gobernantes no eran retratados, como sucedía con otras civilizaciones, por ejemplo los mayas. Sin embargo la ciudad en sí fue concebida para ser imponente y demostrar el poderío de los gobernantes, no sólo para los propios teotihuacanos, sino para los forasteros (en [27] y [31]).

#### 4.6.2. Mitología en Teotihuacán

Debido a que la ciudad de Teotihuacán fue abandonada, para reconstruir su mitología se han tomado como referencia muchos de los mitos que sobreviven hoy en día y que “*compartían las sociedades mesoamericanas*” (en [35]), combinándolo con la evidencia física que sobrevive de Teotihuacán: arquitectura, cerámicas, pinturas, y la influencia sobre otros pueblos.

Las deidades principales de la ciudad son: la Gran Diosa, quien se piensa es “*la diosa de las aguas terrenales, madre de los dioses y la montaña fértil de la cual todas las cosas provienen*” (en [27]) a quien se dedica la primera pirámide de la Luna, el Dios de la Tormenta, que de acuerdo a los murales mantenía una subordinación respecto a la Gran Diosa, y la Serpiente Emplumada a quien es dedicado el complejo de la Ciudadela. Es importante mencionar que en la cultura Azteca existen dioses que comparten características con estos, debido a la influencia de Teotihuacán, y que durante las primeras excavaciones en Teotihuacán a sus deidades se les dio el nombre que tenían en la mitología Azteca, así al Dios de la Tormenta se le reconocía como Tláloc, y a la Serpiente Emplumada se le identificaba como Quetzalcóatl.

Para las civilizaciones de Mesoamérica, las cuevas eran de suma importancia, pues se creía que a través de ellas se podía llegar al inframundo “*un lugar acuático colmado de riquezas de las semillas nutricias y habitado por deidades y fuerzas creadoras encargadas de mantener el orden del universo*” (en [35]). En Teotihuacán es evidente que se mantenía esta creencia, pues fue construida sobre un conjunto de cuevas. Respecto a las cuevas, también se tiene la creencia de que eran lugares de surgimiento, de nacimiento. Así, sobre la cueva sagrada se levantaba la “*Montaña Sagrada*” la cual “*emergió del mar primordial y marco el inicio de la cuenta de los días*” (en [35]).

Además de lo anterior, Teotihuacán posee una orientación especial, toda la ciudad fue construida con un ángulo de 15°25' respecto al este del norte geográfico. Y de acuerdo a Millon Teotihuacán “*... fue orientada al día en el que el tiempo comenzó, porque una creencia es que ahí fue donde el tiempo comenzó, el plano de las construcciones con esta orientación distintiva pudo haber sido una eterna celebración de esto*” (en [27]).

Millon también menciona que no sólo los teotihuacanos, sino también los pueblos que rodeaban la ciudad, consideraban que la cueva sagrada de Teotihuacán era la fuente del cosmos. Lo que es otra muestra del poderío de Teotihuacán sobre otras regiones [27].

### 4.6.3. Decadencia y abandono de Teotihuacán

Existen diversas teorías respecto a la caída de Teotihuacán. Hacia la fase Metepec ocurrió un estancamiento en la industria cerámica. Hubo un declive gradual, así como un decremento en la población por falta de inmigrantes hacia la ciudad [36]. También se sabe que, en la misma fase, la ciudad fue incendiada como indica Cabrera acerca del conjunto 1C' ubicado en la Ciudadela: *“El incendio que devastó la ciudad, muestra claramente estragos en todos los cuartos de este conjunto ... donde hemos encontrado restos carbonizados de gruesas vigas que formaban los soportes de los techos”* (en [33]); además de ser saqueada, tal como indican Jarquin y Martínez sobre el saqueo en el Conjunto 1D también ubicado en la Ciudadela: *“Es realmente sorprendente la dispersión de los objetos y la variedad de los mismos... No es exclusiva de este grupo la violencia ahí realizada, ya que para el Conjunto en general se muestran al interior de los cuartos grandes huellas de saqueo”* (en [37]).

También hay huellas de incendio sobre la Calzada de los Muertos y en algunos edificios pertenecientes a los conjuntos habitacionales y templos (en [27], [31] y [29]). De las diversas teorías que existen sobre el abandono de la ciudad, citamos la hecha por Gómez y Gazzola, pues en su artículo *Una Propuesta Sobre el Proceso, Factores y Condiciones del Colapso de Teotihuacán*, nos presentan las diversas teorías, y nos muestran el porqué muchas de ellas no tienen una buena base de argumentación, pues no son el resultado de un minucioso análisis de toda la información y datos que hay disponibles sobre la ciudad.

los autores formulan una hipótesis muy completa basada tanto en evidencia arqueológica y de reconocimiento del área sobre la que se desarrolla Teotihuacán, los recursos que disponía la ciudad, así como las tecnologías desarrolladas por los teotihuacanos y las relaciones sociales que existían entre sus pobladores.

Señalan que las huellas de incendio presentan ciertos patrones, y esto no coincide con comportamientos violentos por parte de quién los llevó a cabo, más bien podrían corresponder con rituales de desacralización, es decir que probablemente los mismos teotihuacanos realizaban rituales de terminación del uso de sus distintas construcciones, lo que también descarta que fueran extranjeros los que realizaron el incendio.

Nos muestran que los gobernantes y la clase alta derrochaban los recursos de la ciudad, pues la ciudad presenta una constante remodelación de los edificios principales, ya que estos contienen varias capas de construcción en diferentes fases de desarrollo de la ciudad, “empleando en ello cantidades de materiales y fuerza de trabajo difíciles de calcular” (en [29]). Además señalan que debieron existir conflictos internos hacia las últimas etapas de ocupación pues se han localizado construcciones que dificultan el paso hacia lugares que anteriormente parece que se tenía mayor acceso, también hacia esta fase se observa una cantidad mayor de representaciones bélicas y desmantelamiento de construcciones. Lo que puede deberse al descontento de la sociedad teotihuacana con su gobierno.

También hacen un análisis acerca de los recursos a los que los teotihuacanos pudieron tener acceso, pues toman en cuenta que los recursos que existen hoy en día en la región cambiaron con el tiempo. Relacionan la cantidad de alimentos que pudieron haberse obtenido de los campos de cultivo cercanos y consideran también las técnicas de cultivo desarrolladas en la época, de este modo muestran que no es posible mantener poblaciones tan grandes con tan sólo esa producción. Observan, además, que sobre los campos de cultivo fueron construidos conjuntos habitacionales, pues *“las parcelas de cultivo fueron invadidas por la mancha urbana y los canales de riego se rellenaron con cerámica, lítica y otros desperdicios. O se transformaron en drenajes para captar agua de lluvia de los nuevos conjuntos habitacionales”* (en [29]). De modo que la producción de alimentos debió dejarse a las poblaciones a las afueras de la ciudad que estaban bajo el mando de

los gobernantes de Teotihuacán. Lo cual hacia las fases tardías de la ciudad, con la cantidad de población existente, el abasto de alimentos pudo volverse un problema.

Aunado a esto, debieron enfrentar problemas al no desarrollar formas de transporte que resultaran eficientes. Gómez y Gazzola nos dicen que los teotihuacanos conocían la rueda, pero no la emplearon en el diseño de algún transporte.

Los excesos de la clase dominante, y todos los problemas mencionados antes, generaron un distanciamiento con las clases más bajas, y debido a políticas que atendieran las necesidades de la población, no sólo de la élite, el distanciamiento aumentó, lo que generó un “*vacío de poder*”. Que más tarde llevaría a los teotihuacanos a comenzar con el abandono de la ciudad, y después del incendio vino el saqueo de los templos y edificios, pues se piensa que los mismos teotihuacanos fueron los que se llevaron, en su migración, las distintas ofrendas que existían en dichos templos. Finalmente los templos quedaron en ruinas.

Después del incendio de la ciudad hubo una nueva ocupación, por los mismos teotihuacanos, sin embargo Teotihuacán no pudo recuperar su esplendor, las migraciones continuaron hasta que la ciudad quedó abandonada por completo.

#### 4.6.4. La Ciudadela

Como mencionamos antes, el lugar de donde provienen las muestras es de la Ciudadela de Teotihuacán (Figura 4.6). En esta zona se llevaron a cabo excavaciones las cuales muestran distintas etapas de construcción, que van desde la fase Tzacualli, hasta la fase Metepec. Los restos de las construcciones más tempranas se denominan pre-Ciudadela (en [38]), la cual tiene por lo menos dos etapas constructivas y un entierro relacionado con éstas construcciones por ritos de sacrificio (extracción de corazón) (en [39]). Durante las excavaciones se han encontrado tiosos de la fase Tzacualli (en [38]).

La siguiente etapa constructiva es la Ciudadela. Para esta fase se tienen confirmados 4 niveles de ocupación (en [38]). El edificio principal de la Ciudadela es el Templo de la Serpiente Emplumada, referido como Templo de Quetzalcóatl en los artículos aquí citados correspondientes a los años 80's.

Las primeras excavaciones se realizaron con el fin de fechar el templo. Excavaciones posteriores muestran que existen entierros en cada una de las esquinas del basamento, que de acuerdo con el número y la ubicación, se piensa que el templo tiene un significado cosmogónico relacionado con el conteo del tiempo (en [38]). Así pues, debido a las esculturas en su fachada, “*el arquitecto Marquina propone 366 cabezas de serpiente y Tláloc*” (actualmente reconocido por Dios de la Tormenta) colocadas en los cuatro lados del edificio (en [40]).



Figura 4.6: Vista aérea del conjunto de la Ciudadela, foto hecha por Dra. Julie Gazzola.

Existe también un edificio anterior que pudo igualmente estar decorado con grandes bloques de piedra esculpida, denominado pre-templo de Quetzalcóatl (por el año en el que se redactaron los artículos), el cual fue desmantelado y algunos de sus materiales integrados en el relleno de la nueva construcción.

Para el Templo de la Serpiente Emplumada se reconoce una etapa más la cual se denomina Post - Templo de la Quetzalcóatl, esta etapa se refiere al Templo de la Serpiente Emplumada cuando éste “sufrir una serie de modificaciones, destrucciones y saqueos después de concluir la construcción” (en [38] y [39]).

Hacia el lado Este del Templo de Quetzalcóatl existe un túnel utilizado para realizar el saqueo de la ofrenda fundacional del templo. El túnel inicialmente se fechó para el año 400 d. C. (en [38]), pero tal fecha se corrigió tiempo después y se declaró que el túnel pertenecía a la fase Metepec. Además se tiene evidencia de que el túnel fue utilizado por mucho tiempo, quizá hasta el abandono completo de la ciudad (en [39]).

Dentro de la Ciudadela existen construcciones conocidas como conjuntos 1C, 1D y 1E, los cuales también presentan distintas fases de construcción, al igual que el templo.

El Conjunto 1C se encuentra al Noreste del Templo de la Serpiente Emplumada. El conjunto está compuesto de nueve aposentos con sus pórticos al frente, distribuidos en cinco secciones que se comunican entre sí por medio de pasillos y de muros divisorios situados todos están rodeando al enorme patio central, elemento clave de todo el conjunto. Este conjunto muestra huellas de incendio. Y hacia las fases tardías de la ciudad muestra construcciones que restringen el acceso al conjunto (en [33]).

Los conjuntos 1D y 1E se ubican de modo simétrico al Norte y al Sur del Templo de la Serpiente Emplumada. La parte explorada del conjunto 1E en 1917 comprende una de las cinco secciones conocidas como “*palacio Rojo*”, (en [38]). El Conjunto 1D “*consta de cinco grupos habitacionales el cual consiste en una plaza central y cuartos alrededor de éste, orientados a los cuatro puntos cardinales, se mantiene una estrecha relación entre los grupos*” (en [37]). Respecto a los ocupantes de estos conjuntos, se piensa que debieron ser la élite del poder, pero debido a que no es completamente claro quién pertenece a dicha élite, esta puede componerse de sacerdotes, gobernantes políticos o bien militares.

Así también a todo el conjunto de la Ciudadela se le da una connotación religiosa, política o bien militar (en [27], [30], [33], [35], [37], [38], [39], [40]). Sin embargo descubrimientos recientes hechos por Gómez y Gazzola, revelan nuevos datos que podrían aclarar el uso de esta gran construcción.



Figura 4.7: Templo de la Serpiente Emplumada. Fuente: foto tomada de internet, perteneciente a la revista Arqueología Mexicana.

#### 4.6.5. El túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada

En el artículo “*Avances en la exploración del túnel bajo el Templo de La Serpiente Emplumada en Teotihuacán. Escenificaciones rituales y políticas en La Ciudadela*” escrito por Sergio Gómez y Julie Gazzola, los autores nos hablan de este descubrimiento de gran importancia.

Hacia el año 2003 los arqueólogos Sergio Gómez y Julie Gazzola, junto con su equipo, descubrieron “*frente a la escalinata de la Plataforma Adosada del Templo de la Serpiente Emplumada. . . un tiro de 83 cm de diámetro y más de 12 metros de profundidad*” (en [35]), el cuál conducía hacia un túnel orientado de Este a Oeste. El túnel tiene cerca de 103 metros de largo. Se localizaron muros transversales para evitar el acceso al túnel, estos muros tienen hasta 3 metros de ancho, la evidencia muestra que antes habían sido construidos y que más tarde se demolieron para que los teotihuacanos entraran una vez más al túnel, para más tarde colocar tierra entre los muros. Al final del túnel se localizaron 3 cámaras de aproximadamente 6x3 metros de superficie. Los autores señalan que “*la profundidad a la que se encuentra el piso del túnel indica la intención expresa de localizar el nivel freático, que en esa época se hallaba aproximadamente a 12 metros de la superficie*” (en [35]).

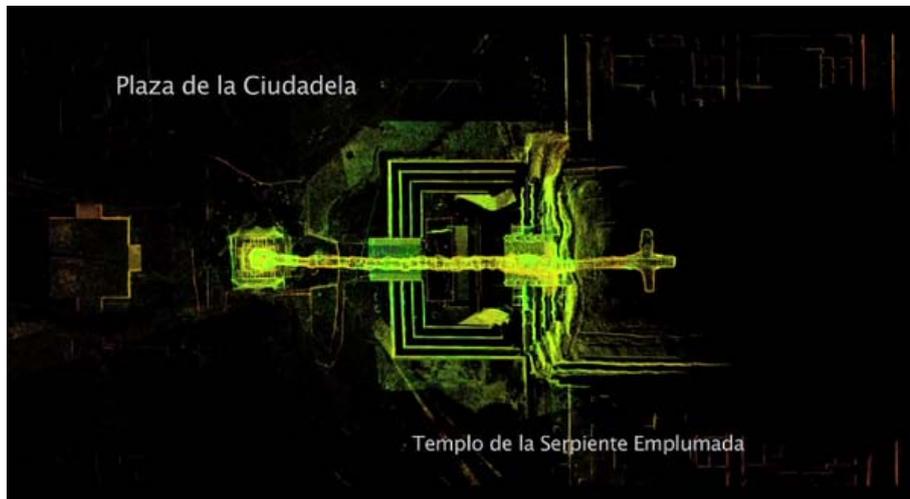


Figura 4.8: Diagrama del túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada, vista aérea. Fuente: Ciclo de conferencias del proyecto Tlalocan, Gómez y Gazzola



Figura 4.9: Diagrama del túnel bajo el Templo de la Serpiente Emplumada, vista de perfil. Fuente: Ciclo de conferencias del proyecto Tlalocan, Gómez y Gazzola

El descubrimiento de este túnel es importante para el estudio de Teotihuacán, pues una característica importante es que a diferencia de otras partes de Teotihuacán, el túnel no presenta huellas de saqueo, y por lo tanto los elementos que se encuentran dentro serán de gran utilidad para conocer mejor esta civilización. Además el descubrimiento del túnel sugiere que el complejo de la Ciudadela pudo haber tenido un uso político-religioso. Exaltando este último, pues se piensa que todo el complejo fue diseñado para representar al cosmos de acuerdo a sus creencias.

Los autores nos hablan de que hay una relación estrecha entre el diseño y los mitos de creación no sólo teotihuacanos, sino mesoamericanos: *“El Templo de la Serpiente Emplumada no solo era el axis mundi, el eje que permitía la unión y comunicación de los tres diferentes niveles verticales [del cosmos] y conexión con los rumbos del universo; la pirámide representaba la “Montaña Sagrada” ... aquella que emergió del mar primigenio y estableció el inicio del tiempo mítico, de la cuenta de los días, del calendario. . .”* [35]. Debido a la orientación del túnel se piensa que este conduce al inframundo pues: *“al inframundo, al Tlalocan se accedía desde el poniente”* [35]. Y el mismo túnel es la representación del camino para acceder al inframundo.

Respecto al *“Mar Primigenio”* se tiene evidencia de que los teotihuacanos clausuraron los drenajes con el fin de inundar la plaza de la Ciudadela, y así crear un espejo de agua, el cual representaría dicho mar.

De modo que los autores consideran que debido a las dimensiones y disposición de la Ciudadela y de este nuevo descubrimiento, este complejo debió utilizarse para llevar a cabo rituales en donde se recreaba el inicio del tiempo y donde *“los gobernantes recibían la investidura divina”* [35]. Se cree que no sólo los gobernantes de la ciudad, sino también los gobernantes de los pueblos fuera de la ciudad pero que estaban bajo el mando de Teotihuacán.

#### 4.6.6. Muestras de la zona arqueológica de Teotihuacán

De las muestras utilizadas, algunas de ellas se analizaron a la par en el LEMA y en el ETH Zurich. Las muestras se enumeran y describen a continuación. Observemos que para la datación de las muestras sólo nos interesa saber de qué tipo de material está compuesta la muestra, esto es necesario para darle el pretratamiento adecuado a cada muestra, la información adicional fue proporcionada por los arqueólogos encargados del proyecto Tlalocan y se refiere a su propia no-

menclatura de los lugares en donde se recolectaron las muestras, donde observamos utilizando el mapa de Teotihuacán se encuentran en la zona N1E1, correspondiente a la Ciudadela, además con números romanos nos dicen en qué capa estratigráfica se encontraron.

- ETH 46925  
M 1. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,1,23,33,43*.II túnel. Tlalocan. Bolsa 2053,2010
- ETH 46926  
M 2. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,1,21*.III túnel. Tlalocan. Bolsa 2101,2010
- ETH 46927  
M 3. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,2,11*.VIII e túnel. Tlalocan. Bolsa 3038,2011
- ETH 46928  
M 4. 1 fragmento de carbón. *N1E1,12,10,29,39,49,59*. IV tiro. Tlalocan. Bolsa 1645,2010
- ETH46929  
M 5. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,5,64*.V. túnel. Tlalocan. Bolsa 3698,2012
- ETH 46931  
M6. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,1,22*.III túnel. Tlalocan. Bolsa 2157,2010
- ETH 46932  
M 7. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,2,22*.IIa. túnel Tlalocan. Bolsa 3258,2011
- ETH 46933  
M 8. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,1,32*.IX. túnel. Tlalocan. Bolsa 2735,2011
- ETH 46934  
M 9. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,1,32*.XII. túnel. Tlalocan. Bolsa 2733,2011
- ETH 46935  
M 9 b. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,1,21,31,41*.I. túnel. Tlalocan. Bolsa 1984,2010
- ETH 46936  
M 10. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,1,32*.XIV. túnel. Tlalocan. Bolsa 3187,2011

Además de estas muestras, se analizaron treinta muestras más, que son las siguientes.

- LEMA 39  
M 18. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,8,31 – 61,32 – 62*. II. Bolsa no 6171, asociado a elemento 30. Tlalocan.
- LEMA 40  
M 19. 1 fragmento de carbón. *N1E1,13,6*.II. Bolsa no 5555, asociado a elemento 31. Tlalocan.

#### 4. MATERIALES Y MÉTODO

---

- LEMA 41  
M 20. 1 fragmento de carbón. N1E1,13,5,74.V. Bolsa no 3451, asociado a elemento 21. Tlalocan.
- LEMA 42  
M 21. 1 fragmento de carbón. N1E1,13,3,22 – 52.VIIIa. Bolsa no 4103. Tlalocan.
- LEMA 43.1.2  
M 22. 1 fragmento de carbón. N1E1,13,4,46 – 66,47 – 67.VIIIa. Bolsa 4353, asociado a elemento 27. Tlalocan.
- LEMA 43.1.3  
M 22. 1 fragmento de carbón. N1E1,13,4,46 – 66,47 – 67.VIIIa. Bolsa 4353, asociado a elemento 27. Tlalocan.
- LEMA 44.1.2  
M 23. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 45  
M 24. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 46  
M 25. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 47  
M 26. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 48  
M 27. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 49  
M 28. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 50  
M 29. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 51  
M 30. 1 fragmento de carbón. N1E1.tramo 76 – 103.I. superficie entrada cámara. Tlalocan.
- LEMA 52  
M 31. 1 fragmento de tepetate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos. N1E1.tramo 76 – 103.I. pared entrada
- LEMA 53  
M 32. 1 fragmento de tepetate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos. N1E1.tramo 76 – 103.I. pared entrada cámara. Tlalocan.

■ LEMA 54

M 33. 1 fragmento de tepetate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos. N1E1.tramo 76 – 103.I. pared entrada cámara. Tlalocan.

■ LEMA 57

M36. Carbón N1 tramo 76 – 103,1 superficie Tlalocan

■ LEMA 58

M 37. Semillas. N1E1,13,6.metro 53 – 55.II. Objeto 15, elemento 31. Bolsa no 5652. Tlalocan.

■ LEMA 59

M 38. Tierra asociada al Elemento 42 (madera). N1E1,13 Cuadro 14', Capa II, Profundidad 15.17. Metro 81 – 82. Bolsa no. 8769. Tlalocan. Carbón en suelo

■ LEMA 160

M38b suelo. N1E1 Tramo 76 – 103,1 superficie entrada cámara Tlalocan

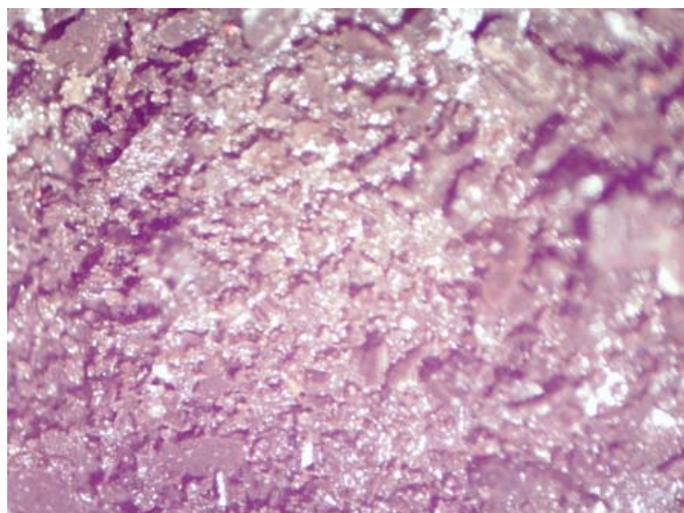


Figura 4.10: Muestra LEMA 160

■ LEMA 161, M 39. 1 garra, asociada al Elemento 46. N1E1.13 Cuadro 42' -53', Capa II, Profundidad 15.12- 15.38. Metro 90-94. Bolsa no. 8620. Tlalocan.

■ LEMA 162

M 40. Madera, asociada al Objeto 13 del Elemento 42. N1E1,13 Cuadro 15', Capa II, Profundidad 14,90. Metro 80 – 81. Bolsa no. 8343. Tlalocan.



Figura 4.11: Muestra LEMA 162

■ LEMA 163

M 41. Fibras del Objeto 43 (cesto o canasta), Elemento 31. N1E1.13.6 Cuadrante 10, Capa VIII, Profundidad 13.25. Metro 53 – 55. Bolsa no. 6541. Tlalocan.



Figura 4.12: Muestra LEMA 163

■ LEMA 164

M 42. Fragmentos de semillas de maíz del interior del Objeto 24, Elemento 31. N1E1,13,6 Cuadrante 9, Capa VIII, Profundidad 13,27. Metro 53 – 55. Bolsa no. 5569. Tlalocan.



Figura 4.13: Muestra LEMA 164

■ LEMA 165

M 43. Cerámica con material orgánico (quizá flores), del Objeto 47, Elemento 31. *N1E1,13,6*, Capa VIII, Profundidad 12,92 – 13,0. Metro 90 – 94. Bolsa no. 6027. Tlalocan.



Figura 4.14: Muestra LEMA 165

■ LEMA 166

M 44. Colmillo jaguar asociada al elemento 46. *N1E1.13*. Cuadros 45-. Capa II Prof 15,40 – 15,47 metro 91 – 92 bolsa 8415. Tlalocan



Figura 4.15: Muestra LEMA 166

■ LEMA 167

M 45. Madera asociada al elemento 42 N1E1.13 Cuadro 13.Capa II. Prof 14.90. Metro 80 – 11. Bolsa no. 8949. Tlalocan.



Figura 4.16: Muestra LEMA 167

■ LEMA 168

M 46. Carbón en el interior de un hueco en pared norte por encima de la línea negra. N1E1.13. Metro 91. Bolsa No. 9318 Tlalocan.



Figura 4.17: Muestra LEMA 168

- LEMA 182

M 47. Fragmento de bola de hule. *N1E1,13/,12 – 44 II. 15 – 14,54 – 14,35* Bolsa No. 8539  
Tlalocan Arcilla sin Carbón



Figura 4.18: Muestra LEMA 182

- LEMA 214

Hule 7337 sección 13. Cuadro 97 – 87 Savia color claro.

- LEMA181 y 181b

M 48. Fragmento de mandíbula con diente. *N1E1,13/12 – 44 II.15,14 – 15,35* Bolsa 8539.Tlalocan.



Figura 4.19: Muestra LEMA 181

### 4.7. Uso del programa OxCal para el cálculo de las edades calendario

El programa OxCal es un programa de cómputo cuya finalidad es trasladar las edades radiocarbóno a edades calendario. Éste fue desarrollado en la Universidad de Oxford, y puede ser descargado a una computadora o se puede utilizar la versión en línea; ambas se encuentran disponibles en la siguiente página de internet [c14.arch.ox.ac.uk/embed.php?File=oxcal.html](http://c14.arch.ox.ac.uk/embed.php?File=oxcal.html). Para los fines de esta tesis se utilizó la versión en línea. Para poder hacer uso del programa es necesario crear una cuenta en la página, para lo cual hay que proporcionar un correo electrónico y un nombre de usuario. Una vez creada la cuenta, la contraseña de ingreso es enviada al correo proporcionado.

El programa utiliza las nociones presentadas anteriormente con respecto a las curvas de calibración y el cálculo de la edad.

Al ingresar se encuentra una pantalla como la siguiente (Figura 4.20). En donde deberemos crear un archivo nuevo para comenzar, para ello se presiona el menú **File**→**New**, como se muestra en la imagen.

#### 4.7. Uso del programa OxCal para el cálculo de las edades calendario

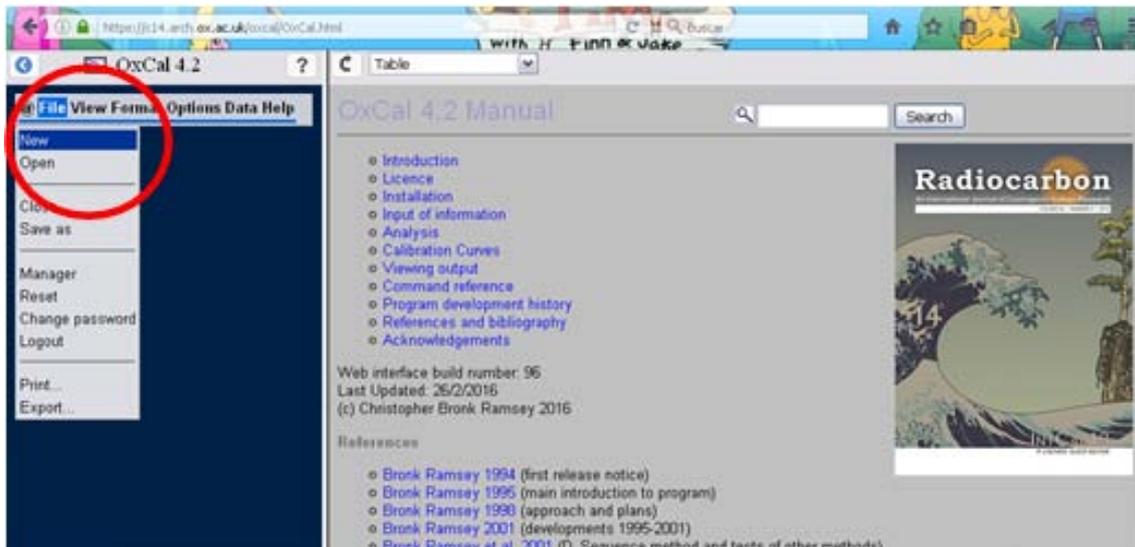


Figura 4.20: Ventana del programa OxCal. Archivo nuevo.

Esto nos abrirá una nueva ventana, para poder ingresar los datos que hemos obtenido del acelerador, debemos presionar **Insert** (recuadro 1), estos datos son la edad radiocarbono y la incertidumbre de la medida. Además se deberá proporcionar el nombre de la muestra, en nuestro caso el nombre será el mismo con el que la muestra fue etiquetado en el laboratorio (clave LEMA). Para confirmar los datos y que estos se registren en el programa, debemos presionar el ícono marcado con el doble cocodrilo (recuadro 2), Figura 4.21.

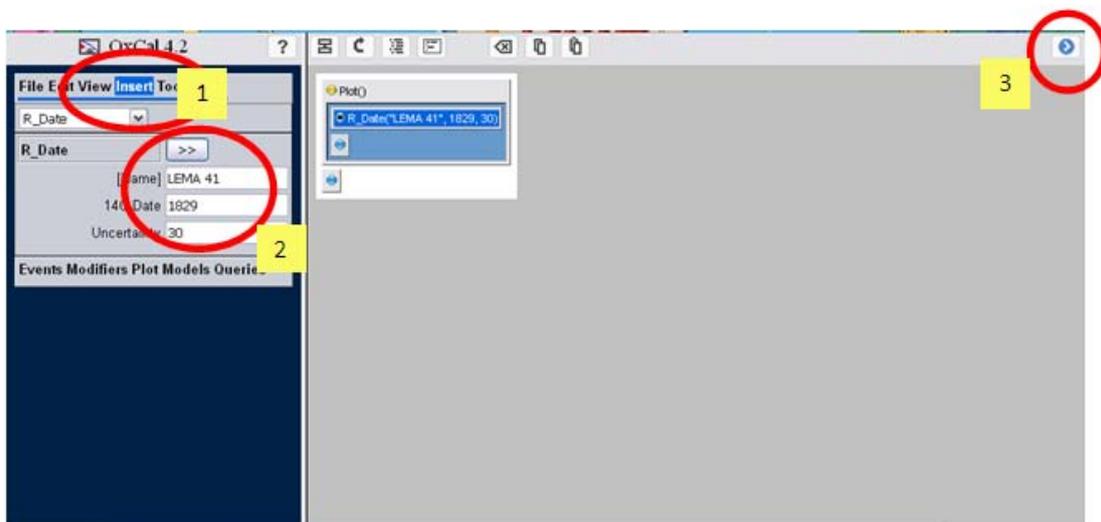


Figura 4.21: Ventana del programa OxCal. Captura de datos.

Para ingresar más datos, simplemente escribimos sobre los mismos espacios señalados en el recuadro 2 de la Figura 4.21, recordemos que los anteriores ya los hemos capturado, y no se borrarán a menos que se haga de forma manual. Una vez capturados, se guardan de la misma forma. Lo siguiente es guardar el archivo que hemos creado para que se pueda llevar a cabo

#### 4. MATERIALES Y MÉTODO

el cálculo. Para ello presionamos **File** → **Save** o bien presionamos la flecha que aparece en la esquina superior derecha de la pantalla (Figura 4.21, recuadro 3), y aparecerá un diálogo en el cual deberemos dar nombre a nuestro archivo, presionamos **Save** para guardarlo, Figura 4.22.

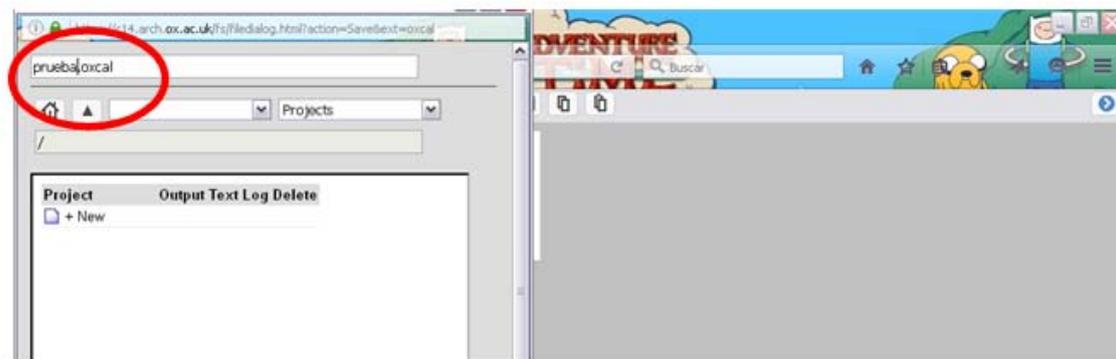


Figura 4.22: Ventana del programa OxCal. Guardar archivo.

Si hemos ingresado muchos datos será necesario abrir una nueva ventana para abrir el documento guardado, si no, podemos cotinuar, esto lo sabremos porque aparece la siguiente ventana, Figura 4.23, en la que los datos que hemos ingresado se han limpiado y aparecen ahora en el espacio de trabajo del programa. Para poder obtener los gráficos oprimimos **Table** y se desplegará un menú en donde podremos visualizar varias opciones. Para esta tesis se hicieron gráficas en donde se incluían varios resultados, para ello se debe oprimir **Multiplot**, pero si lo que nos interesa es la información de una sólo muestra, presionamos **Single plot**. Para fines educativos, en la Figura 4.24 se muestra la ventana cuando se oprime la opción **Single Plot**.

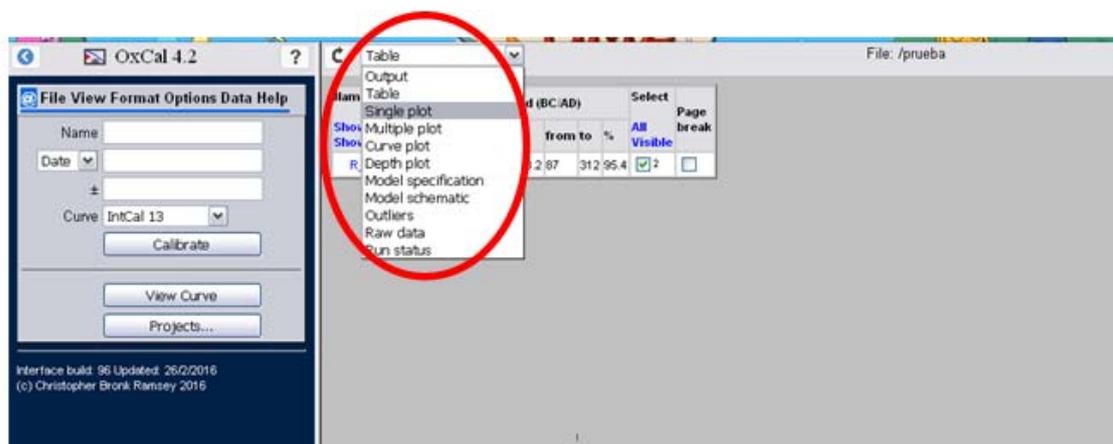


Figura 4.23: Ventana del programa OxCal. Generación de gráficas.

Como podemos observar, la gráfica nos mostrará información nueva, la que nos interesa es la edad calendario que cae dentro del 95 % de probabilidad. Lo siguiente que hacemos será guardar la gráfica en un formato que podamos usar. Para ello presionamos **File** → **Print** y aparecerá un cuadro de diálogo en el que deberemos de presionar **Download** para crear un archivo **.pdf** que podemos guardar en nuestro equipo.

#### 4.7. Uso del programa OxCal para el cálculo de las edades calendario

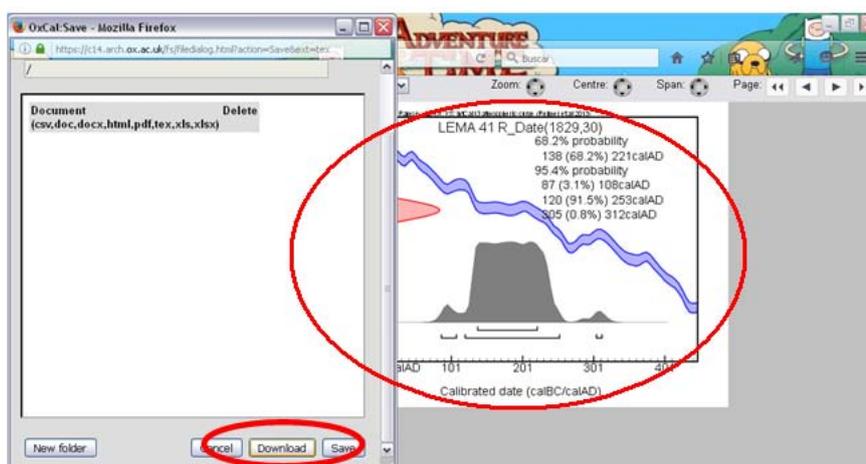


Figura 4.24: Ventana del programa OxCal. Generación de imágenes.

De esta manera obtendremos las edades calendario de cada una de nuestras muestras.



## CAPÍTULO 5

### Resultados y análisis

A continuación se muestran los resultados obtenidos, primero para los materiales estándar internacionales, y segundo para la comparación entre el LEMA y el laboratorio de espectrometría de masas con aceleradores del ETH Zurich. Finalmente se muestran los resultados obtenidos para las muestras del sitio arqueológico de Teotihuacán correspondientes a el túnel debajo del Templo de la Serpiente Emplumada.

Para todas las muestras que fueron analizadas en el espectrómetro de masas con acelerador del LEMA, cada muestra se analiza en 9 ciclos de 15000 cuentas de  $^{14}\text{C}$  en bloques de 30 segundos. Las mediciones obtenidas son tomadas en cuenta en nuestros resultados siempre y cuando las corrientes de  $^{12}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$  se mantengan estables. De lo contrario es necesario repetir las mediciones.

#### 5.1. Resultados para el material estándar internacional

El LEMA inició su funcionamiento desde el año 2013, los resultados aquí analizados corresponden a los años 2013, 2014 y 2015, para los estándares C3, C4, C5, C7, VIRI F, y OXA II. Cabe mencionar que otros estándares como C1, C2, VIRI I y VIRI H, también son analizados, sin embargo no se han hecho suficientes repeticiones para obtener gráficas que nos dieran una tendencia clara.

La siguiente tabla nos muestra los valores de consenso para los materiales estándar.

Muestra	Material	$^{14}\text{C}$ (pMC) $\pm$	Edad BP $\pm$	$\delta^{13}\text{C}$ $\pm$
VIRI F	Hueso de caballo	73.19 $\pm$ 0.4	2 513 $\pm$ 40	-20,51 s/r
C7	Ácido oxálico	49.53 $\pm$ 0.12	5 642 $\pm$ 150	-14,48 s/r
C5	Madera	23.05 $\pm$ 0.02	11 788 $\pm$ 300	-25,49 $\pm$ 0.72
C4	Madera	0.2 $\pm$ 0.44	46 146 $\pm$ 1000	-23,96 $\pm$ 0.62
C3	Celulosa	129.41 $\pm$ 0.06	-2071 $\pm$ 40	-24,91 $\pm$ 0.49

Tabla 5.1: Valores de consenso de los materiales estándar

El procedimiento para analizar los datos será como sigue, se presentan los datos tal y como fueron obtenidos, veremos la tendencia que tienen, y se tratará de explicar por qué algunos de ellos salen de ésta. La línea roja en las gráficas representa el valor de la edad de consenso, mientras que las líneas rojas punteadas nos muestran la incertidumbre de dicha edad, pues recordemos que la edad de consenso también es un resultado experimental y por tanto su incertidumbre también debe ser representada en las gráficas para tener un mejor entendimiento de nuestros resultados.

## 5.1.1. Resultados para VIRI F

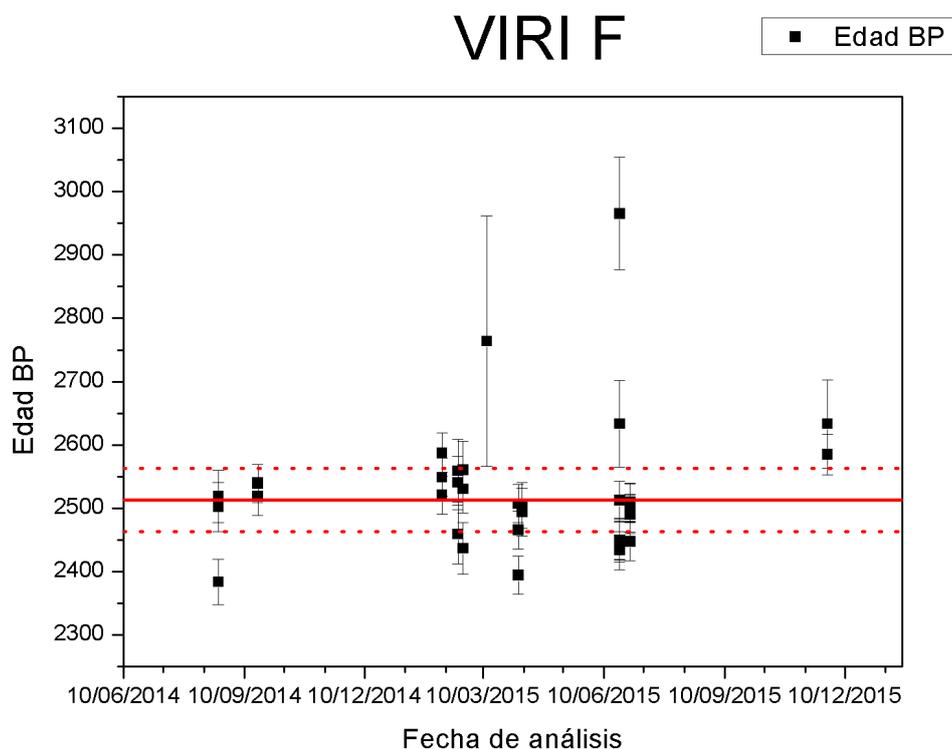


Figura 5.1: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar VIRI F

En la Figura 5.1 se muestra la gráfica de los datos obtenidos de 2013 a 2015 para el material estándar VIRI F.

La muestra etiquetada como 131.1.15 fue analizada el día 3 de marzo de 2015, en esta fecha de análisis resulta con una edad de 2763.418 años BP, lo cual difiere de la edad de consenso en 250.41 años. En este caso se percibió dicha falla y se repitió el análisis el día 6 de abril de 2015, dando una edad de 2465.772 años BP que tan sólo difiere en 47.22 años de la edad de consenso.

Para el análisis de muestras del día 22 de junio del 2015, las muestras etiquetadas como 131.19 y 131.20 difieren de la edad de consenso en 452.200 y 120.128 años respectivamente. Lo que podemos observar es que en el caso de ambas muestras las cantidades de masa que fueron introducidas al acelerador contienen sólo el 10% de carbono del que normalmente tienen las muestras del mismo tipo, lo cual puede presentar problemas en la homogeneidad de la muestra lo cual podría hacer que la concentración de los diferentes isótopos sea diferente a la regular.

## 5.1. Resultados para el material estándar internacional

Tomando en cuenta lo anterior, podemos replantear la gráfica de la Figura 5.1, debido a que los valores que no son congruentes no están relacionados con la ejecución de la técnica EMA (pretratamiento y análisis en el acelerador)

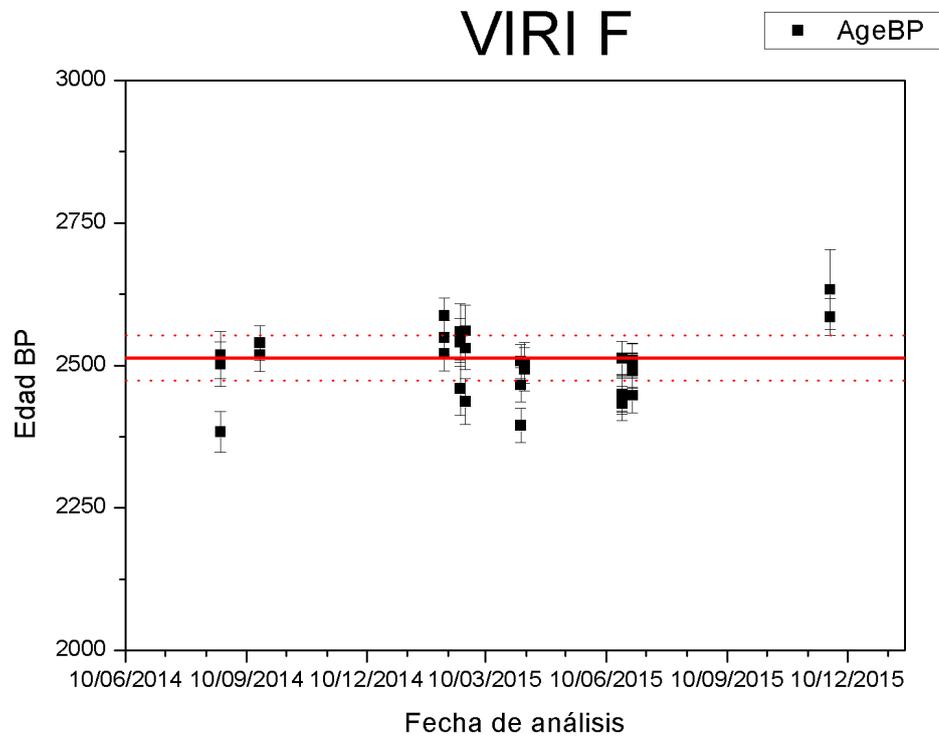


Figura 5.2: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar VIRI F corregida

## 5.1.2. Resultados para C7

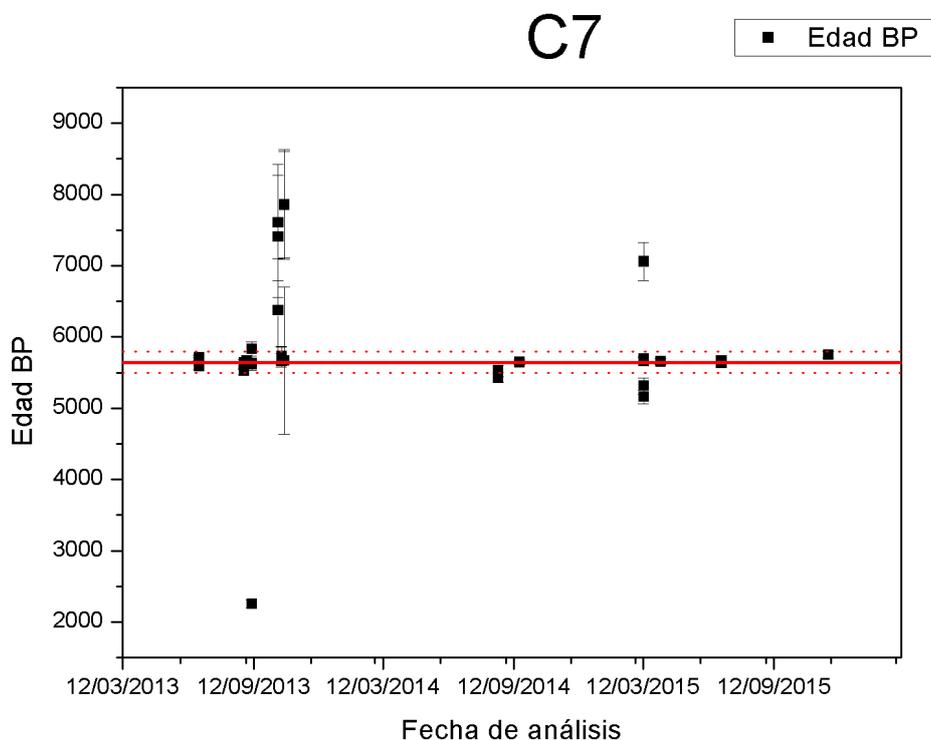


Figura 5.3: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C7

En la Figura 5.3 se muestra la gráfica de los datos obtenidos de 2013 a 2015 para el material estándar C7.

Para la muestra etiquetada como 7.1.9 analizada el día 9 de septiembre de 2013 se obtuvo una edad de 2310.10 años BP, lo cual difiere de la edad de consenso en 3331.9 años, vemos que la diferencia es demasiada, encontramos que el mismo día se llevó a cabo el análisis de muestras de material textil, el cual resultó con edades congruentes con la obtenida en este caso para el C7, por lo que podemos decir que hubo un error al etiquetar las muestras.

Las muestras analizadas el día 21 de octubre de 2013 etiquetadas como 7.1.12, 7.1.13 y 7.1.14, debido a las discrepancias, el análisis fue repetido.

La muestra etiquetada como 7.1.20 analizada el día 13 de marzo de 2015 nos da una edad de 7058.36 la cual difiere en 1416 años con respecto a la edad de consenso, en este caso la masa de carbono es de tan sólo el 10% la masa que normalmente se utiliza para la medición de este tipo de muestra, por lo cual la muestra puede tener poca homogeneidad, es importante observar que las muestras analizadas el mismo día 7.1.18, 7.1.19, y 7.1.21 que son de masas similares nos dan resultados que son congruentes con la edad de consenso, por lo que podemos decir que el pretratamiento de las muestras fue correcto y por lo tanto no tuvo consecuencias negativas en el resultado obtenido.

## 5.1. Resultados para el material estándar internacional

Tomando en cuenta lo anterior, podemos replantear la gráfica de la Figura 5.3, debido a que los valores que no son congruentes no están relacionados con la ejecución de la técnica EMA (pretratamiento y análisis en el acelerador)

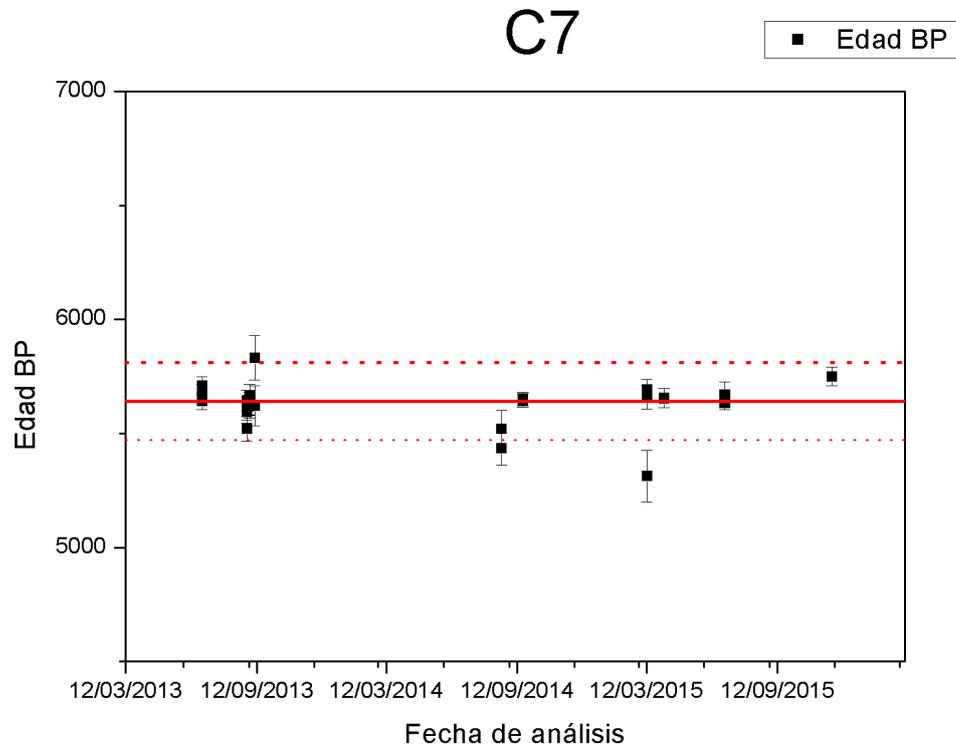


Figura 5.4: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C7 corregida

## 5.1.3. Resultados para C5

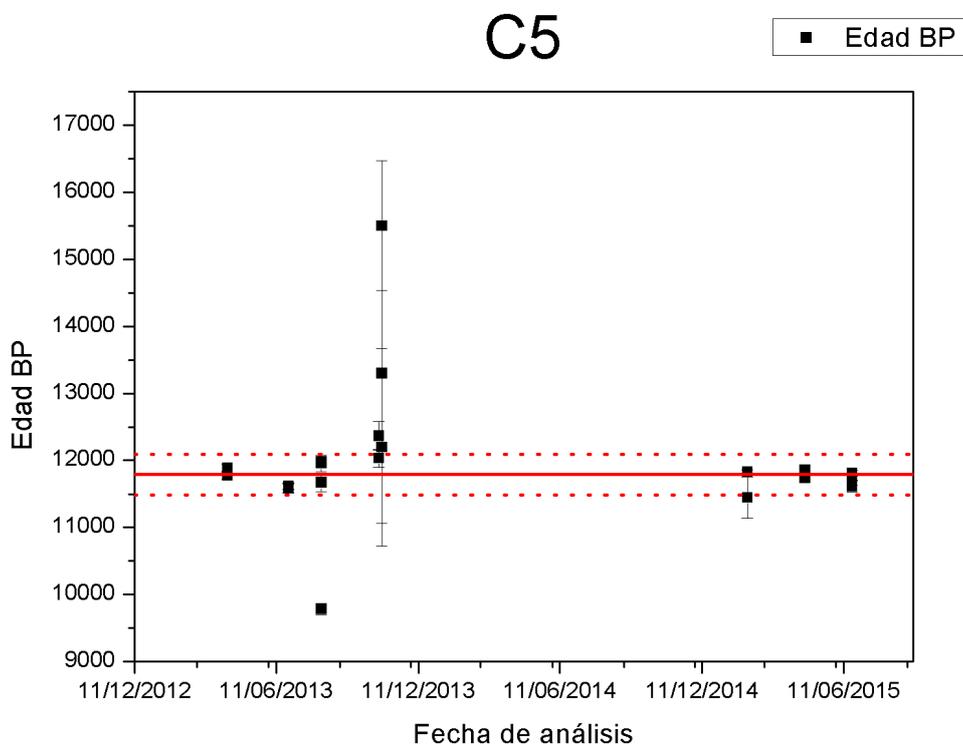


Figura 5.5: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C5

En la Figura 5.5 se muestra la gráfica de los datos obtenidos de 2013 a 2015 para el material estándar C5.

Al parecer existió una confusión al analizar las muestras etiquetadas como 5.1.12, 5.1.13 y 5.1.14 analizadas el día 25 de octubre de 2013, pues existe el registro de su masa en los archivos del grafitizador, pero no hay ningún resultado de el porcentaje de carbono, el porcentaje de nitrógeno, entre otros resultados que el grafitizador proporciona, por lo cual se piensa que las muestras probablemente entraron al análisis en el acelerador sin pasar por el proceso de grafitización, lo cual claramente muestra una gran discrepancia entre las edades obtenidas y la edad de consenso. Sin embargo se observa que la preparación y el análisis de estas muestras se repitieron en fechas posteriores.

Para la muestra etiquetada como 5.1.7 analizada el 8 de agosto de 2013, se obtuvo una edad de 9 786 años BP, lo que difiere de la edad de consenso en 2002 años, sin embargo se observa que otras tres muestras del mismo material etiquetadas como 5.1.4, 5.1.5 y 5.1.6 analizadas el mismo día muestran edades congruentes con la edad de consenso, por lo cual pensamos que se trata, ya sea de una muestra mal etiquetada, o bien algún valor atípico debido a algún tipo de contaminación con carbono moderno.

Tomando en cuenta lo anterior, podemos replantear la gráfica de la Figura 5.5, debido a que los valores que no son congruentes no están relacionados con la ejecución de la técnica EMA (pretratamiento y análisis en el acelerador)

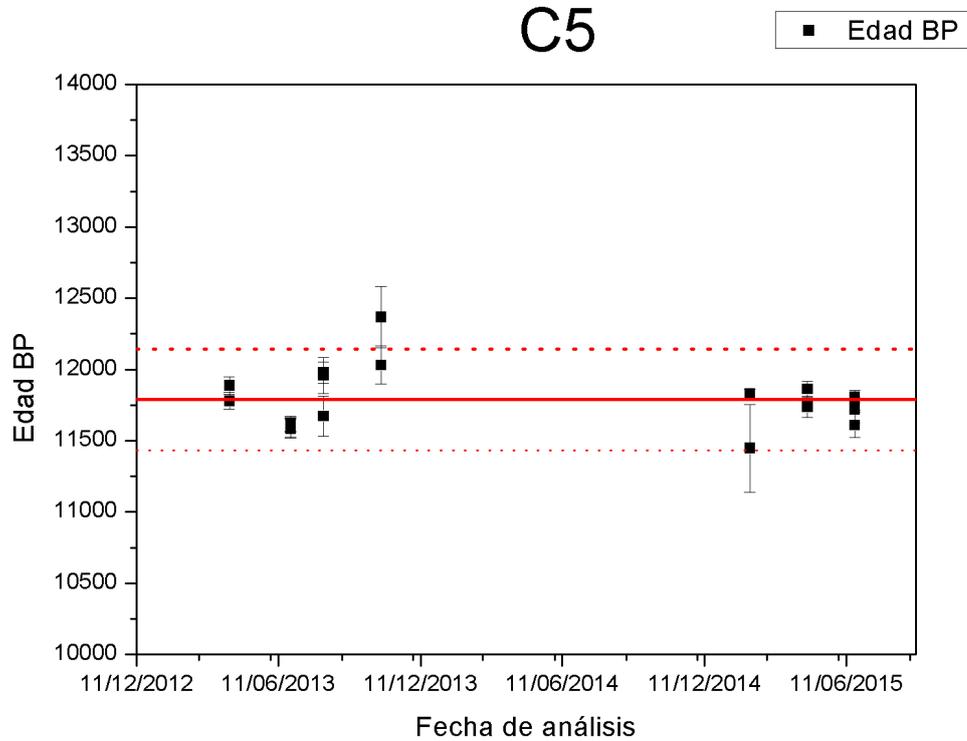


Figura 5.6: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C5 corregida

## 5.1.4. Resultados para C4

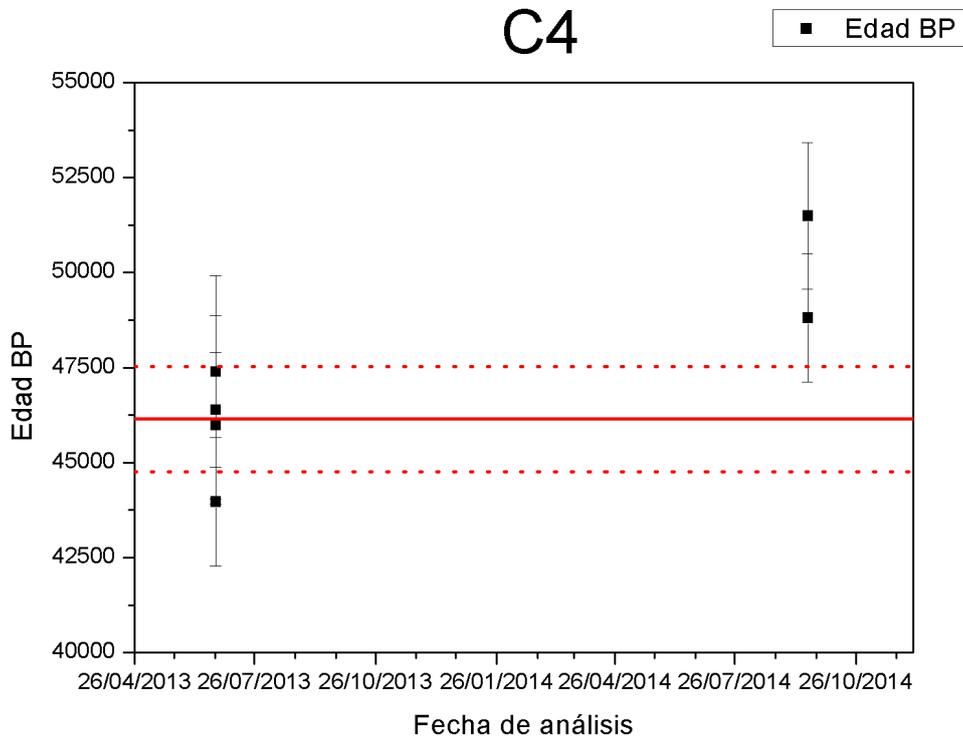


Figura 5.7: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C4

En la Figura 5.7 se muestra la gráfica de los datos obtenidos de 2013 a 2015 para el material estándar C4.

En este caso, la muestra etiquetada como 4.1.10, no entra en el valor aceptable para decir que la edad es congruente con la edad de consenso, observamos que en este caso las corrientes de  $^{14}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$  son bajas en comparación con las de las otras muestras del mismo tipo, también observamos que las edades para el C4 resultan ser muy antiguas, casi en el límite de las edades que pueden ser medidas con EMA, por lo cual podemos suponer que en este caso la muestra perdió radiocarbono por fraccionamiento isotópico.

Debido a que se tienen pocos puntos experimentales no se ha considerado necesario rehacer esta gráfica.

## 5.1.5. Resultados para C3

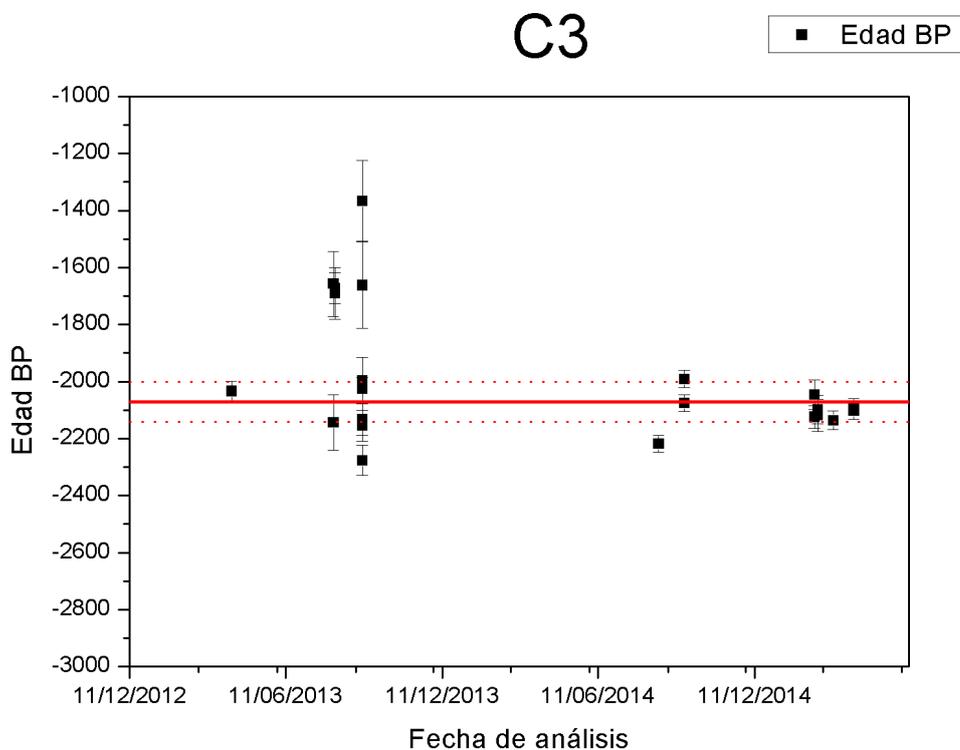


Figura 5.8: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C3

En la Figura 5.8 se muestra la gráfica de los datos obtenidos de 2013 a 2015 para el material estándar C3.

De las tablas de resultados, podemos observar que en este caso, las muestras etiquetadas como 3.1.2, 3.1.3, analizadas el día 06 de agosto de 2013, las muestras 3.1.5 y 3.1.6 analizadas el día 08 de agosto de 2013, la muestra 3.1.8 y 3.1.13 analizadas el 9 de septiembre de 2013, y la muestra etiquetada como 3.1.15 analizada el día 21 de agosto de 2014, presentan valores de fraccionamiento isotópico ( $\delta^{13}\text{C}$ ) muy alejados del valor de consenso, esto como vimos antes significa que hay un empobrecimiento de carbono con respecto al resto del material, recordemos que el fraccionamiento isotópico se obtiene de los cocientes de los isótopos de carbono, y como también podemos observar, hay un empobrecimiento de  $^{14}\text{C}$ , todo esto tiene como consecuencia que la edad obtenida en el LEMA no coincida en este caso con la edad de consenso. Se observa además que en el caso de la muestra 3.1.10, su análisis se llevó a cabo junto con otras tres muestras del mismo tipo, resultando estas tres con edades consistentes con la edad de consenso, por lo cual podemos decir que el problema de fraccionamiento no estuvo necesariamente ligado con el pretratamiento de las muestras.

En el caso de la muestra etiquetada como 3.1.11, no se observa una gran variación en los datos obtenidos en comparación con los resultados que arrojan una edad congruente, sin embargo se observa que sale del rango de lo aceptable con respecto a la edad de consenso, en este caso los datos no nos dan indicio de lo que pudo salir mal.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tomando en cuenta lo anterior, podemos replantear la gráfica de la Figura 5.8, debido a que los valores que no son congruentes no están relacionados con la ejecución de la técnica EMA (pretratamiento y análisis en el acelerador)

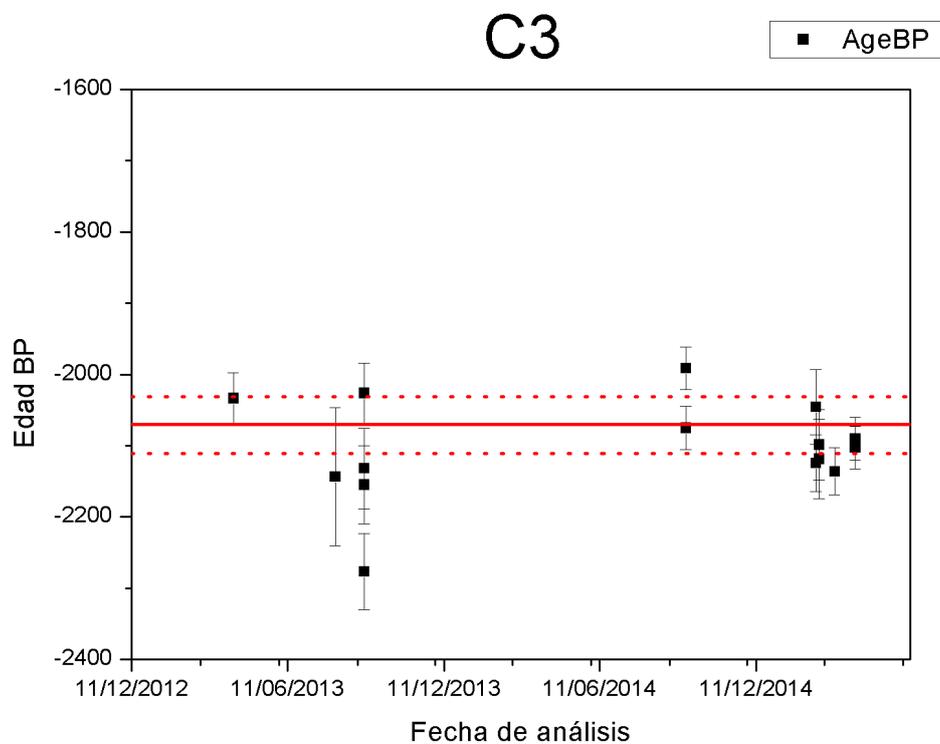


Figura 5.9: Gráfica de fecha de análisis vs Edad radiocarbono (BP) para el material estándar C3 corregida

### 5.1.6. Resultados para OXA II

En la Figura 5.10 se muestra la gráfica de los datos obtenidos de 2013 a 2015 para el material estándar OXA II.

Es de importancia el observar el comportamiento del ácido oxálico OXA II, pues como vimos este es el material con el que realizamos la normalización de todos los datos que obtenemos. Podemos observar que en general el comportamiento es bueno, pues no vemos saltos en los valores que se obtienen para este material. Considerando la incertidumbre de los datos, todos son congruentes con la fracción moderna de consenso.

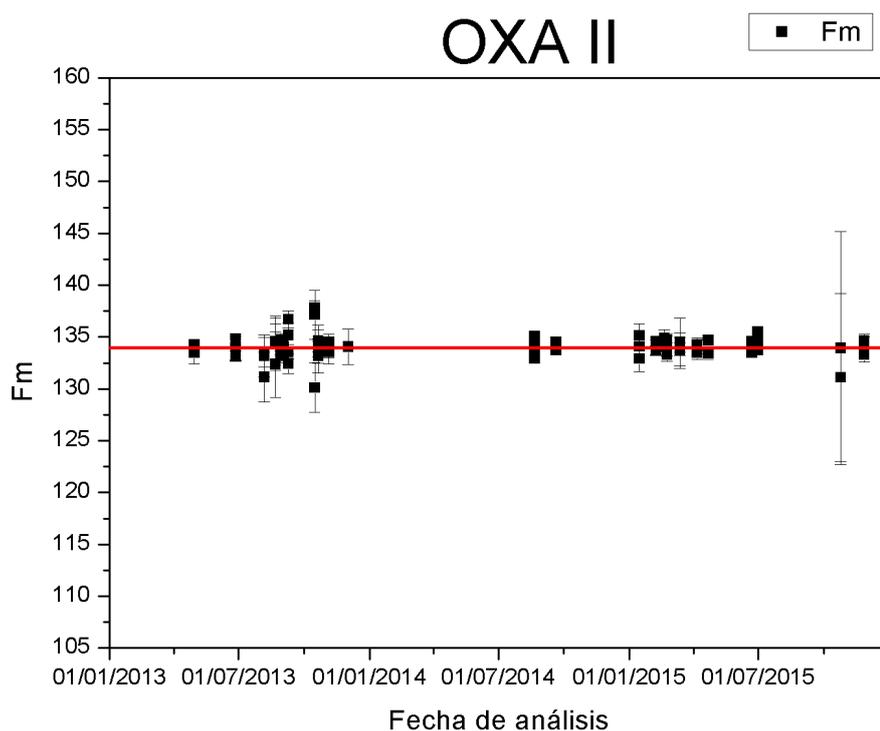


Figura 5.10: Gráfica de fecha de análisis vs Fracción moderna (Fm) para el material estándar OXA II

## 5.2. Resultados de la comparación ETH Zurich-LEMA

Para esta comparación se tomaron 8 muestras, antes especificadas, las cuales se analizaron paralelamente en el ETH Zurich y en el LEMA, a continuación se muestran los resultados obtenidos.

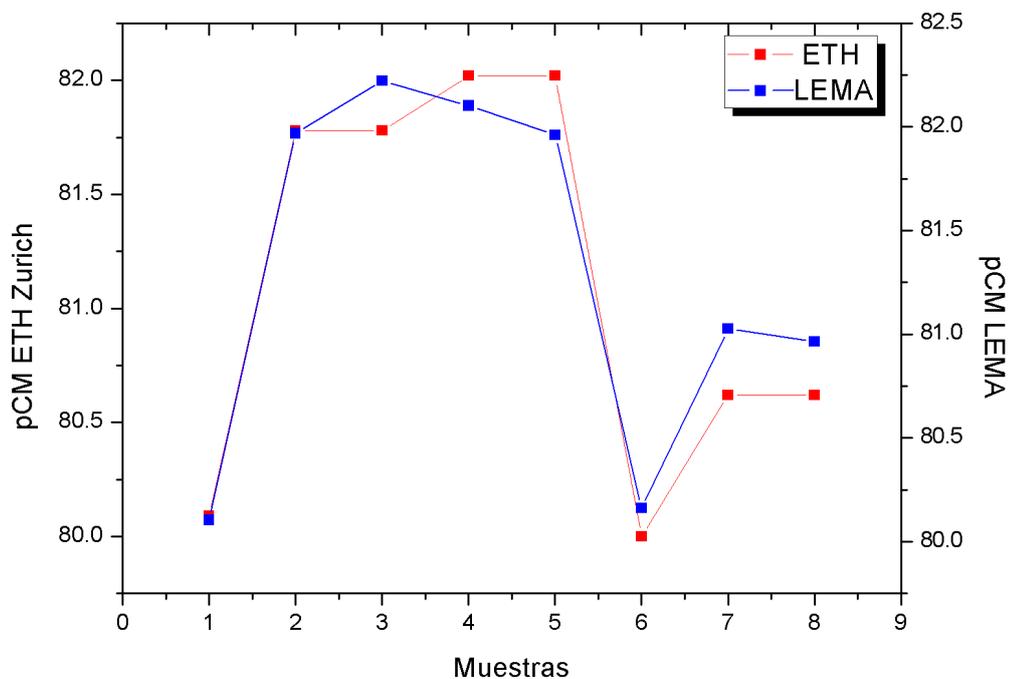


Figura 5.11: Gráfica de los resultados obtenidos en porcentaje de carbono moderno pCM, ETH Zurich en azul, LEMA en rojo

Como podemos observar los valores son muy parecidos, sin embargo para estar seguros de que existe una buena correspondencia, graficamos los valores en una curva pCM ETH Zurich contra pCM LEMA, para ver con claridad cómo es la pendiente, pues esta nos dirá si tal correspondencia de valores existe.

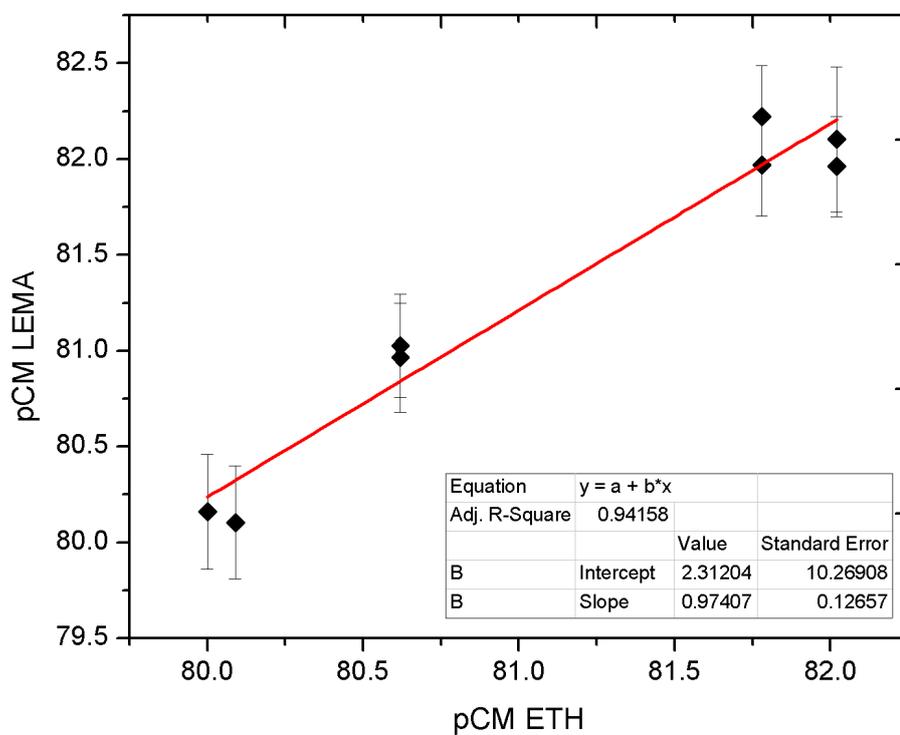


Figura 5.12: Gráfica de los resultados obtenidos en pCM ETH contra LEMA

Como la gráfica nos indica, la pendiente de la recta es de  $0,974 \pm 0,126$ , es decir, dentro del intervalo de error se tiene una correspondencia uno a uno entre los resultados de ambos laboratorios.

### 5.3. Resultados de las muestras de la Ciudadela

A continuación se presenta una tabla de datos que contiene las edades radiocarbono obtenidas mediante la técnica EMA y el resultado de las edades calendario calibradas utilizando el programa OxCal. Debido a que no son demasiados datos se presentan en esta sección y no en el apéndice, como en el caso de los resultados para los estándares internacionales.

Clave	Material	Edad radiocarbono BP	Edad calibrada $2\sigma(95\%)$
ETH 46925	carbón	$1811 \pm 27$	120 – 320 d.C.
ETH 46926	carbón	$1855 \pm 27$	80 – 230 d.C.
ETH 46927	carbón	$1770 \pm 26$	130 – 350 d.C.
ETH 46928	carbón	$1783 \pm 26$	130 – 340 d.C.
ETH 46929	carbón	$1615 \pm 26$	390 – 540 d.C.
ETH 46931	carbón	$1766 \pm 26$	130 – 350 d.C.
ETH 46932	carbón	$1832 \pm 26$	80 – 250 d.C.
ETH 46933	carbón	$1873 \pm 26$	70 – 220 d.C.
ETH 46934	carbón	$1823 \pm 26$	120 – 260 d.C.
ETH 46935	carbón	$1592 \pm 29$	405 – 540 d.C.
ETH 46936	carbón	$1807 \pm 27$	120 – 320 d.C.
LEMA 39	carbón	$1539 \pm 35$	425 – 595 d.C.
LEMA 40	carbón	$1848 \pm 30$	180 – 232 d.C.
LEMA 41	carbón	$1829 \pm 30$	87 – 312 d.C.
LEMA 42	carbón	$1903 \pm 30$	27 – 212 d.C.
LEMA 43.1.2	carbón	$1804 \pm 30$	129 – 325 d.C.
LEMA 43.1.3	carbón	$1833 \pm 30$	130 – 257 d.C.
LEMA 44.1.2	carbón	$1712 \pm 30$	251 – 396 d.C.
LEMA 45	carbón	$1581 \pm 35$	402 – 554 d.C.
LEMA 46	carbón	$1592 \pm 30$	405 – 540 d.C.
LEMA 47	carbón	$1585 \pm 35$	400 – 550 d.C.
LEMA 48	carbón	$1589 \pm 30$	406 – 542 d.C.
LEMA 49	carbón	$1566 \pm 35$	412 – 568 d.C.
LEMA 50	carbón	$1581 \pm 35$	402 – 554 d.C.
LEMA 51	carbón	$1600 \pm 30$	399 – 539 d.C.

Tabla 5.2: Edades radiocarbono y edades calendario para las muestras de la Ciudadela.

### 5.3. Resultados de las muestras de la Ciudadela

Clave	Material	Edad radiocarbono BP	Edad calibrada $2\sigma(95\%)$
LEMA 53	fragmento de pe- tate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos	$18826 \pm 120$	21039 – 20484 a.C.
LEMA 54	fragmento de pe- tate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos	$18000 \pm 140$	20281 – 19473 a.C.
LEMA 57	carbón	$1636 \pm 30$	340 – 535 d.C.
LEMA 58	semillas	No tuvo carbón	No tuvo carbón
LEMA 52	fragmento de pe- tate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos	$15550 \pm 100$	17056 a.C. – 16646 a.C.
LEMA 59	carbón en suelo	$1676 \pm 35$	254 – 428 d.C.
LEMA 160	suelo	$4191 \pm 50$	2900 – 2626 a.C.
LEMA161	garra	No se midió	No se midió
LEMA 162	madera	$1500 \pm 30$	432 – 639 d.C.
LEMA 163	fibras (cesto)	Poco carbón	Poco carbón
LEMA 164	Semillas	Poco carbón	Poco carbón
LEMA 165	cerámica con material orgánico	$2981 \pm 40$	1376 – 1056 a.C.
LEMA 166	colmillo de jaguar	$1844 \pm 30$	182 – 235 d.C.
LEMA 167	madera	$1533 \pm 30$	428 – 596 d.C.
LEMA 168	carbón	$1739 \pm 30$	237 – 385 d.C.
LEMA 182	hule	Poco carbón	Poco carbón
LEMA 181 a	mandíbula	$1627 \pm 30$	350 – 536 d.C.
LEMA 181 b	mandíbula	$1649 \pm 35$	262 – 535 d.C.
LEMA 214	Hule	$1500 \pm 30$	432 – 639 d.C.

Tabla 5.3: Edades radiocarbono y edades calendario para las muestras de la Ciudadela

Para un mejor análisis se han generado las siguientes gráficas para realizar una comparación gráfica de las edades obtenidas.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

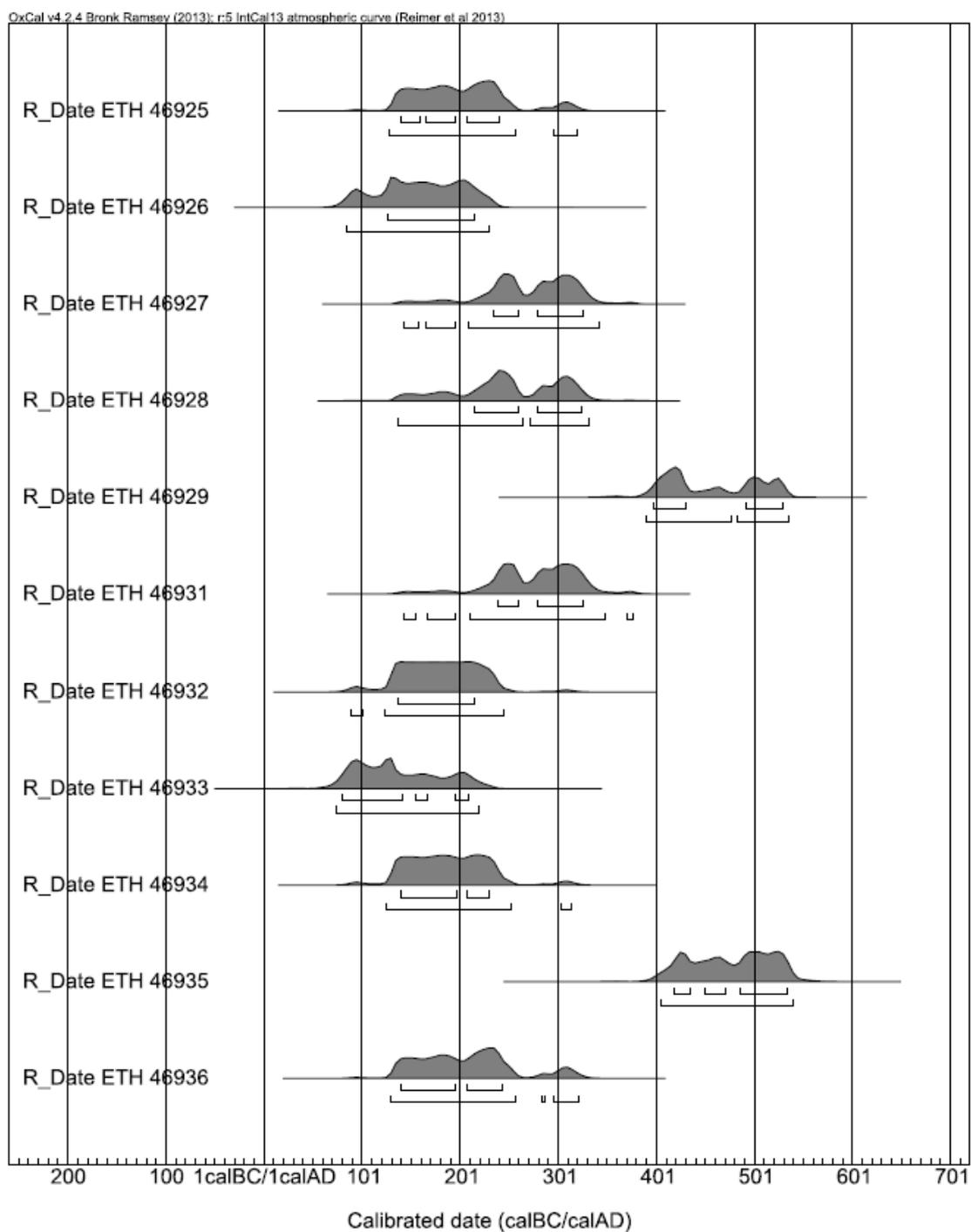


Figura 5.13: Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras analizadas entre el LE-MA y el ETH, para las muestras de la Ciudadela

### 5.3. Resultados de las muestras de la Ciudadela

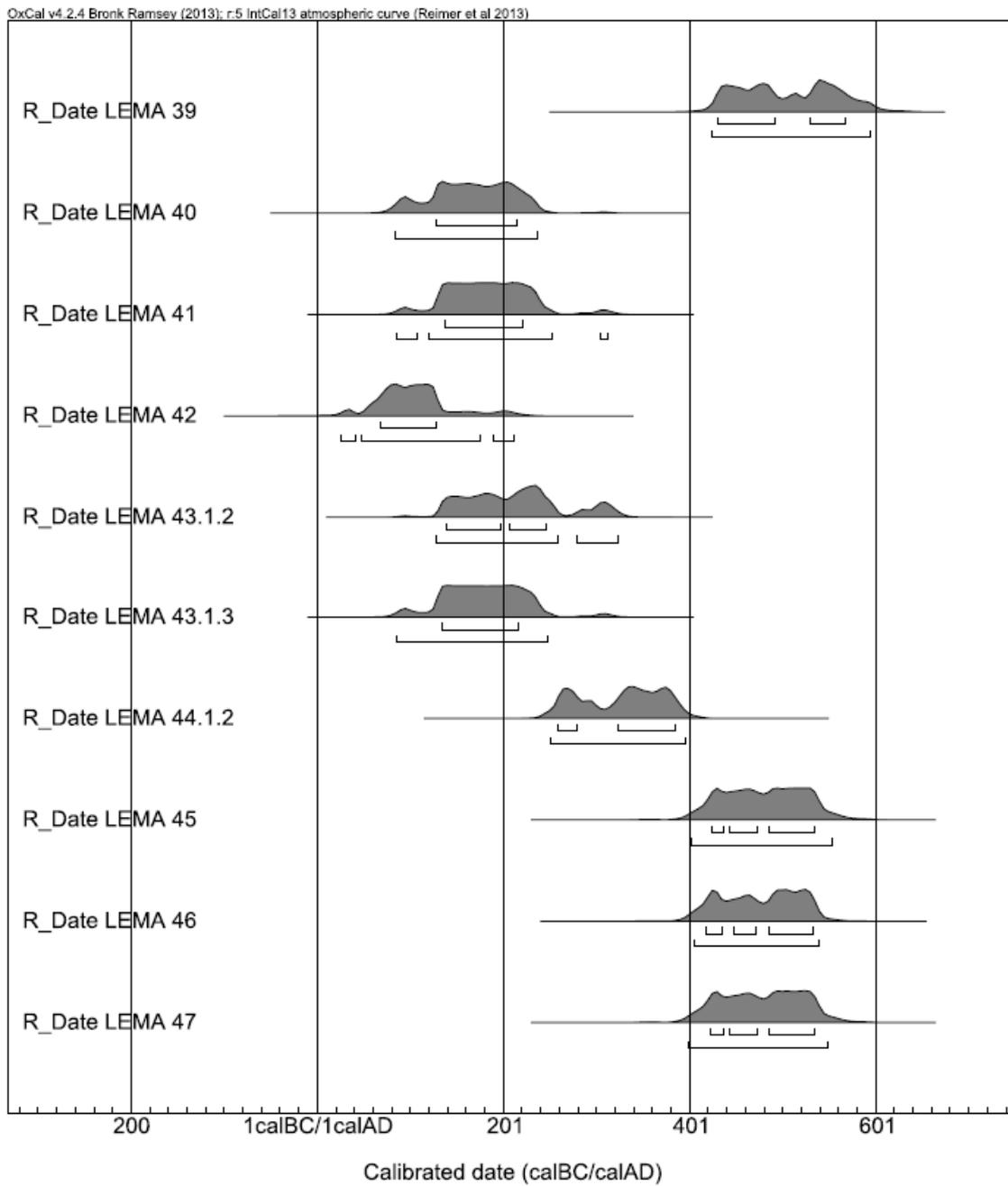


Figura 5.14: Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, primera parte.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

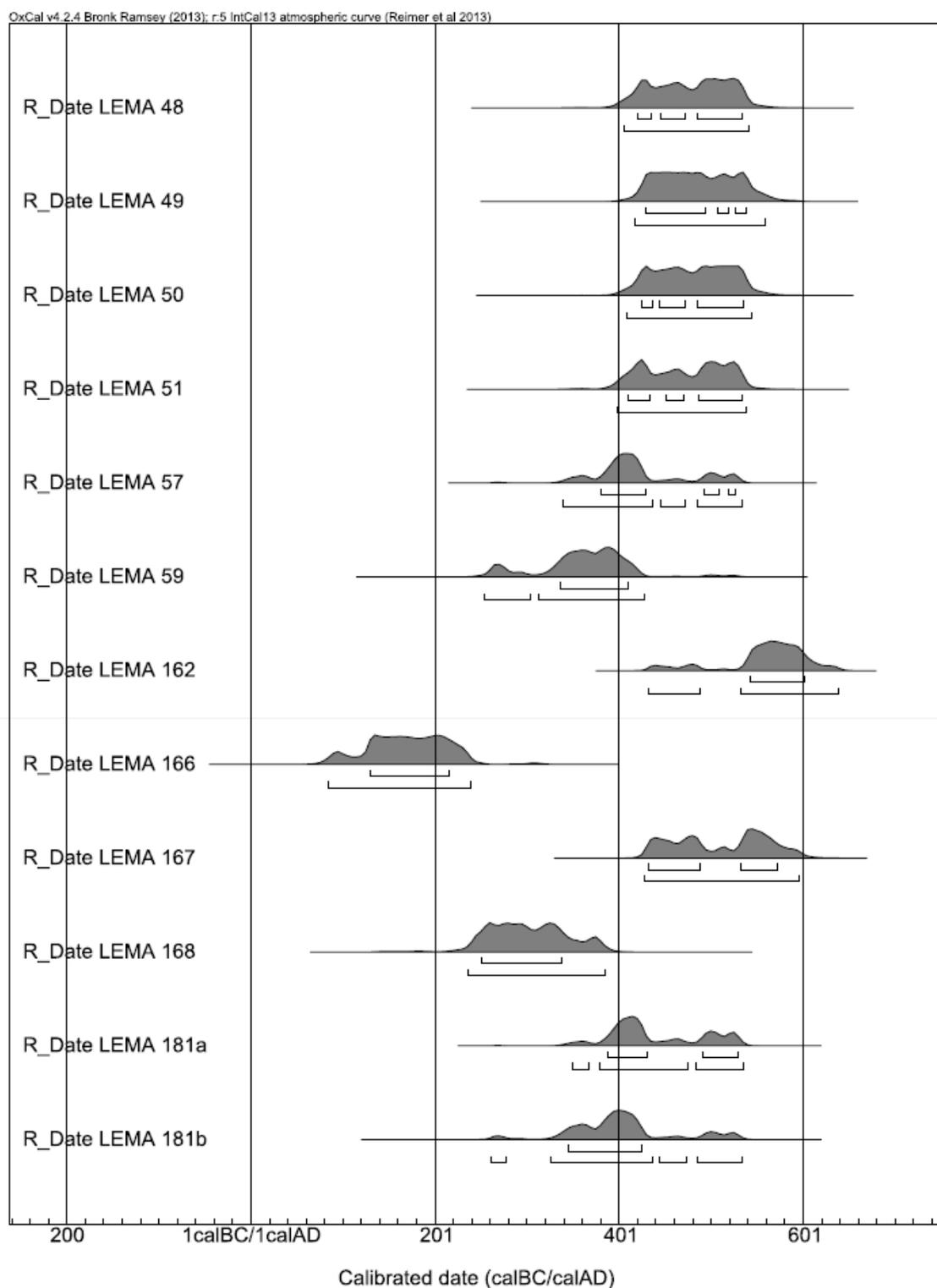


Figura 5.15: Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, segunda parte.

### 5.3. Resultados de las muestras de la Ciudadela

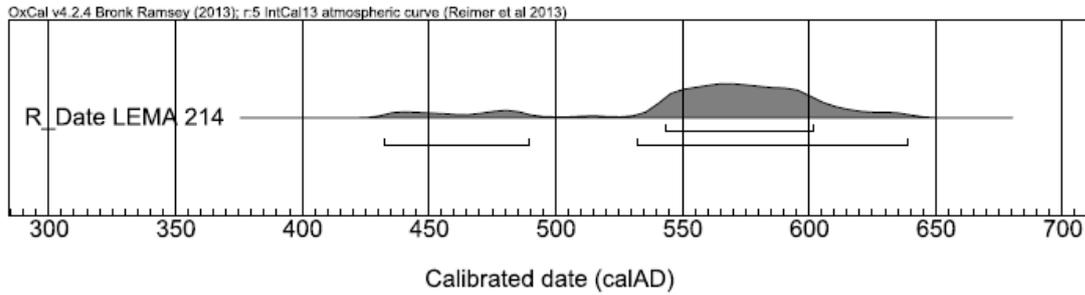


Figura 5.16: Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, tercera parte.

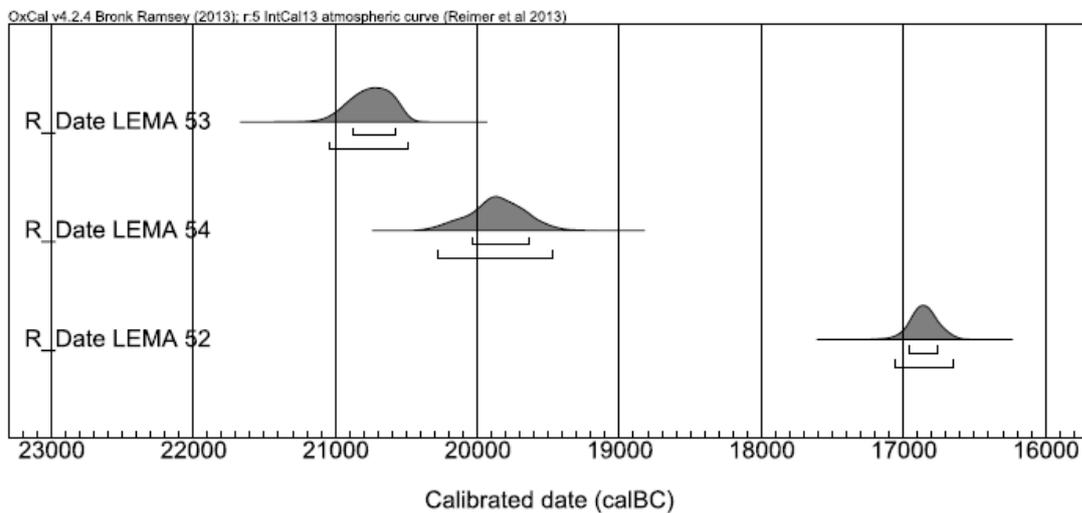


Figura 5.17: Comparaciones de los resultados obtenidos para las muestras de la Ciudadela analizadas en el LEMA, cuarta parte.

De lo anterior, podemos relacionar las edades calendario obtenidas con la cronología del sitio arqueológico. Las siguientes figuras funcionan a manera de línea del tiempo, y el nombre de las muestras se han colocado sobre los periodos a los que corresponden.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

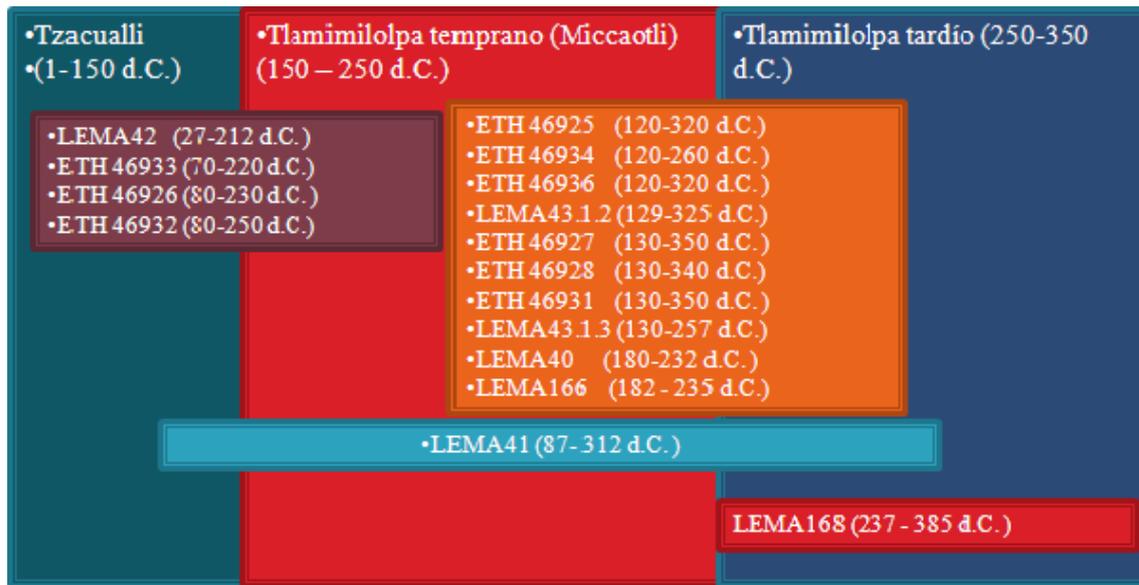


Figura 5.18: Muestras analizadas sobre la línea de tiempo de acuerdo a la cronología de Rattray (en [26], ordenadas según la edad obtenida). (Primera parte).

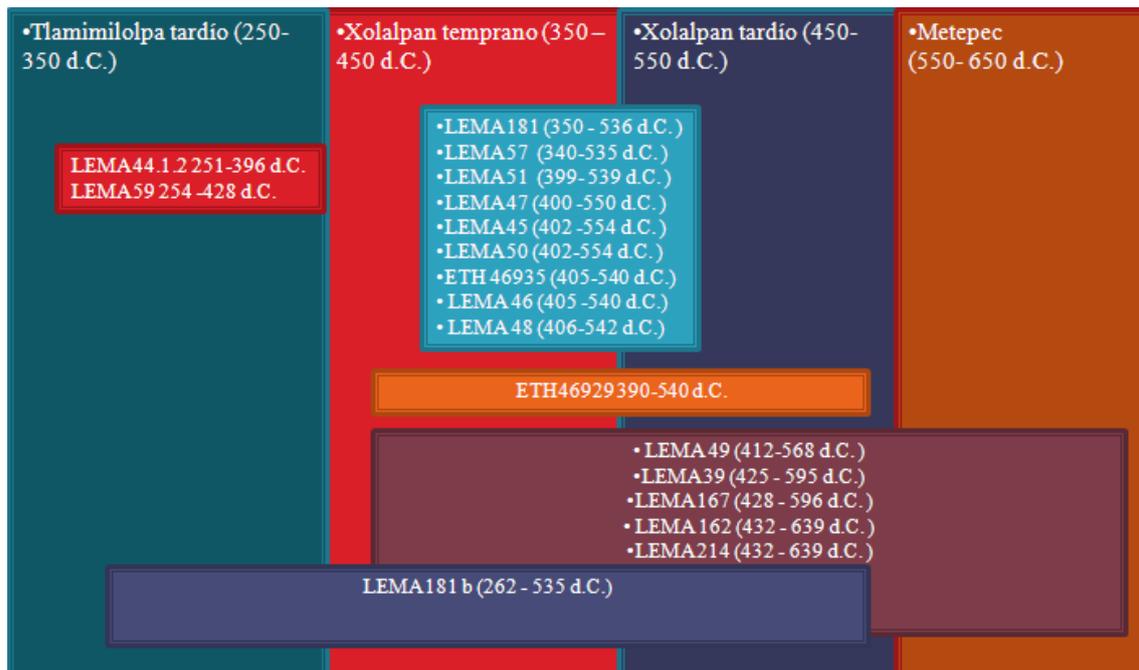


Figura 5.19: Muestras analizadas sobre la línea de tiempo de acuerdo a la cronología de Rattray (en [26], ordenadas según la edad obtenida). (Segunda parte).

En promedio el intervalo de edades que abarca la calibración de estas muestras es de 200 años. Es decir, entre la edad más reciente y la más antigua existe un rango de edades de cerca de 200 años. Esto sucede debido a las curvas de calibración, pues recordemos que es usando estas que se calcula la edad calendario, pues recordemos que la calibración no nos dará una edad exacta,

sino un rango de edades en las que se podría encontrar la fecha correspondiente a la que pertenece la muestra. En este caso lo que observamos es que la atmósfera mantuvo una concentración de radiocarbono similar durante esos periodos de tiempo, por ello se encontraron estos intervalos de edades.

Notamos dos particularidades entre las muestras analizadas. En primer lugar las muestras ETH 46925, ETH 46934, ETH 46936, ETH 46927, ETH 46928, ETH 46931, LEMA 43.1.2, y LEMA 43.1.3, LEMA 40 y LEMA 166, nos dan edades en un intervalo promedio de 142 d.C. a 298 d. C. lo que estas muestras tienen en común, según la nota de la descripción de las mismas, es que corresponden al túnel que se observa en la Figura 4.9. Las capas estratigráficas a las que pertenecen según la descripción son diferentes, salvo para las muestras ETH 46925, LEMA 40 y LEMA 160 que corresponden a la capa II.

Algo similar sucede para las muestras etiquetadas como LEMA 45, LEMA 46, LEMA 47, LEMA 48, LEMA 49, LEMA 50, LEMA 51, y LEMA 57, también comparten un intervalo de edades promedio de 399d.C. a 546 d.C. En este caso la descripción indica que corresponden a la superficie de la cámara, la cual se aprecia de igual forma en la Figura 4.9, se encuentra al final del túnel y justo debajo de la pirámide.

En la siguiente tabla se muestran las edades calendario de cada muestra con respecto a la capa estratigráfica en la que se encontraron. Debemos aclarar que al momento de redactar esta tesis, aún no son publicados los diagramas que muestran la posición exacta de las capas, pues la investigación de este túnel aún se está llevando a cabo.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Capa	Muestra	Material	Edad calendario d.C.
Capa II	ETH 46932	carbón	80-250
	ETH 46925	carbón	120-320
	LEMA 39	carbón	425-595
	LEMA 40	carbón	180-232
	LEMA 59	carbón en suelo	254 - 428
	LEMA 161	garra	no se midió
	LEMA 162	madera	432- 639
	LEMA 166	colmillo de jaguar	182-235
	LEMA 167	madera	428-596
	LEMA 182	hule	Poco Carbón
	LEMA 181	mandíbula	350-536
	LEMA 181b	mandíbula	262-535
Capa III	ETH 46926	carbón	80-230
	ETH 46931	carbón	130-350
Capa IV	ETH 46928	carbón	130-340
Capa V	ETH 46929	carbón	390-540
	LEMA 41	carbón	87-312
Capa VIII	LEMA 163	fibras	Poco Carbón
	LEMA 164	semillas	Poco Carbón
	LEMA 165	cerámica con material orgánico	1376-1056 a.C.
Capa VIIIa.	ETH 46927	carbón	130-350
	LEMA 42	carbón	27-212
	LEMA 43.1.2	carbón	129-325
Capa I	LEMA 44.1.2	carbón	251-396
	LEMA 45	carbón	402-554
	LEMA 46	carbón	405-540
	LEMA 47	carbón	400-550
	LEMA 48	carbón	406-542
	LEMA 49	carbón	412-568
	LEMA 50	carbón	402-554
	LEMA 51	carbón	399-539
	LEMA 52	fragmento de tepetate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos.	1756-16646 a.C.
	LEMA 53	fragmento de tepetate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos.	21039-20484 a.C.

Tabla 5.4: Edades calendario para las muestras de la Ciudadela, resultados ordenados por capas estratigráficas (Parte 1)

### 5.3. Resultados de las muestras de la Ciudadela

Capa	Muestra	Material	Edad calendario d.C
	LEMA 54	fragmento de tepetate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos.	20281-19473 a.C.
	LEMA 57	carbón	340-535
	LEMA 160	suelo	2900-2626 a.C.
Capa I túnel	ETH 46935	carbón 405-540	
Capa IX	ETH 46933	carbón 70-220	
Capa XII	ETH 46934	carbón 120-260	
Capa XIV	ETH 46936	carbón 120-320	

Tabla 5.5: Edades calendario para las muestras de la Ciudadela, resultados ordenados por capas estratigráficas (parte 2)

Como bien sabemos, no es suficiente tener la información de la edad de los objetos encontrados en un sitio para poder fecharlo. Sin embargo cabe mencionar que en este caso, se piensa que el túnel se mantuvo intacto desde que fue sellado por los habitantes del lugar. Por lo que se podría sugerir que el túnel pudo corresponder al intervalo de tiempo ya mencionado, mientras que el periodo de tiempo entre la construcción y la siguiente intrusión pudo ser de al menos 80 años.

Existen tres muestras que de acuerdo a la Figura 5.17 corresponden a fechas muy antiguas con respecto a las demás, estas son LEMA 52, LEMA 53, y LEMA 54. Dichas edades alcanzan hasta los 20484 años d. C. Sin embargo, observamos en la descripción de las muestras que se tratan de fragmentos de tepetate con materia orgánica para extraer ácidos húmicos y fúlvicos, es decir, se trata de material propio de la región, es material de construcción, por lo cual tiene sentido que las fechas obtenidas difieran del resto de las muestras.

Finalmente de acuerdo a las figuras 5.18 y 5.19, todas las muestras analizadas caen dentro del intervalo de tiempo que cubre el periodo de ocupación de los teotihuacanos en la región.

De ambas tablas de resultados podemos observar que cuando el material a fechar es carbón o hueso se obtienen resultados que son más consistentes entre sí. Recordemos que Gómez y Gazzola nos dicen que *“la profundidad a la que se encuentra el piso del túnel indica la intención expresa de localizar el nivel freático, que en esa época se hallaba aproximadamente a 12 metros de la superficie”* (en [35]). También nos hablan de que en la actualidad el túnel es un lugar húmedo, por lo cual la madera que datamos puede presentar material reciente (hongos, bacterias, etc.) que pueden alterar la edad obtenida, pues es más fácil para este tipo de organismos penetrar en la madera que en los huesos debido a la estructura del material, por lo que para realizar nuestros promedios, no utilizaremos los resultados relacionados con madera, pues en estas condiciones la preservación de estas muestras podría no ser óptima.

Para la capa II se tiene un intervalo promedio de 264 a 368 d.C. En el artículo *Cronología de sucesos ocurridos en el Templo de Quetzalcóatl, Teotihuacán* (en [39]), Sugiyama nos dice como tomar las dataciones por radiocarbono, generando intervalos promedio y al final utilizar muestras de hueso para dar una fecha que nos de una mejor idea de cuál es la edad que corresponde con las capas estratigráficas, esto bajo la suposición de que los huesos humanos deben corresponder a

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

los habitantes contemporáneos al sitio que se desea fechar. Por lo que en este caso la edad de la mandíbula 262 d. C. es la más cercana al intervalo de edades promedio que nos da la datación que el resto de las muestras para la capa II, por lo que la edad de esta capa podría ser más cercana a los 264 años d. C.

Para la capa I se tienen edades más recientes, el intervalo promedio es de 379 a 530 d.C. en este caso no contamos con muestras de hueso que pudieran servirnos como referencia. Para el resto de las capas no contamos con suficientes datos experimentales. Sin embargo podemos observar que la cronología de éstas concuerda con la de las capas I y II.

## CAPÍTULO 6

---

### Conclusiones

---

Para la primera serie de resultados, correspondientes al análisis del material estándar internacional, podemos observar que las pocas dificultades que se hayaron fueron debido a la naturaleza del mismo material, pues a veces el material no proveía el suficiente carbono para realizar las mediciones, por ejemplo. Podemos observar además que los errores de tipo sistemático, en este caso los errores debido al manejo del material por humanos, aparecieron recién iniciados los trabajos en el laboratorio, en el año 2013, los cuales fueron detectados de inmediato, y fue debido a éstos que se diseñó un sistema de clasificación, y una recolección de datos que permitieran un mejor manejo del material en cuanto a su almacenamiento (capítulo 3, subtema 3.1.4), y de esta forma reducir este tipo de errores. Esta clasificación no sólo permite un mejor almacenamiento y control de las muestras, también sirve para generar una base de datos la cual hace más fácil el análisis posterior de las muestras, así como la detección de otro tipo de anomalías, por ejemplo falta de carbón de la muestra, en este ejemplo si una muestra presenta poco carbono se puede tomar la decisión de no llevar a cabo la medición en el acelerador. Y como podemos observar en los resultados esta clase de errores se vió reducida para los dos años siguientes.

Para el caso del estándar C4 en donde se tuvieron pocos datos para analizar, debemos tomar en cuenta que a la fecha se siguen realizando este tipo de mediciones de los estándares, por lo que en un futuro no muy lejano se deben tener más datos para establecer mejor una tendencia de los mismos.

Para el resto de los estándares se tiene un muy buen comportamiento, pues todas las mediciones caen dentro de la incertidumbre de la edad esperada correspondiente a cada material.

Por lo anterior podemos concluir que las medidas realizadas son altamente reproducibles, lo cual nos lleva a una validación de las mediciones del material datado en el laboratorio, no sólo para el mismo material estándar sino para cualquier otro tipo de material que se analice en el LEMA bajo la técnica de medición de radiocarbono.

En la segunda serie de resultados, dentro de la incertidumbre asociada a las mediciones, se tiene una correspondencia uno a uno entre los resultados obtenidos por el LEMA y los obtenidos en el ETH, aquí en realidad no se esperarían tener resultados idénticos, puesto que aún fechando el mismo material se tienen pequeñas variaciones entre una porción del material y otra porción del mismo material, por ejemplo debido al fraccionamiento isotópico, así que las diferencias no sólo están relacionadas con que las mediciones se hicieron en laboratorios diferentes. Pese a esto,

podemos decir que esta es otra forma de validar los resultados que se obtienen en el LEMA, pues aunque se trata de un laboratorio reciente, la calidad de los resultados es comparable con la de laboratorios como el del ETH.

Para la tercera serie de resultados lo primero que podemos concluir es que las edades obtenidas son congruentes con las fechas de ocupación de Teotihuacán. De acuerdo a la investigación que se hizo para establecer el contexto arqueológico en esta tesis, encontramos que es un deseo de los arqueólogos encontrar una forma de fechar sus muestras para establecer cronologías con una incertidumbre máxima de 50 años [34]. Lo que pudimos observar fue que los intervalos de las edades obtenidas son un poco grandes dentro de este criterio. Sin embargo esto sólo es para el caso de estas muestras, pues qué tan grande es el intervalo de edades depende de en qué parte de la curva de calibración se encuentren las edades radiocarbono obtenidas. De acuerdo con Sugiyama (en [39]), nos muestra las dataciones y las calibraciones a edades calendario que obtienen diferentes laboratorios para la datación de sus muestras y que pertenecen también a Teotihuacán, y se observa que el tamaño de los intervalos que se encuentran son congruentes con los que se encontraron en el LEMA, por lo que la datación con radiocarbono en este particular sitio, debe de apoyarse en otro tipo de técnicas de datación, debido al tamaño de los intervalos que provee.

Cabe señalar que las edades radiocarbono que se obtienen en el LEMA difieren de la edad radiocarbono esperada en menos del 3% lo cual pudimos observar en los resultados obtenidos para el material estándar internacional. Es decir, qué tan precisas son las edades calendario no depende de la medida de radiocarbono en el laboratorio, sino de la variabilidad de la concentración de radiocarbono en la atmósfera.

Finalmente podemos concluir que esta tesis cumple con su objetivo, pues resulta ser una introducción a la técnica de fechamiento con radiocarbono para futuros tesis del LEMA, además de validar los resultados obtenidos en el LEMA con el material estándar internacional y la comparación con el laboratorio del ETH. Y finalmente pone en práctica el método de datación con radiocarbono en un área de suma importancia para la técnica EMA, que es su aplicación en Arqueología.

## .1. Ley de decaimiento radiactivo.

Cuando el núcleo de un elemento es inestable emite partículas o fotones para alcanzar la estabilidad, a este proceso se le conoce como decaimiento radiactivo y al átomo en cuestión se le conoce como radioisótopo. No es posible predecir qué tipo de radiación emitirá un sólo núcleo al decaer, sin embargo podemos darle a este fenómeno un tratamiento estadístico el cual dependerá de la inestabilidad del radioisótopo en particular. La vida media radiactiva para un radioisótopo dado es una medida de la tendencia del núcleo a decaer o desintegrarse.

El proceso de decaimiento y la vida media observada pueden predecirse suponiendo que las desintegraciones nucleares individuales son procesos puramente aleatorios y se pueden modelar como sigue: supongamos que se tienen  $N$  núcleos radiactivos al tiempo  $t$ , entonces el número de núcleos  $\Delta N$  que deberían decaer en cualquier intervalo de tiempo dado  $\Delta t$  debería ser proporcional a  $N$

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  es una constante de proporcionalidad. Aunque el decaimiento radiactivo involucra eventos discretos de desintegración nuclear, el número de eventos es tan grande que puede ser tratado como un continuo y los métodos del cálculo diferencial pueden ser utilizados para predecir su comportamiento, por lo tanto podemos escribir lo anterior de la siguiente forma

$$dN = -\lambda N dt \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2)$$

Integrando la expresión anterior y sin hacer alguna otra suposición, esto nos lleva a un decaimiento radiactivo exponencial

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

El decaimiento de partículas es comúnmente expresado en términos de la vida media, la constante de decaimiento, o el tiempo de vida promedio. La probabilidad para el decaimiento puede ser expresada como una función de distribución. Por lo que podemos escribir la ecuación anterior como sigue

$$f_{\text{decaimiento}} = A e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Donde  $f_{\text{decaimiento}} = N$ ,  $N_0 = A$ , además a  $\lambda$  se le conoce como constante de decaimiento.

Normalizando esta función de distribución se tiene que

$$\int_0^{\infty} f_{\text{decaimiento}}(t) dt = \int_0^{\infty} A e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} A e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{A}{\lambda} = 1 \quad (5)$$

Así  $A = \lambda$ . La probabilidad de que una partícula dada decaiga dentro de un tiempo  $t$  está dada por la integral de la función de distribución de decaimiento desde 0 a  $t$ . Sin embargo esta no es

## 6. CONCLUSIONES

---

la cantidad que deseamos calcular, nosotros queremos el tiempo promedio en el que la partícula existe sin decaer. La probabilidad de que una partícula no decaiga es uno menos la probabilidad de que decaiga. Dicha probabilidad es entonces:

$$P(t) = 1 - \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 + A e^{-\lambda t} \Big|_0^t = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

El tiempo promedio de supervivencia es entonces el valor medio del tiempo usando esta función de probabilidad.

$$\langle t \rangle = \tau = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\frac{1}{\lambda} [-e^{-\lambda t}]_0^{\infty}} = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \quad (7)$$

Esta integral puede ser evaluada por integración por partes. Se puede hacer más directamente haciendo el cambio de variable  $x = \lambda t$ :

$$\langle t \rangle = \tau = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} x e^{-x} dx \quad (8)$$

Integrando por partes se obtiene

$$\langle t \rangle = \tau = x e^{-x} \Big|_0^{\infty} - \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} -e^{-x} = 0 + \frac{1}{\lambda} [t]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

Así que el promedio del tiempo de vida para el decaimiento de una partícula está dado por

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \approx \frac{T_{1/2}}{0,693} \quad (10)$$

Donde  $\lambda$  es la constante de decaimiento y  $T_{1/2}$  es la vida media. Cualquier cantidad  $A$  que dependa de este decaimiento puede entonces expresarse como

$$A = A_0 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}} = A_0 e^{\frac{-0,693t}{T_{1/2}}} = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (11)$$

La vida media radiactiva para un radioisótopo dado es una medida de la tendencia del núcleo a decaer o desintegrarse y se basa puramente sobre esa probabilidad. El tamaño del núcleo es pequeño en comparación con el átomo y la enormidad de las fuerzas que actúan dentro de él hace que sea casi totalmente impermeable al mundo exterior. La vida media es independiente del estado físico (sólido, líquido, gas), la temperatura, la presión, el compuesto químico en el que el núcleo se encuentra, y esencialmente cualquier otra influencia exterior. Es independiente de la química de la superficie atómica, e independiente de los factores físicos comunes del mundo exterior. La única cosa que puede alterar la vida media es la interacción nuclear directa con una partícula desde fuera, por ejemplo, una colisión de alta energía en un acelerador.

## .2. Propagación del error

Sea  $z = f(x, y)$  una función de variables reales, queremos aproximarla mediante polinomios a un punto  $p = (x_0, y_0)$

$$\Rightarrow T_{1,p}f(x, y) = f(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_p \cdot (x - x_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_p \cdot (y - y_0) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T_{2,p}f(x, y) &= f(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_p \cdot (x - x_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_p \cdot (y - y_0) + \\ &\frac{1}{1 \cdot 2} \left[ \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_p \cdot (x - x_0)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}\right)_p \cdot (x - x_0)(y - y_0) + \right. \\ &\left. \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)_p \cdot (y - y_0)^2 \right] \end{aligned}$$

Cuando  $f$  es un conjunto de variables  $x$  y  $f$  no es lineal, generalmente debe de ser linealizada por una aproximación a una expansión de series de Taylor de primer orden aunque en algunos casos pueden derivarse fórmulas exactas que no dependen de la expansión

$$f \cong \hat{f} + \sum_i^n \frac{\partial f}{\partial x_i} x_i \quad (13)$$

Puesto que  $\hat{f}$  es una constante, no contribuye al error en  $f$ . En consecuencia la propagación del error sigue el caso lineal.

Para continuar necesitamos conocer el *valor esperado*. El valor esperado, o esperanza, para una variable aleatoria discreta con valores posibles  $x_1, x_2, \dots, x_n$  y sus probabilidades representadas por la función de probabilidad  $p(x_i)$ , la esperanza se calcula como sigue

$$E[x] = x_1 p(x = x_1) + \dots + x_n p(x = x_n) = \sum_{i=1}^n x_i p(x_i) \quad (14)$$

Para una variable aleatoria absolutamente continua, la esperanza se calcula mediante una integral de todos los valores y la función de densidad  $f(x)$

$$E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) \quad (15)$$

Una función de densidad de probabilidad es una función cuyo dominio es un intervalo  $(a, b)$  y que tiene las siguientes propiedades

- $f(x) \geq 0$
- $\int_a^b f(x) dx = 1$

Ahora bien, supongamos que  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  son variables aleatorias, cada una con varianza infinita, entonces la matriz de covarianza  $\Sigma$  es la matriz cuya entrada  $(i, j)$  es la covarianza

$$\sum_{ij} = E[(x_i - \mu_i)(x_j - \mu_j)] \quad (16)$$

Donde  $\mu = E(x_i)$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Sigma_{ij} &= E[(x_i - E(x_i))(x_j - E(x_j))] \\ \Rightarrow \Sigma_{ij} &= E[(x_i - \sum x_i p(x_i))(x_j - \sum x_j p(x_j))] \\ \Rightarrow \Sigma_{ij} &= \sum (x_i - \sum x_i p(x_i))(x_j - \sum x_j p(x_j)) p(x_i - \sum x_i p(x_i))(x_j - \sum x_j p(x_j)) \end{aligned} \quad (17)$$

En igualdad matricial tenemos

$$\Sigma = E[(x - E[x])(x - E[x])^T] \quad (18)$$

La cual es simplemente la generalización de la varianza

$$\sigma^2 = \text{var}(x) = E[(x - \mu)^2] \quad (19)$$

Las expresiones generales para una función simple  $f$ , son un poco más sencillas, pero el desarrollo es fundamentalmente el mismo

$$f = \sum_i^n a_i x_i = a^T x \quad (20)$$

$$\sigma_f^2 = \sum_i^n \sum_j^n a_i M_{ij}^x a_j = a^T M^x a \quad (21)$$

Donde  $\sigma_f$  corresponde a la varianza de  $f$ . Cada término de covarianza  $M_{ij}$  puede ser expresado en términos del coeficiente de correlación  $\rho_{ij}$  por  $M_{ij} = \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j$  con lo que una expresión alternativa para la varianza de  $f$  es

$$\sigma_f^2 = \sum_i^n a_i \sigma_i^2 + \sum_i^n \sum_j^n a_i a_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (22)$$

Cuando las variables no están correlacionadas, el segundo término desaparece, por lo que

$$\sigma_f^2 = \sum_i^n a_i \sigma_i^2 \quad (23)$$

Regresando a la ecuación 14, tenemos entonces que cualquier función no lineal de dos variables puede ser escrita como

$$f \cong \dot{f} + \frac{\partial f}{\partial x} \cdot x + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot y \quad (24)$$

por lo que la varianza queda como

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \text{cov}_{xy} \quad (25)$$

si  $x$  e  $y$  no están correlacionadas el término de covarianza se elimina, quedando entonces que

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 \quad (26)$$

**.3. Tablas de datos obtenidos para cada material estándar**

Fecha	mg C	ID Mues- tra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
21/08/2014	0.898	131.1.4	6.734E-13	2.768E-15	0.009761	6.484E-06
21/08/2014	0.928	131.1.5	6.602E-13	3.011E-15	0.009672	4.709E-05
21/08/2014	0.928	131.1.6	6.622E-13	3.209E-15	0.009782	8.147E-06
27/11/2015	0.939	131.1.7	7.380E-13	6.213E-15	0.01054	3.073E-05
27/11/2015	0.959	131.1.8	7.425E-13	2.461E-15	0.01049	1.470E-05
20/09/2014	0.939	131.1.7.a	7.664E-13	2.442E-15	0.010617	8.367E-06
20/09/2014	0.928	131.1.5.a	7.645E-13	2.188E-15	0.010571	3.772E-06
07/02/2015	0.864	131.1.10	7.499E-13	2.734E-15	0.010636	9.310E-06
07/02/2015	0.920	131.1.11	7.562E-13	2.264E-15	0.010503	1.20E-05
07/02/2015	0.973	131.1.9	7.535E-13	2.522E-15	0.010561	8.920E-06
19/02/2015	0.896	131.1.12	7.416E-13	3.385E-15	0.010467	2.035E-06
19/02/2015	0.931	131.1.13	7.491E-13	3.842E-15	0.01042	1.441E-06
19/02/2015	0.911	131.1.14	7.398E-13	4.115E-15	0.010446	3.692E-06
23/02/2015	0.896	131.1.12a	7.628E-13	3.491E-15	0.010472	1.203E-05
23/02/2015	0.931	131.1.13a	7.540E-13	3.127E-15	0.010441	8.018E-06
23/02/2015	0.911	131.1.14a	7.512E-13	3.870E-15	0.010471	1.756E-05
06/04/2015	0.964	131.1.15	7.530E-13	2.256E-15	0.010381	2.489E-06
06/04/2015	0.906	131.1.16	7.597E-13	2.291E-15	0.01036	1.212E-06
06/04/2015	0.954	131.1.17	7.492E-13	2.289E-15	0.010362	3.551E-06
09/04/2015	0.931	131.1.31	7.573E-13	3.257E-15	0.010488	1.830E-06
09/04/2015	0.928	131.1.32	7.563E-13	3.076E-15	0.010490	2.52E-06
22/06/2015	0.907	131.1.24	7.492E-13	2.261E-15	0.010444	1.699E-06
22/06/2015	0.870	131.1.25	7.419E-13	2.056E-15	0.010494	6.436E-06
22/06/2015	0.882	131.1.23	7.477E-13	3.025E-15	0.010461	2.776E-06
22/06/2015	0.385	131.1.22	7.479E-13	2.116E-15	0.010416	2.534E-06
22/06/2015	0.388	131.1.21	7.477E-13	2.110E-15	0.010431	4.019E-06
22/06/2015	0.091	131.1.19	7.012E-13	7.592E-15	0.010588	2.933E-06
22/06/2015	0.098	131.1.20	7.308E-13	6.057E-15	0.010510	7.733E-06
30/06/2015	0.290	131.1.29	7.384E-13	2.559E-15	0.010301	6.173E-06
30/06/2015	0.096	131.1.30	7.327E-13	2.381E-15	0.010311	3.748E-06
30/06/2015	0.178	131.1.28	7.344E-13	2.013E-15	0.010438	7.237E-06
30/06/2015	0.877	131.1.26	7.343E-13	2.035E-15	0.010396	3.346E-06
30/06/2015	0.932	131.1.27	7.328E-13	2.005E-15	0.01046	3.698E-06

Tabla .1: Datos obtenidos para el material estándar VIRI F

## 6. CONCLUSIONES

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$	Edad BP	$\pm$
131.1.4	-23.182	1.357	74.324	0.330	2383.680	36
131.1.5	-30.529	4.976	73.234	0.353	2502.365	39
131.1.6	-21.064	1.446	73.085	0.375	2518.706	41
131.1.7	-3.924	3.165	72.052	0.626	2633.102	70
131.1.8	-8.453	1.871	72.484	0.286	2585.040	32
131.1.7a	-10.448	0.821	73.082	0.255	2519.093	30
131.1.5a	-14.746	0.434	72.901	0.228	2539.026	30
131.1.10	-8.363	1.032	72.458	0.280	2587.882	31
131.1.11	-20.758	1.248	73.063	0.238	2521.173	30
131.1.9	-15.345	0.999	72.810	0.261	2548.991	30
131.1.12	-16.502	0.593	72.889	0.383	2540.260	42
131.1.13	-20.789	0.575	73.629	0.423	2459.172	46
131.1.14	-18.409	0.659	72.718	0.446	2559.132	49
131.1.15	-16.266	0.336	70.892	1.722	2763.419	197
131.1.12a	-18.370	1.337	73.834	0.373	2436.776	41
131.1.13a	-21.238	1.039	72.979	0.340	2530.424	38
131.1.14a	-18.451	1.796	72.705	0.405	2560.605	45
131.1.15a	-21.655	0.451	73.568	0.258	2465.773	30
131.1.16	-23.120	0.401	74.223	0.261	2394.629	30
131.1.17	-23.491	0.510	73.190	0.260	2507.174	30
131.1.31	-20.489	0.196	73.315	0.343	2493.434	38
131.1.32	-20.282	0.254	73.214	0.327	2504.513	36
131.1.24	-26.292	0.887	73.865	0.253	2433.474	30
131.1.25	-21.674	1.062	73.141	0.235	2512.590	30
131.1.23	-24.697	0.911	73.714	0.321	2449.906	35
131.1.22	-28.961	0.902	73.729	0.240	2448.197	30
131.1.21	-27.516	0.949	73.714	0.240	2449.900	30
131.1.19	-12.949	0.926	69.134	0.757	2965.200	88
131.1.20	-20.195	1.136	72.052	0.608	2633.128	68
131.1.29	-33.300	0.727	73.736	0.277	2447.500	30
131.1.30	-32.444	0.563	73.167	0.261	2509.662	30
131.1.28	-20.497	0.812	73.343	0.228	2490.413	30
131.1.26	-24.415	0.543	73.331	0.230	2491.751	30
131.1.27	-17.755	0.565	73.181	0.227	2508.173	30

Tabla .2: Datos obtenidos para el material estándar VIRI F

.3. Tablas de datos obtenidos para cada material estándar

Fecha	mg C	ID Muestra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
27/06/2013	1.497	7.1.2	4.816E-13	2.267E-15	0.01007	1.15E-05
27/06/2013	1.404	7.1.3	4.835E-13	2.134E-15	0.00999	4.04E-06
27/06/2013	1.419	7.1.4	4.794E-13	2.298E-15	0.01007	1.52E-05
29/08/2013	1.227	7.1.5	4.833E-13	2.482E-15	0.01009	7.72E-05
29/08/2013	1.221	7.1.6	4.854E-13	2.694E-15	0.01004	1.10E-05
29/08/2013	1.165	7.1.7	4.862E-13	2.889E-15	0.00998	7.80E-06
29/08/2013	1.222	7.1.8	4.907E-13	3.070E-15	0.01000	1.55E-05
02/09/2013	1.227	7.1.5a	4.854E-13	2.583E-15	0.00979	1.51E-05
02/09/2013	1.221	7.1.6a	4.855E-13	2.119E-15	0.00997	2.08E-06
02/09/2013	1.165	7.1.7a	4.827E-13	2.697E-15	0.01000	8.49E-06
02/09/2013	1.222	7.1.8a	4.853E-13	3.282E-15	0.00996	8.05E-06
09/09/2013	1.391	7.1.9	6.112E-13	3.397E-15	0.00953	3.55E-05
09/09/2013	1.318	7.1.10	4.019E-13	4.105E-15	0.00965	4.94E-05
09/09/2013	1.389	7.1.11	3.915E-13	4.521E-15	0.00971	4.22E-05
21/08/2014	0.764	7.1.14	4.535E-13	4.574E-15	0.00979	2.83E-05
21/08/2014	0.892	7.1.15	4.584E-13	4.015E-15	0.00989	3.88E-05
27/11/2015	1.034	7.1.14	5.008E-13	2.345E-15	0.01055	2.90E-05
20/09/2014	1.040	7.1.12	5.190E-13	1.443E-15	0.01060	2.96E-06
20/09/2014	1.040	7.1.13	5.194E-13	1.413E-15	0.01058	6.88E-06
13/03/2015	0.192	7.1.18	4.948E-13	2.499E-15	0.01048	2.83E-06
13/03/2015	0.197	7.1.19	4.967E-13	2.870E-15	0.01047	1.22E-06
13/03/2015	0.091	7.1.21	4.964E-13	4.288E-15	0.01049	1.16E-05
13/03/2015	0.080	7.1.20	3.918E-13	1.232E-14	0.01086	3.72E-05
13/03/2015	0.091	7.1.21	4.926E-13	5.587E-15	0.01055	1.92E-05
06/04/2015	1.140	7.1.17	5.063E-13	2.515E-15	0.01045	9.03E-06
30/06/2015	1.016	7.1.24	4.960E-13	1.395E-15	0.01053	5.32E-06
30/06/2015	0.108	7.1.23	4.943E-13	3.407E-15	0.01039	1.04E-05
30/06/2015	0.979	7.1.22	4.965E-13	1.754E-15	0.01052	3.81E-06

Tabla .3: Datos obtenidos para el material estándar C7

## 6. CONCLUSIONES

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$	Edad BP	$\pm$
7.1.2	-16.983	1.279	49.348	0.248	5673	40
7.1.3	-24.071	0.722	49.548	0.235	5641	38
7.1.4	-16.610	1.604	49.130	0.251	5709	41
7.1.5	-9.240	7.690	49.535	0.279	5643	45
7.1.6	-14.442	1.682	49.748	0.299	5609	48
7.1.7	-20.112	1.492	49.831	0.317	5595	51
7.1.8	-18.238	1.994	50.295	0.335	5521	54
7.1.5a	-34.261	1.773	49.657	0.278	5623	45
7.1.6a	-15.874	1.008	49.675	0.234	5620	38
7.1.7a	-13.364	1.296	49.387	0.289	5667	47
7.1.8a	-16.754	1.266	49.650	0.347	5624	56
7.1.9	-14.839	4.162	75.540	0.500	2253	53
7.1.10	-2.684	5.478	49.671	0.538	5621	87
7.1.11	3.909	4.796	48.386	0.585	5832	98
7.1.14	-18.205	3.250	50.303	0.513	5520	82
7.1.15	-8.374	4.209	50.842	0.452	5434	76
7.1.14	-3.049	3.015	48.883	0.252	5749	41
7.1.12	-12.286	0.376	49.482	0.151	5652	30
7.1.13	-14.170	0.690	49.527	0.149	5644	30
7.1.18	-14.126	0.430	49.245	0.283	5690	46
7.1.19	-15.192	0.356	49.437	0.316	5659	52
7.1.21	-24.787	1.775	52.613	0.629	5159	97
7.1.20	8.951	3.755	41.533	1.350	7058	266
7.1.21	-24.971	2.305	51.612	0.725	5313	114
7.1.17	-14.810	0.935	49.465	0.262	5654	43
7.1.24	-11.681	0.671	49.528	0.157	5644	30
7.1.23	-24.888	1.070	49.365	0.348	5671	57
7.1.22	-12.632	0.574	49.581	0.190	5636	31

Tabla .4: Datos obtenidos para el material estándar C7

.3. Tablas de datos obtenidos para cada material estándar

Fecha	mg C	ID Muestra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
27/06/2013	1.024	5.1.2	2.297E-13	1.383E-15	0.00994	1.370E-05
27/06/2013	1.164	5.1.3	2.304E-13	1.876E-15	0.01003	2.295E-05
08/08/2013	1.1	5.1.4	2.775E-13	2.197E-15	0.01181	4.341E-05
08/08/2013	1.301	5.1.5	2.883E-13	4.790E-15	0.01162	6.218E-05
08/08/2013	1.164	5.1.6	2.783E-13	4.207E-15	0.01181	2.593E-05
08/08/2013	1.028	5.1.7	3.646E-13	3.557E-15	0.01172	7.153E-05
21/10/2013	1.25	5.1.8	2.291E-13	3.691E-15	0.01040	8.094E-07
21/10/2013	1.12	5.1.9	2.197E-13	5.759E-15	0.01040	0.000E+00
25/10/2013	0.000	5.1.12	1.437E-14	2.350E-15	0.00959	8.712E-06
25/10/2013	0.000	5.1.13	9.523E-15	1.020E-15	0.00958	2.596E-05
25/10/2013	0.000	5.1.14	1.253E-14	3.013E-15	0.00963	1.181E-05
09/04/2013	1.064	5.1.20	2.352E-13	1.730E-15	0.01044	1.832E-06
09/04/2013	1.103	5.1.19	2.384E-13	1.700E-15	0.01043	1.312E-06
07/02/2015	0.108	5.1.10	2.374E-13	9.126E-16	0.01049	1.522E-05
07/02/2015	0.109	5.1.11	2.489E-13	9.354E-15	0.01060	1.721E-05
22/04/2015	0.537	5.1.14	2.341E-13	1.598E-15	0.01051	5.815E-06
22/04/2015	0.119	5.1.11	2.377E-13	2.098E-15	0.01071	2.394E-06
22/06/2015	0.434	5.1.17	2.332E-13	1.206E-15	0.01037	4.590E-06
22/06/2015	0.388	5.1.18	2.349E-13	1.105E-15	0.01038	1.997E-06
22/06/2015	0.114	5.1.16	2.359E-13	2.644E-15	0.01043	2.827E-06
22/06/2015	0.112	5.1.15	2.391E-13	2.601E-15	0.01041	2.501E-06

Tabla .5: Datos obtenidos para el material estándar C5

## 6. CONCLUSIONES

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$	Edad BP	$\pm$
5.1.2	-29.6157	1.467	23.540	0.148	11620	51
5.1.3	-21.0630	2.322	23.612	0.197	11595	67
5.1.4	-25.4359	3.829	22.508	0.207	11980	74
5.1.5	-41.8865	5.300	23.382	0.404	11674	140
5.1.6	-26.1446	2.533	22.572	0.357	11957	128
5.1.7	-33.3250	6.052	29.575	0.320	9786	87
5.1.8	-33.4165	4.033	22.363	0.368	12031	133
5.1.9	-33.5674	4.031	21.446	0.567	12368	215
5.1.12	-29.7267	2.159	21.907	3.672	12197	1474
5.1.13	-30.3725	3.283	14.519	1.644	15501	965
5.1.14	-26.1711	2.311	19.099	4.646	13299	2239
5.1.20	-25.1263	0.196	22.767	0.173	11888	61
5.1.19	-25.4667	0.155	23.078	0.170	11779	59
5.1.10	-21.8469	1.522	22.936	0.093	11828	33
5.1.11	-11.3545	1.698	24.048	0.904	11448	308
5.1.14	-20.7729	0.864	22.844	0.164	11861	58
5.1.11	-1.8862	0.721	23.195	0.211	11738	73
5.1.17	-33.2158	0.966	22.991	0.125	11809	44
5.1.18	-32.2046	0.887	23.159	0.115	11750	40
5.1.16	-27.3468	0.911	23.251	0.263	11719	91
5.1.15	-29.7979	0.900	23.567	0.259	11610	89

Tabla .6: Datos obtenidos para el material estándar C5

Fecha	mg C	ID Muestra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
27/06/2013	1.364	4.1.1	3.029E-15	8.071E-16	0.0099	1.301E-05
27/06/2013	1.337	4.1.2	4.093E-15	7.754E-16	0.0099	1.156E-05
27/06/2013	1.284	4.1.3	3.188E-15	6.788E-16	0.0100	1.908E-05
27/06/2013	1.275	4.1.4	2.672E-15	7.181E-16	0.0100	1.060E-05
20/09/2014	1.169	4.1.11	2.408E-15	2.075E-16	0.01061	8.094E-06
20/09/2014	1.138	4.1.10	1.724E-15	1.636E-16	0.01057	1.797E-05

Tabla .7: Datos obtenidos para el material estándar C4

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$	Edad BP	$\pm$
4.1.1	-31.767	1.405	0.310	0.083	46389	2489
4.1.2	-25.606	1.280	0.419	0.079	43972	1687
4.1.3	-16.575	1.961	0.327	0.070	45979	1923
4.1.4	-20.852	1.200	0.274	0.074	47397	2514
4.1.11	-10.514	0.797	0.230	0.020	48811	1687
4.1.10	-14.870	1.695	0.164	0.016	51493	1923

Tabla .8: Datos obtenidos para el material estándar C4

.3. Tablas de datos obtenidos para cada material estándar

Fecha	mg C	ID Muestra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
06/08/2013	1.287	3.1.2	1.617E-12	1.156E-14	0.0119	6.516E-06
06/08/2013	1.297	3.1.3	1.522E-12	1.561E-14	0.0119	4.385E-05
08/08/2013	1.254	3.1.5	1.518E-12	7.434E-15	0.0113	1.258E-05
08/08/2013	1.251	3.1.6	1.522E-12	1.561E-14	0.0118	4.288E-05
09/09/2013	1.257	3.1.7	1.041E-12	3.942E-15	0.0094	1.993E-05
09/09/2013	1.267	3.1.8	9.951E-13	1.824E-14	0.0094	2.247E-05
09/09/2013	1.437	3.1.9	1.055E-12	6.391E-15	0.0094	2.958E-05
09/09/2013	1.153	3.1.10	1.037E-12	9.649E-15	0.0096	1.037E-05
09/09/2013	1.173	3.1.11	1.074E-12	5.956E-15	0.0094	1.246E-04
09/09/2013	1.418	3.1.14	1.058E-12	6.126E-15	0.0094	4.619E-05
09/09/2013	1.288	3.1.13	9.592E-13	1.643E-14	0.0097	2.936E-05
21/08/2014	1.140	3.1.15	1.188E-12	4.012E-15	0.0098	1.288E-05
20/09/2014	1.055	3.1.16	1.344E-12	3.997E-15	0.0106	6.269E-06
20/09/2014	1.106	3.1.17	1.358E-12	4.175E-15	0.0106	3.553E-06
19/02/2015	1.433	3.1.16b	1.313E-12	7.838E-15	0.0104	3.716E-06
19/02/2015	1.367	3.1.17a	1.325E-12	5.622E-15	0.0104	2.069E-06
23/02/2015	1.256	3.1.16b	1.345E-12	8.816E-15	0.0104	6.015E-06
23/02/2015	1.280	3.1.17b	1.342E-12	7.667E-15	0.0104	7.647E-06
13/03/2015	1.256	3.1.20	1.311E-12	4.047E-15	0.0104	2.720E-06
06/04/2015	1.254	3.1.21	1.328E-12	4.300E-15	0.0103	1.455E-06
06/04/2015	1.254	3.1.22	1.330E-12	4.229E-15	0.0104	2.153E-06
09/04/2013	1.256	3.1.18	1.331E-12	5.446E-15	0.0104	9.111E-07

Tabla .9: Datos obtenidos para el material estándar C3

## 6. CONCLUSIONES

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$	Edad BP	$\pm$
3.1.2	-20.510	1.568	130.583	1.564	-2144	97
3.1.3	-20.211	3.906	122.917	1.728	-1657	114
3.1.5	-64.572	1.665	123.156	0.836	-1673	55
3.1.6	-25.535	3.788	123.433	1.393	-1691	91
3.1.7	-30.736	2.825	128.689	0.672	-2026	42
3.1.8	-31.283	3.021	122.987	2.297	-1662	151
3.1.9	-28.573	3.619	130.394	0.918	-2132	57
3.1.10	-4.469	2.256	128.210	1.278	-1996	80
3.1.11	-28.692	13.025	132.766	0.877	-2277	53
3.1.14	-29.956	5.150	130.768	0.891	-2155	55
3.1.13	5.404	3.636	118.543	2.075	-1366	142
3.1.15	-20.421	2.048	131.815	0.489	-2219	30
3.1.16	-15.080	0.637	128.134	0.414	-1991	30
3.1.17	-14.941	0.418	129.475	0.430	-2075	30
3.1.16b	-24.317	0.657	129.002	0.840	-2046	52
3.1.17a	-24.981	0.590	130.271	0.648	-2124	40
3.1.16b	-24.669	0.910	130.177	0.897	-2118	56
3.1.17b	-25.729	1.011	129.854	0.792	-2099	49
3.1.20	-22.931	0.421	130.461	0.539	-2136	33
3.1.21	-26.888	0.407	129.713	0.482	-2090	30
3.1.22	-22.942	0.435	129.919	0.476	-2103	30
3.1.18	-25.849	0.127	128.808	0.579	-2034	36

Tabla .10: Datos obtenidos para el material estándar C3

.3. Tablas de datos obtenidos para cada material estándar

Fecha	mg C	ID Muestra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
30/04/2013	0.986	1.1.34	1.375E-12	3.455E-15	0.0104	1.613E-05
30/04/2013	1.019	1.1.35	1.377E-12	3.359E-15	0.0104	1.208E-05
30/04/2013	1.057	1.1.36	1.370E-12	1.090E-14	0.0106	2.821E-05
30/04/2013	1.035	1.1.37	1.378E-12	3.303E-15	0.0105	1.018E-05
30/04/2013	0.995	1.1.38	1.376E-12	4.902E-15	0.0105	1.490E-05
27/06/2013	1.088	1.1.39	1.294E-12	4.255E-15	0.0100	3.665E-05
27/06/2013	1.116	1.1.40	1.310E-12	3.562E-15	0.0101	5.830E-06
27/06/2013	1.064	1.1.41	1.307E-12	4.089E-15	0.0100	8.423E-06
27/06/2013	0.993	1.1.42	1.296E-12	4.506E-15	0.0101	1.094E-05
27/06/2013	1.088	1.1.43	1.301E-12	5.583E-15	0.0100	2.721E-05
27/06/2013	1.116	1.1.44	1.314E-12	3.572E-15	0.0101	5.739E-06
27/06/2013	1.064	1.1.45	1.311E-12	4.100E-15	0.0100	8.599E-06
27/06/2013	0.993	1.1.46	1.301E-12	4.700E-15	0.0101	8.939E-06
06/08/2013	0.957	1.1.13	1.654E-12	7.787E-15	0.0119	1.529E-05
06/08/2013	1.016	1.1.14	1.624E-12	2.538E-14	0.0119	1.931E-05
06/08/2013	0.972	1.1.15	1.650E-12	1.955E-14	0.0119	1.660E-05
08/08/2013	0.450	1.1.16	1.653E-12	7.775E-15	0.0119	1.658E-05
22/08/2013	0.246	1.1.22	1.475E-12	1.329E-14	0.0115	1.780E-05
22/08/2013	0.273	1.1.21	1.473E-12	2.588E-14	0.0116	2.492E-05
22/08/2013	0.262	1.1.23	1.474E-12	2.157E-14	0.0114	1.139E-05
22/08/2013	0.245	1.1.24	1.450E-12	3.278E-14	0.0116	1.148E-05
29/08/2013	0.985	1.1.33	1.314E-12	5.717E-15	0.0100	2.646E-05
29/08/2013	0.987	1.1.31	1.299E-12	5.708E-15	0.0100	7.195E-06
29/08/2013	1.013	1.1.34	1.306E-12	4.758E-15	0.0101	3.315E-05
29/08/2013	1.012	1.1.32	1.311E-12	5.931E-15	0.0100	1.282E-05
02/09/2013	1.007	1.1.2	1.315E-12	3.592E-15	0.0099	7.243E-06
02/09/2013	1.003	1.1.3	1.305E-12	4.766E-15	0.0100	1.427E-05
02/09/2013	1.019	1.1.4	1.317E-12	4.648E-15	0.0100	1.500E-05
02/09/2013	0.997	1.1.5	1.302E-12	4.129E-15	0.0100	1.547E-05
09/09/2013	0.956	1.1.6	1.106E-12	5.386E-15	0.0095	4.047E-05
09/09/2013	0.985	1.1.7	1.081E-12	3.938E-15	0.0096	2.390E-05
09/09/2013	1.090	1.1.8	1.094E-12	8.354E-15	0.0094	2.306E-05
09/09/2013	0.974	1.1.9	1.072E-12	6.633E-15	0.0095	2.163E-05
16/10/2013	1.028	1.1.10	8.881E-14	5.271E-15	0.0097	1.218E-05
16/10/2013	0.999	1.1.11	8.838E-14	6.637E-15	0.0096	3.832E-06
16/10/2013	1.009	1.1.12	8.385E-14	8.572E-15	0.0098	1.087E-05
21/10/2013	1.000	1.1.43	1.368E-12	9.929E-15	0.0107	1.349E-05
21/10/2013	1.023	1.1.44	1.379E-12	1.494E-14	0.0105	0.000E+00
21/10/2013	1.062	1.1.45	1.379E-12	9.842E-15	0.0105	4.367E-06
21/10/2013	1.047	1.1.46	1.364E-12	1.617E-14	0.0105	0.000E+00
05/11/2013	0.302	1.1.47	1.412E-12	1.078E-14	0.0104	3.847E-05
05/11/2013	0.325	1.1.48	1.422E-12	7.525E-15	0.0105	4.649E-05
05/11/2013	0.293	1.1.45	1.422E-12	7.283E-15	0.0103	3.083E-05
05/11/2013	0.304	1.1.46	1.414E-12	7.089E-15	0.0106	4.739E-05

Tabla .11: Datos obtenidos para el material estándar OXA II

## 6. CONCLUSIONES

Fecha	mg C	ID Muestra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
21/08/2014	0.979	1.2.2	1.218E-12	3.886E-15	0.0099	2.212E-05
21/08/2014	0.979	1.2.3	1.210E-12	3.240E-15	0.0098	1.409E-05
21/08/2014	0.975	1.2.4	1.207E-12	3.254E-15	0.0098	1.912E-05
21/08/2014	0.976	1.2.5	1.198E-12	3.225E-15	0.0097	4.870E-05
20/09/2014	1.047	1.2.13	1.411E-12	3.812E-15	0.0105	4.275E-06
20/09/2014	1.038	1.2.10	1.403E-12	3.811E-15	0.0106	3.288E-06
20/09/2014	1.043	1.2.11	1.406E-12	3.731E-15	0.0105	3.576E-06
20/09/2014	1.047	1.2.12	1.405E-12	3.945E-15	0.0105	4.893E-06
15/01/2015	0.203	1.2.20	9.524E-13	6.652E-15	0.0091	1.377E-05
15/01/2015	0.199	1.2.21	9.364E-13	7.642E-15	0.0090	8.021E-06
15/01/2015	0.203	1.2.20	9.524E-13	6.652E-15	0.0091	1.377E-05
15/01/2015	0.199	1.2.21	9.364E-13	7.642E-15	0.0090	8.021E-06
15/01/2015	0.208	1.2.19	9.450E-13	5.310E-15	0.0089	9.322E-06
07/02/2015	0.984	1.2.33	1.384E-12	4.053E-15	0.0105	1.361E-05
07/02/2015	0.998	1.2.34	1.390E-12	3.673E-15	0.0105	6.920E-06
07/02/2015	0.980	1.2.35	1.383E-12	3.925E-15	0.0105	2.235E-06
07/02/2015	0.952	1.2.36	1.393E-12	3.929E-15	0.0106	1.150E-05
19/02/2015	0.979	1.2.37	1.364E-12	8.141E-15	0.0104	2.829E-06
19/02/2015	1.008	1.2.38	1.364E-12	6.188E-15	0.0105	2.107E-06
19/02/2015	0.134	1.2.23	1.373E-12	7.252E-15	0.0104	6.292E-07
23/02/2015	0.134	1.2.22	1.389E-12	5.933E-15	0.0105	1.953E-06
23/02/2015	0.979	1.2.37	1.392E-12	5.932E-15	0.0104	8.188E-06
23/02/2015	1.008	1.2.38	1.377E-12	6.022E-15	0.0105	9.906E-06
23/02/2015	0.994	1.2.39	1.382E-12	5.974E-15	0.0105	3.720E-06
13/03/2015	0.189	1.2.42	1.349E-12	5.994E-15	0.0104	3.660E-06
13/03/2015	0.202	1.2.43	1.345E-12	5.316E-15	0.0105	3.614E-06
13/03/2015	0.082	1.2.40	1.284E-12	1.923E-14	0.0107	2.771E-05
13/03/2015	0.083	1.2.41	1.276E-12	1.249E-14	0.0106	1.366E-05
13/03/2015	0.082	1.2.40	1.284E-12	1.923E-14	0.0107	2.753E-05
13/03/2015	0.083	1.2.41	1.276E-12	1.248E-14	0.0106	1.354E-05
06/04/2015	0.978	1.2.55	1.366E-12	5.778E-15	0.0104	1.067E-05
06/04/2015	1.045	1.2.52	1.373E-12	7.175E-15	0.0104	1.555E-06
06/04/2015	1.100	1.2.53	1.374E-12	4.486E-15	0.0104	5.513E-06
06/04/2015	1.035	1.2.54	1.374E-12	4.653E-15	0.0104	1.803E-06
22/04/2015	1.010	1.2.50	1.380E-12	4.755E-15	0.0105	1.798E-06
22/04/2015	1.037	1.2.51	1.367E-12	4.871E-15	0.0106	5.138E-06
22/06/2015	0.954	1.2.60	1.362E-12	4.162E-15	0.0106	1.516E-05
22/06/2015	1.003	1.2.61	1.354E-12	3.409E-15	0.0105	2.893E-06
22/06/2015	1.035	1.2.62	1.365E-12	3.623E-15	0.0105	1.190E-05

Tabla .12: Datos obtenidos para el material estándar OXA II

.3. Tablas de datos obtenidos para cada material estándar

Fecha	mg C	ID Muestra	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\pm$
30/06/2015	0.329	1.2.69	1.357E-12	3.988E-15	0.0104	2.223E-06
30/06/2015	1.042	1.2.66	1.342E-12	3.340E-15	0.0105	3.978E-06
30/06/2015	0.336	1.2.68	1.354E-12	3.690E-15	0.0104	8.964E-07
30/06/2015	1.029	1.2.63	1.339E-12	3.494E-15	0.0105	4.601E-06
30/06/2015	0.126	1.2.24	1.339E-12	3.534E-15	0.0105	5.439E-06
30/06/2015	0.959	1.2.64	1.344E-12	3.478E-15	0.0105	4.815E-06
30/06/2015	0.982	1.2.65	1.342E-12	3.394E-15	0.0105	2.913E-06
30/06/2015	0.678	1.2.24	1.339E-12	3.534E-15	0.0105	5.439E-06
25/10/2015	0.958	1.1.70	8.599E-14	4.253E-15	0.0098	2.401E-05
27/11/2015	0.805	1.2.14	1.379E-12	6.392E-15	0.0103	8.922E-06
27/11/2015	0.988	1.2.15	1.377E-12	5.140E-15	0.0104	1.240E-05
27/11/2015	0.994	1.2.16	1.365E-12	6.623E-15	0.0105	1.269E-05

Tabla .13: Datos obtenidos para el material estándar OXA II

## 6. CONCLUSIONES

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$
1.1.34	-20.362	1.786	133.952	0.402
1.1.35	-22.060	1.475	134.107	0.402
1.1.36	-3.538	0.958	133.496	1.074
1.1.37	-10.784	1.350	134.267	0.403
1.1.38	-16.288	1.691	134.023	0.503
1.1.39	-26.061	3.699	133.172	0.494
1.1.40	-13.830	1.089	134.825	0.434
1.1.41	-19.937	1.236	134.508	0.480
1.1.42	-14.840	1.415	133.303	0.517
1.1.43	-19.601	2.725	133.352	0.618
1.1.44	-14.981	0.829	134.641	0.436
1.1.45	-21.018	1.036	134.325	0.482
1.1.46	-16.480	1.065	133.342	0.536
1.1.13	-18.195	1.942	133.503	1.429
1.1.14	-15.837	2.174	131.151	2.406
1.1.15	-15.923	2.016	133.189	2.033
1.1.16	-17.800	1.934	134.066	0.892
1.1.22	-23.727	2.345	134.593	1.664
1.1.21	-8.581	2.794	134.414	2.622
1.1.23	-28.742	2.027	134.544	2.274
1.1.24	-10.263	2.060	132.359	3.194
1.1.33	-22.684	2.895	134.699	0.663
1.1.31	-17.249	1.465	133.182	0.660
1.1.34	-12.998	3.501	133.862	0.577
1.1.32	-16.451	1.799	134.328	0.682
1.1.2	-23.099	1.213	134.577	0.438
1.1.3	-8.629	1.724	133.475	0.542
1.1.4	-16.649	1.779	134.711	0.532
1.1.5	-17.109	1.817	133.220	0.484
1.1.6	-17.525	4.619	136.699	0.827
1.1.7	-11.366	3.160	133.563	0.683
1.1.8	-33.774	3.064	135.171	1.141
1.1.9	-13.703	2.978	132.448	0.948
1.1.10	-18.327	1.992	137.835	0.701
1.1.11	-26.905	1.600	137.162	2.379
1.1.12	-12.309	1.921	130.129	2.406
1.1.43	-4.057	4.339	133.536	1.073
1.1.44	-26.115	4.062	134.604	1.530
1.1.45	-25.445	4.085	134.641	1.067
1.1.46	-22.121	4.079	133.186	1.644
1.1.47	-25.532	4.223	133.512	1.090
1.1.48	-10.915	4.899	134.450	0.811
1.1.45	-28.410	3.623	134.501	0.791
1.1.46	-7.429	4.978	133.730	0.774

Tabla .14: Datos obtenidos para el material estándar OXA II

.3. Tablas de datos obtenidos para cada material estándar

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$
1.2.2	-11.149	2.737	135.101	0.478
1.2.3	-15.303	2.133	134.206	0.414
1.2.4	-17.587	2.493	133.903	0.416
1.2.5	-28.304	5.130	132.916	0.412
1.2.13	-19.515	0.472	134.525	0.404
1.2.10	-15.377	0.398	133.750	0.401
1.2.11	-18.485	0.419	134.057	0.402
1.2.12	-17.790	0.522	133.936	0.412
1.2.20	-12.404	1.835	135.163	1.103
1.2.21	-16.471	1.367	132.895	1.221
1.2.20	-12.404	1.835	135.163	1.103
1.2.21	-16.471	1.367	132.895	1.221
1.2.19	-26.531	1.454	134.111	0.942
1.2.33	-19.053	1.384	133.712	0.428
1.2.34	-18.019	0.849	134.289	0.403
1.2.35	-20.773	0.589	133.658	0.417
1.2.36	-13.673	1.207	134.552	0.417
1.2.37	-20.654	0.619	134.077	0.873
1.2.38	-13.748	0.597	134.027	0.701
1.2.23	-18.143	0.564	134.926	0.794
1.2.23	-17.081	0.743	134.460	0.641
1.2.37	-22.168	1.050	134.710	0.641
1.2.38	-12.680	1.177	133.315	0.648
1.2.39	-20.369	0.798	133.791	0.644
1.2.42	-18.797	0.481	134.232	0.701
1.2.43	-16.425	0.478	133.837	0.644
1.2.40	-15.491	2.963	134.510	2.302
1.2.41	-19.674	1.949	133.706	1.713
1.2.40	-15.511	2.943	134.510	2.302
1.2.41	-19.657	1.934	133.706	1.713
1.2.55	-16.060	1.077	133.465	0.614
1.2.52	-20.274	0.412	134.153	0.742
1.2.53	-16.094	0.648	134.268	0.502
1.2.54	-19.536	0.422	134.177	0.516
1.2.50	-20.832	0.693	134.661	0.548
1.2.51	-14.512	0.829	133.421	0.556
1.2.60	-11.745	1.668	134.220	0.464

Tabla .15: Datos obtenidos para el material estándar OXA II

## 6. CONCLUSIONES

---

ID Muestra	$\delta^{13}\text{C}$	$\pm$	Fm	$\pm$
1.2.61	-22.302	0.917	133.461	0.400
1.2.62	-20.963	1.414	134.551	0.418
1.2.69	-27.801	0.488	135.514	0.445
1.2.66	-13.568	0.583	134.010	0.402
1.2.68	-28.346	0.449	135.247	0.418
1.2.63	-16.133	0.621	133.752	0.401
1.2.24	-16.509	0.678	133.713	0.404
1.2.64	-16.538	0.635	134.211	0.403
1.2.65	-14.273	0.525	134.017	0.402
1.2.22	-16.509	0.678	133.713	0.404
1.1.70	-11.301	3.152	131.110	8.072
1.2.14	-23.203	1.495	134.611	0.688
1.2.15	-20.881	1.704	134.468	0.579
1.2.16	-11.037	1.733	133.291	0.707

Tabla .16: Datos obtenidos para el material estándar OXA II

---

## Referencias

---

- [1] BOWMAN, S., *Interpreting the past: Radiocarbon Dating*, University of California Press/ British Museum, Gran Bretaña, 1990.
- [2] BEER, J., MC CRACKEN, K. y VON STEIGER, R., *Cosmogenic Radionuclides: Theory and Applications in the Terrestrial and Space Environments*, Springer, Alemania, 2012.
- [3] SALCEDO CAMACHO L. E., *Tempus Solaris: Algunas nociones sobre actividad solar, las variaciones Seculares del Carbono 14 atmosférico y los estados del isotopo de carbono*, Intersur, Perú, 2011.
- [4] G.D. FARQUHAR, M.J.R. FASHAM, M.L. GOULDEN, M. HEIMANN, V.J. JARAMILLO, H.S. KHESHGI, C. LE QUERE, R.J. SCHOLLES, D.W.R. WALLACE *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, **Chapter 3**, Cambridge University Press, Reino Unido, p.p. 185–225, 2001.
- [5] JACOB, D. *Introduction to Atmospheric Chemistry*, **Chapter 6**, Princeton University Press, Estados Unidos de América, p.p. 83–104, 1999.
- [6] GALLARDO, J. F., y MERINO, A. «*El ciclo del carbono y la dinámica de los sistemas forestales.*», Fundación Gas Natural, España, 2007.
- [7] JHA D.K. *Radioactivity And Radioactive Decay*, Discovery Publishing House, 2004.
- [8] QUAN HUA, «*Radiocarbon: A chronological tool for the recent past*», *Quaternary Geochronology*, **4**, p.p. 378–390, 2009.
- [9] BOUDIN, M., VAN STRYDONCK, M., VAN DEN BRANDE, T., SYNAL, H., WAKER, L. *RICH- A New AMS facility at the Royal Institute for Cultural Heritage*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B361*, Zurich, Suiza, p.p. 120–123, 2015.
- [10] FIFIELD L. K. *Accelerator mass spectrometry and its applications*, *Rep. Prog. Phys.* **62**, Australia, p.p. 1223–1274, 1999.
- [11] R. HELLBORG, G. SKOG *Accelerator Mass Spectrometry*, *Mass Spectrometry Reviews*, Suecia, p.p. 398–427, 2008.
- [12] GÓMEZ G. JOSÉ M. *Medida de I291 en el Sistema de Espectrometría de Masas con Aceleradores de IMV del Centro Nacional de Aceleradores: Aplicación a problemas medioambientales*, PhD thesis, Universidad de Sevilla, 2010.
- [13] NAVARRO A. JAVIER *Determinación de la medida de <sup>14</sup>C por espectrometría de masas con aceleradores*, tesis de licenciatura, UNAM, 2014.

- [14] C. BRYANT, I. CARMÍ, G. COOK, S. GULLIKSEN, D. HARKNESS, J. HEINEMEIER, E. MCGEE, P. NAYSMITH, G. POSSNERT, M. SCOTT, H. VAN DER PLICHT, M. VAN STRYDONCK *Sample requirements and design of an interlaboratory trial for radiocarbon laboratories*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B172, p.p. 355–358, 2000.
- [15] WACKER, L., NEMEC, M., BOURQUIN, J., *A revolutionary graphitisation system: Fully automated, compact and simple*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B268, Zurich, Suiza, p.p. 931–934, 2010.
- [16] P. REIMER, E. BARD, A. BAYLISS, W. BECK, P. BLACKWELL, C. B. RAMSEY, C. BUCK, H. CHENG, R. EDWARDS, M. FRIEDRICH, P. GROOTES, T. GUILDSON, H. HAJDAS, I. HAJDAS, C. HATTE, T. HEATON, D. HOFFMANN, A. HOGG, K. HUGHEN, K. KAISER, B. KROMER, S. MANNING, M. NIU, R. REIMER, D. RICHARDS, E. SCOTT, J. SOUTHON, R. STAFF, C. TURNEY, J. VAN DER PLICHT *INTCAL13 AND MARINE13 RADIOCARBON AGE CALIBRATION CURVES 0–50 000 YEARS CAL BP*, Radiocarbon, Vol 55, Arizona, Estados Unidos de América, p.p. 1869–1887, 2013.
- [17] HAJDAS I., MICHCZYOSKI A., BONANI G., WACKER L., FURRER H. *Dating Bones Near the limit of the radiocarbon dating method: study case mammoth from Niederweningen, ZH Switzerland*, Radiocarbon Vol. 51, Arizona, Estados Unidos de América, p.p. 675–680, 2009.
- [18] TRUMBORE, S. E. *Radiocarbon Geochronology*, Quaternary Geochronology: Methods and Applications, American Geophysical Union, Washington DC, Estados Unidos de América, p.p. 41–60, 2009.
- [19] K. E. STENSTROM, G. SKOG, E. GEORGIADOU, J. GENBERG, A. JOHANSSON *A guide to radiocarbon units and calculations*, Lund University, Suecia, p.p. 3–17, 2011.
- [20] HAJDAS I. *Radiocarbon dating and its applications in Quaternary studies*, Eiszeitalter und Gegenwart Quaternary Science Journal Vol. 57, Hannover, p.p. 2–24, 2008.
- [21] VARIOS AUTORES *Radiocarbon, An International Journal of Cosmogenic Isotope Research*, Vol. 45, No. 2., Arizona, p.p. 135–150, 2003.
- [22] RODRÍGUEZ CEJA, MARÍA *Propiedades magnéticas y arqueointensidades de cerámicas teotihuacanas*. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra UNAM, Instituto de Geofísica, p.p. 46–69, 2009.
- [23] SCOTT E. M. *Assuring measurement quality: The international <sup>14</sup>C laboratory intercomparison program*, PAGES News, Vol. 14, No. 3., Reino Unido, p.p. 7–9, 2006.
- [24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY DEPARTMENT OF NUCLEAR SCIENCES AND APPLICATIONS *REFERENCE SHEET FOR QUALITY CONTROL MATERIALS*, 2014.
- [25] JACOBI RM, HIGHAM TFG, BRONK RAMSEY C. *AMS radiocarbon dating of Middle and Upper Palaeolithic bone in the British Isles: Improved reliability using ultrafiltration*. Journal Quaternary Sci 21(5):557–573. 2006.
- [26] RATTRAY, EVELYN *Cerámica, cronología y tendencias culturales*, Serie Arqueología de México, INAH-University of Pittsburgh, Teotihuacan, 2001.

- [27] MILLON, RENÉ “*Teotihuacan Studies: from 1950 to 1990 and beyond*”, en *Art, Ideology, and the city of Teotihuacan. A symposium at Dumbarton Oaks*. Janet Catherine Berlo (ed), Dumbarton Oaks Research Library and collection, Washington, D.C.,1992, p.p. 339–419.
- [28] MILLON, RENÉ *Urbanization at Teotihuacan. The Teotihuacan map*, volumen 1, part 1, University of Texas press, 1973.
- [29] GÓMEZ, SERGIO Y GAZZOLA, JULIE *Una Propuesta Sobre el Proceso, Factores y Condiciones del Colapso de Teotihuacán*. Dimensión Antropológica, edición Mayo-Agosto, 2004, p.p. 7–57.
- [30] CABRERA C. RUBÉN *La cronología de la Ciudadela en su secuencia arquitectónica*.en *Memoria del Proyecto Arqueológico Teotihuacán*. Volumen 1, Colección Científica 132, INAH, México, 1982.
- [31] MANZANILLA, LINDA *Agrupamientos sociales y gobierno en Teotihuacan, Centro de México*. Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM, p.p. 461–482.
- [32] KING, TIMOTHY Y GÓMEZ, SERGIO *Avances en el desciframiento de la escritura jeroglífica de Teotihuacán*, en *Memoria de la Segunda Mesa Redonda de Teotihuacán: La costa del Golfo en tiempos teotihuacanos: propuestas y perspectivas*, María Elena Ruiz Gallut y Arturo Pascual Soto (eds.), INAH, México, 2004, p.p. 201–244.
- [33] CABRERA C. RUBÉN *La excavación del conjunto 1C' en Memoria del Proyecto Arqueológico Teotihuacán*. Volumen 1, Colección Científica 132, INAH, México, 1982.
- [34] COWGILL, GEORGE L. *Teotihuacan, ciudad de misterios*. Arqueología Mexicana, p.p 23–27, 2003.
- [35] GÓMEZ, SERGIO Y GAZZOLA, JULIE *Avances de la exploración del túnel bajo el Templo de La Serpiente Emplumada en Teotihuacán*. Escenificaciones rituales y políticas en La Ciudadela, en *El Juego de Pelota Mesoamericano, Temas Eternos, Nuevas Aproximaciones*. Editora: María Teresa Uriarte, Primera Edición, México, UNAM, 2016. p.p. 118–159.
- [36] STOREY, R Y WIDMER RANDOLPH *Household and community. Structure of a Teotihuacan Apartment Compound*. Chacmool S. McEachern. The Archeological Association of the University of Calgary, 1987.
- [37] JARQUIN P., ANA M Y MARTÍNEZ V., ENRIQUE *Las excavaciones en el conjunto 1D en Memoria del Proyecto Arqueológico Teotihuacán*. Volumen 1, Colección Científica 132, INAH, México, 1982.
- [38] CABRERA C., RUBÉN *La cronología de La Ciudadela en su secuencia arquitectónica en Los ritmos de cambio en Teotihuacán. Reflexiones y discusiones de su cronología*, Rosa Brambila y Rubén Cabrera (eds.), Colección Científica 366, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, 1998, p.p. 143-166.
- [39] SUGIYAMA, SABURO *Cronología de sucesos ocurridos en el Templo de Quetzalcóatl, Teotihuacán*, en *Los ritmos de cambio en Teotihuacán. Reflexiones y discusiones de su cronología*, Rosa Brambila y Rubén Cabrera (eds.), Colección Científica 366, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, 1998, p.p. 167-184.

## REFERENCIAS

---

- [40] CABRERA, RUBÉN Y SUGIYAMA, SABURO *La reexploración y restauración del templo viejo de Quetzalcóatl en Memoria del Proyecto Arqueológico Teotihuacán*. Volumen 1, Colección Científica 132, INAH, México, 1982.